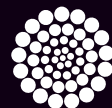




# Medicina espacial

Coordinadores  
**Raúl Carrillo Esper**  
**Juan Alberto Díaz Ponce Medrano**  
**Lucio Padrón San Juan**



**CONACYT**  
*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*



# ■ Medicina espacial



**Mesa Directiva**  
**de la Academia Nacional de Medicina de México**  
**2014–2016**

Presidente

**Dr. Enrique Graue Wiechers**

Vicepresidente

**Dr. Armando Mansilla Olivares**

Secretario General

**Dr. Fabio Salamanca Gómez**

Tesorero

**Dr. Germán Fajardo Dolci**

Secretario Adjunto

**Dra. Gloria Soberón Chávez**



# ■ Medicina espacial

Coordinadores

**Raúl Carrillo Esper**

**Juan Alberto Díaz Ponce Medrano**

**Lucio Padrón San Juan**



DERECHOS RESERVADOS © 2016, por:  
Academia Nacional de Medicina de México (ANMM)

Editado, impreso y publicado, con autorización de la Academia Nacional de Medicina de México, por



**Intersistemas, S.A. de C.V.**

Aguilar y Seijas 75  
Lomas de Chapultepec  
11000, México, D.F.  
Tel. (5255) 5520 2073  
Fax (5255) 5540 3764  
intersistemas@intersistemas.com.mx  
www.intersistemas.com.mx

# Medicina espacial, primera edición

Documento de Postura

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse, almacenarse en cualquier sistema de recuperación de datos inventado o por inventarse, ni transmitirse en forma alguna y por ningún medio electrónico o mecánico, incluidas fotocopias, sin autorización escrita del titular de los derechos de autor.

ISBN 978-607-443-624-2



Reproducir esta obra en cualquier formato es ilegal. Infórmate en: [info@cempro.org.mx](mailto:info@cempro.org.mx)

## Créditos de producción

**Alejandro Bravo Valdez**  
Dirección editorial

**LDG Edgar Romero Escobar**  
Diseño de portada

**LDG Marcela Solís**  
Diseño y diagramación de interiores

**J. Felipe Cruz Pérez**  
Control de calidad

Impreso en México

*Printed in Mexico*

## Coordinadores

**Dr. Raúl Carrillo Esper**

Academia Nacional de Medicina de México

Academia Mexicana de Cirugía

Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra

[2, 4, 10, 15, 20, 28]

**Cap. Frag. Juan Alberto Díaz Ponce Medrano**

SSN. MCN. Anest. PED. DEM.

Director de la Escuela Médico Naval

[2]

**Cap. Frag. Lucio Padrón SanJuan**

SSN. MCN. P. UROL.

Subdirector de la Escuela Médico Naval

[2]

*Los números entre corchetes refieren el capítulo escrito.*

## Colaboradores

**Dr. José Valente Aguilar Zinser**

Dirección General de Protección y Medicina Preventiva en el Transporte (DGPMPT), Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)

[24]

**Vladimir Alexandrov**

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Universidad Estatal de Moscú

[9]

**Tamara Alexandrova**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Universidad Estatal de Moscú

[9]

**TTR. Irma Ayala Cruz**

Técnico en Terapia respiratoria, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[12]

**Dra. Anahy Lilian Beltrán Rodríguez**

Residente de Anestesiología en el Hospital General de México Dr. Eduardo Liceaga

[23]

**Dr. Jesús Carlos Briones Garduño**

Academia Nacional de Medicina de México

Academia Mexicana de Cirugía

Jefe de servicio de Ginecología y Obstetricia, Hospital General de México Dr. Eduardo Liceaga

Profesor titular del curso de Medicina Crítica en Obstetricia

[14, 16]

**TTR. Karla Ivonne Campos Olivares**

Técnico en Terapia respiratoria, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[12]

**Carlos Alberto Carrillo Córdova**

Médico interno de pregrado, Facultad de Medicina, UNAM

[20, 27]

**Dr. Luis Daniel Carrillo Córdova**

Urología, Hospital General de México Dr. Eduardo Liceaga

[27]

**Dr. Jorge Raúl Carrillo Córdova**

Servicio de Cirugía plástica y Reconstrucción, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[27]

**Dulce María Carrillo Córdova**

Médica interna de pregrado, Facultad de Medicina, UNAM

[20]

**M. en S.H.O. María Ivette Cruz Aburto**

Maestra en Seguridad e Higiene Ocupacional

Profesora de la Facultad de Odontología, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex)

[25]

**Dr. Marcelo Alejandro de la Torre León**

Jefatura de Enseñanza e Investigación, Hospital Materno Celaya

[4]

**Dra. Teresa de la Torre León**

Jefatura de la Unidad de Obstetricia Crítica, Hospital Materno Celaya

[4]

**Dr. Manuel Alejandro Díaz Carrillo**

Jefe de División de Terapia respiratoria, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[12]

**Dr. Manuel Antonio Díaz de León Ponce**

Academia Nacional de Medicina de México

Academia Mexicana de Cirugía

[14, 16]

**Dra. Isis Espinoza de los Monteros Estrada**

Anestesiología. Medicina del enfermo en estado crítico

Médica adscrita a la Unidad de Terapia Intensiva, IMSS Clínica 2

[26]

**Dra. Irma Guadalupe García Colmenero**

Anestesiología. Hospital General de México Dr. Eduardo Liceaga

[23]

**Dra. María Elva García Salazar**

Vocal Zona Norte de la Asociación Médica Latinoamericana de Rehabilitación (AMLAR)

Asuntos Internacionales de la Sociedad Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación, A. C.

[13]

**Dr. Eduardo Garrido Aguirre**

Anestesiología del Hospital General de México Dr. Eduardo Liceaga

Medicina del Enfermo adulto en estado crítico. Unidad de Cuidados Intensivos ISEM Ecatepec  
“Las Américas”

[23]

**Lic. Ma del Rosario Gutiérrez Razo**

Líder de proyecto del Seminario sobre Medicina y Salud, UNAM

[18]

**Dr. Juan Manuel Guzmán González**

Presidente del 8th World Congress of ISPRM

Presidente honorario vitalicio de la Sociedad Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación, A. C.

[13]

**Dra. Fatima del Rosario Guzmán Pinedo**

Dirección General de Protección y Medicina Preventiva en el Transporte (DGPMPT),

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)

[24]

**Dr. Gabriel Heredia Bretón**

Dirección General de Protección y Medicina Preventiva en el Transporte (DGPMPT),

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)

[24]

**TTR. Sonia Azucena Hernández Hernández**

Técnico en Terapia respiratoria, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[12]

**Acad. M. en ITI. Dr. Juan Carlos Hernández Marroquín**

Coordinador Telemedicina

Universidad Anáhuac. México

[5]

**TTR. Francisco José Huepa Sanabria**

Técnico en Terapia respiratoria, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[12]

**Dr. Ramiro Iglesias Leal**

Médico cirujano, UNAM. Especialidad en Cardiología y Medicina aeroespacial

Docente de la Escuela Superior de Medicina, IPN y la Facultad de Medicina, UNAM

Profesor de posgrado en el INC Ignacio Chávez, disciplina Cardiología aeroespacial

Presidente fundador de la Sociedad Mexicana de Medicina Aeroespacial

Miembro fundador de la Sociedad Mexicana de Astrobiología

Miembro de la Aerospace Medical Association, USA

[6]

**TTR. Carlos Alberto Mañón Valdez**

Técnico en Terapia respiratoria, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[12]

**Dr. Luis Armando Martínez Gil**

Integrante del Seminario sobre Medicina y Salud, UNAM

[18]

**TTR. José de Jesús Medina Vázquez**

Técnico en Terapia respiratoria, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[12]

**Dra. Nikolett Medveczky Ordóñez**

Universidad de la Cuenca, Facultad de Ciencias Médicas, Ecuador

[22]

**Dr. Francisco Javier Mendieta Jiménez**

Director General, Agencia Espacial Mexicana, Secretaría de Comunicaciones y Transportes

[Prefacio, 28]

**Dr. José Martín Meza Márquez**

Medicina crítica, Medicina de reanimación, Urgencias médico-quirúrgicas

Grupo Mexicano para el Estudio de la Medicina Intensiva

Sociedad Mexicana de Medicina del Espacio y Microgravedad

[10]

**TTR. Jovita Mondragón Díaz**

Técnico en Terapia respiratoria, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[12]

**Dra. Luz Ernestina Morán Solares**

Coordinadora de Educación e Investigación en Salud,

Instituto Mexicano del Seguro Social

[8]

**Dr. Armando Alberto Moreno Santillán**

Gineco-obstetra. Investigador asociado del Instituto Mexiquense de Perinatología “Mónica Pretelini”

Encargado de la clínica de embarazo de alto riesgo en el Hospital de Gineco-obstetricia

Dr. Castelazo Ayala, IMSS

[14]

**Dr. Raúl Mújica García**

Investigador titular. Coordinación de Astrofísica

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)

Santa María Tonantzintla, Puebla. México

[3]

**Dr. David Muñoz Rodríguez**

Coordinador General de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico Espacial

Agencia Espacial Mexicana, Secretaría de Comunicaciones y Transportes

[28]

**Dr. Rafael Akira Namba Bando**

Jefe de Unidad médica tipo A, Dirección General de Protección y Medicina Preventiva

en el Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes

[24]

**Dr. Jorge Arturo Nava López**

Profesor adjunto del Curso universitario de Anestesiología del Hospital General de México

Medicina del Enfermo adulto en estado crítico. Unidad de Cuidados Intensivos ISEM Ecatepec

“Las Américas”

[23]

**Dr. Rolando Neri Vela**

Departamento de Historia y Filosofía de la Medicina

Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México

[1]

**Q.F.B. Luis Alberto Ochoa Carrera**

Secretario, Asociación Mexicana de Bioseguridad

[21]

**Dr. Francisco Javier Ochoa Carrillo**

Academia Mexicana de Cirugía

Instituto Nacional de Cancerología

[20]

**TTR. Laura Patricia Olivares Fonseca**

Técnico en Terapia respiratoria, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[12]

**Dr. Benito Orozco Serna**

Investigador, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)

[8, 28]

**Dr. Ángel Augusto Pérez Calatayud**

Comité directivo y científico, Sociedad Mexicana de Medicina del Espacio y Microgravedad

Medicina de Urgencias. Medicina del enfermo en estado crítico

Coordinador del Grupo Mexicano para el Estudio de la Medicina Intensiva

[11, 16, 20]

**Adriana Pliego**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Universidad Autónoma del Estado de México

[9]

**Dra. Sandra Ignacia Ramírez Jiménez**

Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México

[7]

**M. en C. S. Julio Basilio Robles Navarro**

Maestro en Ciencias de la Salud

Profesor de la Facultad de Odontología, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex.)

[25]

**Dr. Marco Antonio Robles Rangel**

Unidad de Cuidados intensivos cardiovasculares (UMAE), Hospital de Cardiología,

CMN Siglo XXI, Instituto Mexicano del Seguro Social

[19]

**Dr. José Adrián Rojas Dosal**

Coordinador del Seminario sobre Medicina y Salud, UNAM

Academia Nacional de Medicina

[18]

**Dr. Agustín Omar Rosales Gutiérrez**

Medicina Interna. Medicina del enfermo en estado crítico

Médico adscrito a la Unidad de terapia intensiva, Hospital Universitario de Saltillo

[26]

TTR. Erika Sánchez Fernández

Técnico en Terapia respiratoria, Hospital General Dr. Manuel Gea González

[12]

Dra. Herlinda Sánchez Pérez

Medicina Interna

[17]

Dr. Martín de Jesús Sánchez Zúñiga

Medicina Interna. Terapia Intensiva

[17, 22]

Dr. José Luis Sandoval Gutiérrez

Jefe del Departamento de áreas críticas, Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias

Ismael Cosío Villegas

Presidente de la Asociación Mexicana de Bioseguridad

[21]

Dr. Edgar Enrique Sevilla Reyes

Investigador, SIENI. Vocal del Comité de Bioseguridad, Instituto Nacional

de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas

[21]

Dra. Laura Silva Blas

Jefa de Enseñanza en Anestesiología, Curso universitario de Anestesiología

del Hospital General de México Dr. Eduardo Liceaga

Anestesiología pediátrica

[23]

Dr. Enrique Soto Eguibar

Investigador titular C, corresponsable del Laboratorio de Neurofisiología Sensorial,

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Academia Nacional de Medicina

[9]

Mtra. Fabiola Vázquez Torres

Gerente de Medicina Espacial y Cibersalud

Agencia Espacial Mexicana, Secretaría de Comunicaciones y Transportes

[8, 28]

Dra. María del Rosario Vega y Saenz de Miera

Investigadora titular C, corresponsable del Laboratorio de Neurofisiología Sensorial,

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

[9]



**Dra. Elba Luz Villena López**

Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México

[27]

**Dra. Berenice Zavala Barrios**

Medicina materno-fetal, Hospital General de México Dr. Eduardo Liceaga

Diplomada en Medicina crítica en obstetricia

[16]

**Dra. Adriana Denise Zepeda Mendoza**

Médica urgencióloga e intensivista, Hospital General de México Dr. Eduardo Liceaga

[15]

## **Nota**

“En este libro los autores buscan destacar aspectos más recientes en la medicina espacial, y no se dirige a la atención de casos particulares. Por lo que la aplicación de los conceptos vertidos en esta publicación, queda a criterio exclusivo del lector y no de los autores y editores.”

# Contenido

<b>■ Presentación .....</b>	<b>XVII</b>
Enrique Graue Wiechers	
<b>Prólogo.....</b>	<b>XIX</b>
Enrique Ruelas Barajas	
<b>Prefacio .....</b>	<b>XXI</b>
Francisco Javier Mendieta Jiménez	
<b>SECCIÓN I. MEDICINA Y CIENCIAS ESPACIALES</b>	
<b>1. Momentos estelares en la historia de la medicina espacial .....</b>	<b>1</b>
Rolando Neri Vela	
<b>2. Inicios y avances de la medicina espacial en México .....</b>	<b>11</b>
Raúl Carillo Esper, Juan Alberto Díaz Ponce Medrano, Lucio Padrón SanJuan	
<b>3. El Cosmos .....</b>	<b>19</b>
Raúl Mújica García	
<b>4. Tecnología de la información aplicada a la medicina espacial .....</b>	<b>39</b>
Teresa de la Torre León, Marcelo Alejandro de la Torre León, Raúl Carrillo Esper	
<b>5. Telemedicina y medicina satelital .....</b>	<b>55</b>
Juan Carlos Hernández Marroquín	

<b>6. Perfil del hombre cósmico .....</b>	<b>73</b>
Ramiro Iglesias Leal	
<b>7. Astrobiología y medicina espacial .....</b>	<b>87</b>
Sandra Ignacia Ramírez Jiménez	
<b>8. Aportaciones de la tecnología espacial a la salud humana .....</b>	<b>99</b>
Benito Orozco Serna, Fabiola Vázquez Torres, Luz Ernestina Morán Solares	
<b>9. Dispositivo para la estabilización de la postura en microgravedad .....</b>	<b>121</b>
Rosario Vega, Enrique Soto, Adriana Pliego, Vladimir Alexandrov, Tamara Alexandrova, Raúl Carrillo Esper	

## SECCIÓN II. ADAPTACIÓN FISIOLÓGICA EN EL ESPACIO

<b>10. Sistema cardiovascular .....</b>	<b>139</b>
José Martín Meza Márquez	
<b>11. Sistema neurológico y vestibular .....</b>	<b>153</b>
Ángel Augusto Pérez Calatayud	
<b>12. Sistema respiratorio.....</b>	<b>165</b>
Manuel A. Díaz Carrillo, Irma Ayala Cruz, Karla I. Campos Olivares, Sonia A. Hernández Hernández, Francisco J. Huepa Sanabria, Carlos A. Mañón Valdez, J. de Jesús Medina Vázquez, Jovita Mondragón Díaz, Laura P. Olivares Fonseca, Erika Sánchez Fernández	
<b>13. Rehabilitación en microgravedad .....</b>	<b>175</b>
Juan Manuel Guzmán González, María Elva García Salazar	
<b>14. Líquidos, electrolitos y función renal en el Espacio.....</b>	<b>185</b>
Manuel Antonio Díaz de León Ponce, Armando Alberto Moreno Santillán, Jesús Carlos Briones Garduño	
<b>15. Nutrición en el Espacio .....</b>	<b>193</b>
Adriana Denise Zepeda Mendoza, Raúl Carrillo Esper	

<b>16. Medicina reproductiva y microgravedad .....</b>	<b>205</b>
Jesús Carlos Briones Garduño, Berenice Zavala Barrios, Manuel Antonio Díaz de León Ponce, Ángel Augusto Pérez Calatayud	
<b>17. Adaptación del sistema inmune en el Espacio .....</b>	<b>209</b>
Martín de Jesús Sánchez Zúñiga, Herlinda Sánchez Pérez	
<b>18. Efectos de la microgravedad en el aparato de la visión.....</b>	<b>221</b>
José Adrián Rojas Dosal, Luis Armando Martínez Gil, Ma. del Rosario Gutiérrez Razo	

### SECCIÓN III. ESCENARIOS ESPECIALES DE LA MEDICINA ESPACIAL

<b>19. Reanimación cardiopulmonar en microgravedad .....</b>	<b>235</b>
Marco Antonio Robles Rangel	
<b>20. Impacto de la microgravedad y la radiación espacial en el comportamiento celular y carcinogénesis.....</b>	<b>265</b>
Francisco Javier Ochoa Carrillo, Raúl Carrillo Esper, Ángel Augusto Pérez Calatayud, Dulce María Carrillo Córdova, Carlos Alberto Carrillo Córdova	
<b>21. Microbiología espacial e infecciones en el Espacio .....</b>	<b>275</b>
José Luis Sandoval Gutiérrez, Luis Alberto Ochoa Carrera, Edgar Enrique Sevilla Reyes	
<b>22. Urgencias médicas en los vuelos espaciales.....</b>	<b>291</b>
Martín de Jesús Sánchez Zúñiga, Nikolett Medveczky Ordóñez	
<b>23. Anestesia y manejo de la vía aérea en microgravedad .....</b>	<b>299</b>
Jorge Arturo Nava López, Anahy Lilian Beltrán Rodríguez, Laura Silva Blas, Eduardo Garrido Aguirre, Irma Guadalupe García Colmenero	
<b>24. Perfil psicológico de los astronautas y adaptación al confinamiento en el Espacio .....</b>	<b>311</b>
José Valente Aguilar Zinser, Fatima del Rosario Guzmán Pinedo, Rafael Akira Namba Bando, Gabriel Heredia Bretón	
<b>25. La odontología en el Espacio .....</b>	<b>325</b>
María Ivette Cruz Aburto, Julio Basilio Robles Navarro	

<b>26. Cambios hematológicos en microgravedad.</b>	
<b>La fascinante aventura espacial .....</b>	<b>345</b>
Agustín Omar Rosales Gutiérrez, Isis Espinoza de los Monteros Estrada	
<b>27. Cirugía en el espacio .....</b>	<b>351</b>
Luis Daniel Carrillo Córdova, Carlos Alberto Carrillo Córdova, Elba Luz Villena López, Jorge Raúl Carrillo Córdova	
<b>SECCIÓN IV. POSTURA DE LA ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA DE MÉXICO</b>	
<b>28. Recomendaciones .....</b>	<b>357</b>
Francisco Javier Mendieta Jiménez, Raúl Carrillo Esper, Fabiola Vázquez Torres, Benito Orozco Serna, David Muñoz Rodríguez	
<b>Índice .....</b>	<b>365</b>

# Presentación

■ Es vocación de la Academia Nacional de Medicina el estudiar, analizar y reflexionar en los problemas de salud que aquejan a nuestra población, así como profundizar en las áreas emergentes de la medicina y que se antoja necesario que se incursione en forma más decidida en su campo de conocimiento. Tal es el caso de la medicina espacial.

La medicina espacial es una rama de la medicina encargada de estudiar la adaptación del ser humano y de la respuesta de los distintos órganos y sistemas a los ambientes de microgravedad o ausencia de ella y a la exposición a radiación solar y cósmica a la que está expuesta el ser humano fuera de los confines de seguridad que se estableció el pionero en la medición de radiación atmosférica (Campos de Van Allen).

La medicina espacial se nutre de ciencias afines como son la medicina aeronáutica, la astrobiología, la telemedicina, la nutrición y la biotecnología. Con el auxilio de todas ellas, los astronautas han podido sobrevivir, por tiempos prolongados, en ambientes adversos y con su estudio y soluciones se ha ido preparando las condiciones biológicas necesarias para un eventual viaje interplanetario.

Al haberlo hecho y por las condiciones mismas de las cabinas espaciales se ha propiciado un gran desarrollo tecnológico colateral derivado de la medicina espacial, ejemplos de ellos son la nutrición elemental, pañales desechables, el velcro, y los recicladores y purificadores de agua, por mencionar algunos. Muchos de estos desarrollos espaciales han también impulsado decididamente el avance de la medicina y como ejemplos de esto tenemos los brazos del robot quirúrgico, la telemedicina y el seguimiento satelital de enfermedades.

Se antoja lejana aún la era espacial mexicana, pero no por ello se han dejado de hacer valiosos esfuerzos que han permitido a un puñado de expertos interactuar en el ámbito de la investigación internacional. Es indudable que esta disciplina de la medicina representa una oportunidad de crecer y sentar las bases para un gradual desarrollo de esta área del conocimiento.

La Academia Nacional de Medicina de México, consciente de la importancia del tema se adhirió en forma entusiasta al proyecto iniciado por la Agencia Espacial Mexicana a fin de fortalecer el programa de medicina espacial en México.

El objetivo central del programa es impulsar el desarrollo de la investigación científica y tecnológica en materia de medicina espacial que comprende: formación de recursos humanos calificados, financiamiento, vinculaciones interinstitucionales, desarrollo de foros y congresos para difusión de los programas académicos y científicos organizados por la Agencia Espacial Mexicana y la Sociedad Mexicana de Medicina del Espacio y Microgravedad (SoMMEM).

A la primera convocatoria a la que se adhirió la Academia Nacional de Medicina, han seguido nuevas y muy valiosas adhesiones de instituciones interesadas en el tema. Entre ellas

destacan: la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la Comisión Nacional de Bioética, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, la Escuela Médico Naval, el Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, el Hospital General de México, la Academia Mexicana de Cirugía, y la Asociación Mexicana de Bioseguridad, entre otras.

Como parte de los documentos generados en el desarrollo del Programa de Medicina Espacial, la Academia Nacional de Medicina aprobó el desarrollar un documento de postura cuyo objetivo sería el revisar aspectos más importantes relacionados con la medicina espacial y proponer políticas que propicien el mejor desarrollo de esta área de la medicina.

El texto que se presenta está dividido en cuatro secciones, la primera relacionada con medicina y ciencias espaciales, la segunda relacionada con la adaptación fisiológica en el espacio, la tercera versa sobre escenarios especiales de la medicina espacial, y en la cuarta se propone la postura y política en materia de medicina espacial.

Con este texto, la Academia Nacional de Medicina abre un nuevo campo de conocimiento en el que México debe gradualmente incursionar, tanto por la colaboración internacional que en este sentido se requiere, como por el futuro desarrollo tecnológico de nuestra nación.

**Enrique Graue Wiechers**

Presidente

Academia Nacional de Medicina de México

(2014-2016)

# Prólogo

Entre fantasías mitológicas, ficción que parece ciencia, ciencia que descubre nuevas realidades, y realidades que se confunden con ficciones y relatos mitológicos, ha transitado la vida de la humanidad desde su inicio. El siglo veinte condensó en unos cuantos años, tal vez como nunca antes, sueños ancestrales y verdades que hasta hoy nos resultan ciertas. El hombre realmente pudo volar, los astros se acercaron y fue posible llegar a la Luna, a Marte, a todos los demás planetas y asomarse al origen mismo de la explosión primigenia que, hasta donde entendemos, dio origen al universo que hoy creemos conocer mejor que antes, aunque sepamos que no sabemos de qué está hecha la mayor cantidad de esa desconocida materia que lo constituye. Por fin pudimos ver nuestro mundo desde lejos. Nos vimos completos por primera vez a nosotros mismos, la Tierra, desde la ventana de una pequeña cápsula de la misión Apolo 8 que tuvo la osadía de asomarse desde el lado oscuro de la Luna en las navidades de 1968 para atisbar la enorme y extrañamente familiar esfera azul de nuestro propio planeta. Robots, palabra inexistente hasta entrado el siglo veinte, emprendieron rumbos a mundos distantes para enviarnos imágenes que podrían haber sido de ciencia-ficción pero que ahora son parte de nuestra realidad cotidiana. El hombre puso sus pies en la Luna y la mira está puesta desde ya en el siguiente gran paso sobre la superficie de Marte.

El aprendizaje ha sido monumental durante muchas décadas, sobre lo que está fuera de la zona de la influencia gravitacional de la Tierra, como de lo que somos los seres humanos, aquí y en el *vuelo* por insondables espacios inhóspitos a nuestra naturaleza. De no saber qué podría pasar a los cuerpos de Gagarin, Shepard y Glenn durante cortos trayectos por la negra espacial en los años sesenta, hasta entender lo que ocurre a la fisiología de quienes, como hoy, han vivido durante prácticamente un año en la Estación Espacial Internacional y que nos resultan anónimos por la costumbre de saber que alguien, aunque no importe ya quién, está siempre allá arriba, recorriendo la circunferencia terrestre, produciendo información sobre nosotros, sobre el espacio y sobre sí mismo. Para ello, la tecnología desarrollada superó la ciencia-ficción y ha contribuido a construir un mundo insospechado aún por el propio Verne.

La exploración espacial se convirtió en un catalizador de inventos y de descubrimientos, y la ciencia médica al servicio de esta exploración en un elemento fundamental para dar certeza de sobrevivencia a los, todavía hoy, pioneros de esta exploración que han debido adaptarse a ambientes incógnitos; y en un ariete de investigación para entender la naturaleza de los fenómenos de adaptación de los cuerpos humanos a ecosistemas ajenos. Esta es, pues, la materia de la medicina espacial, una especialidad que ha debido forjar su propio nicho profesional como punto de convergencia de muchas otras especialidades que al confluir son ya más que la suma de todas.

Este libro, impulsado desde la Academia Nacional de Medicina de México, es una de las consecuencias del fortalecimiento de la relación de nuestra Corporación y la Agencia Espacial



Mexicana durante el periodo en el que tuve el honor de presidirla, y del entusiasmo del Dr. Raúl Carrillo Esper, distinguido académico, que tomó en sus manos la conducción de este fructífero encuentro. Su contenido da cuenta de este innovador espacio intelectual y profesional a través de tres secciones: Medicina y Ciencias Espaciales, Adaptación Fisiológica en el Espacio, y Escenarios Especiales de la Medicina Espacial. En la primera sección se hace un recorrido por temas tan diversos como la historia de esta especialidad, su definición, el cosmos, el monitoreo espacial del clima, la tecnología de la información, la telemedicina y la medicina satelital, la bioseguridad en el espacio, o el hombre cósmico, hasta la descripción del proceso de selección y entrenamiento de astronautas, el diseño de trajes espaciales y las aportaciones de la tecnología médica espacial a la salud humana, y por supuesto, una descripción del programa de medicina espacial en México.

En la segunda sección se hace un recorrido por los conocimientos de diversas especialidades que explican la adaptación fisiológica del cuerpo humano a condiciones de gravedad muy diferentes de aquellas que corresponden a su hábitat natural. Finalmente, resulta muy interesante asomarse a temas peculiares del mundo espacial y que imponen desafíos a lo que comúnmente ocurriría en la superficie terrestre. Por ejemplo, entender que la reanimación cardiopulmonar no puede ser realizada en las condiciones que aquí se conocen, o los efectos de la radiación espacial, o el comportamiento de las infecciones, diversos eventos médicos, anestesia, perfil psicológico de los astronautas, odontología, o adaptaciones hematológicas a la microgravedad.

Han transcurrido ya muchas décadas desde los primeros vuelos de prueba a velocidades supersónicas en los años cincuenta del siglo pasado hasta lo que hoy estamos viviendo. No obstante, la civilización humana aún da apenas los primeros pasos de lo que será todavía más asombroso en los años por venir. La medicina espacial empieza también un recorrido que sin duda será deslumbrante por su capacidad de hacer sobrevivir a los seres humanos en condiciones extremas: viajes a velocidades cercanas a las de la luz, durante tiempos que se contorsionen y se distorsionen, y a través de espacios difíciles de ser concebidos ahora para llegar a mundos de ciencia-ficción que tal vez serán para entonces la realidad de las mitologías del pasado. Así, lo que aquí se lea en tiempo presente será la historia de la navegación de la medicina hacia el futuro dentro y fuera de nuestro propio planeta.

**Enrique Ruelas Barajas**

Presidente

Academia Nacional de Medicina de México

(2012-2014)

# Prefacio

■ En muchos de los grandes retos del siglo XXI, el espacio juega un papel central: en las comunicaciones y la reducción de la brecha digital. La atención a desastres, el medio ambiente y el cambio climático, el estudio de los recursos naturales, la seguridad, las ciencias y tecnologías de la salud, la exploración del sistema solar y el universo, entre otros. El acceso y el uso del ambiente espacial provee oportunidades únicas para la creación de bienes y servicios útiles y redituables, tanto públicos como comerciales: esta capacidad de la humanidad ha estado presente por más de 50 años, ha evolucionado y se ha expandido con los avances tecnológicos de los programas de investigación y desarrollo espacial; en efecto, el espacio constituye una plataforma para una diversidad de actividades económicas, gubernamentales y científicas que no pueden ser replicadas en el medio terrestre, sobre todo englobadas en tres grandes actividades (comunicar, observar y navegar) tales como: las comunicaciones, posicionamiento y navegación vía satélite; el monitoreo de la Tierra en regiones amplias y en una base global; el uso del ambiente de microgravedad; la exploración robótica del universo; el transporte de personas y bienes hacia y desde el medio ambiente espacial, entre otras.

El gobierno de la República reconoce la relevancia de desarrollar el sector espacial en México, y lo ha incluido en el “Plan Nacional de Desarrollo” donde por primera vez en la historia se hace referencia directa a las tres grandes potencialidades del espacio a través de tres líneas de acción, mismas que se han reflejado también en el programa sectorial de la SCT y que han derivado en la versión actual del “Programa Nacional de Actividades Espaciales” el cual mediante cuatro grandes objetivos busca desarrollar la infraestructura espacial del país, desarrollar el sector espacial, fortalecer nuestras capacidades nacionales, todo ello mediante una intensa colaboración internacional para que mediante la ciencia y la tecnología espacial podamos atender las necesidades de la población mexicana y generar empleos de alto valor agregado, impulsando la innovación y el desarrollo del sector espacial, contribuyendo a la competitividad y al posicionamiento de México en la comunidad internacional, en el uso pacífico, eficaz y responsable del espacio; promoviendo que nuestro país cuente con infraestructura espacial soberana y sustentable de observación de la Tierra, navegación y comunicaciones satélites de banda ancha, que contribuya a mejorar la calidad de vida de la población y al crecimiento económico nacional. Así entonces, el Programa Nacional de Actividades Espaciales (PNAE) compromete la participación activa de la Agencia Espacial Mexicana para impulsar, coordinar y articular la consolidación y el fortalecimiento del sector espacial en México, posicionando a nuestro país en la economía del espacio.

Para ello la Agencia Espacial Mexicana esta siendo un actor importante para el acopio de los recursos existentes en las diferentes comunidades mexicanas trabajando en temas espaciales; así como procurar alianzas y asociaciones estratégicas con la comunidad espacial internacional,

tanto con los países de altos ingresos, como con los emergentes y de medianos y bajos ingresos. Todo ello tiene necesariamente una derrama en formación de capital humano. Además, en el camino de la búsqueda de soluciones a los retos espaciales, frecuentemente se generan tecnologías, métodos e innovaciones con impacto y derrama tanto social como comercial en otros sectores; esto ha quedado de manifiesto en programas espaciales de otros países, lo que ha impulsado desarrollos paralelos, propiciando actividades de alto valor agregado, creación de fuentes de empleo en mayor cantidad y mejor remuneradas, contribuyendo en general a una mayor competitividad del país.

En el contexto de las ciencias biológicas y la medicina espacial, la Agencia Espacial Mexicana las incluye en su objetivo estratégico de promover la construcción de capacidades y competencias estratégicas nacionales en el campo espacial, impulsando la educación, fortaleciendo la investigación y articulando a los diferentes actores en el desarrollo y la aplicación de ciencias y tecnologías espaciales; esto se ejecuta a través de la estrategia de fomentar la construcción de las capacidades nacionales para el desarrollo de investigación e innovación en ciencia espacial básica, con la línea de acción de apoyar y fortalecer las capacidades nacionales en materia de medicina espacial, astrobiología, experimentación biológica en ambiente de microgravedad, y desarrollo de aplicaciones espaciales para el sector salud.

Durante más de 50 años, la exploración y el uso del espacio por los países de altos ingresos les ha permitido crear una base estable para aplicaciones gubernamentales y comerciales; las actividades espaciales han mejorado su nivel de vida y seguridad, han contribuido a proteger la vida humana y el medio ambiente, han desarrollado notablemente las comunicaciones, han sido un motor del crecimiento económico y han revolucionado la manera como el individuo se posiciona en el mundo y en el cosmos. Por ello nuestro país está decidido a aprovechar plenamente al espacio como un importante habilitador del desarrollo socioeconómico: suministrando valiosa información a gobiernos y a tomadores de decisiones; impulsando la competitividad industrial, contribuyendo a la formación de capital humano, expandiendo el conocimiento científico, y coadyuvando a la construcción de una sociedad mexicana moderna cada vez más educada científica y tecnológicamente.

Estoy seguro que este libro contribuirá de manera importante al posicionamiento de la medicina espacial en el contexto de las disciplinas de la salud en el México moderno, como una de las primeras referencias en la temática, que presenta y reconoce los esfuerzos hasta ahora realizados en este campo, y que, asimismo, perfila su futuro como un gran habilitador de bienestar y de crecimiento científico y tecnológico para México.

**Francisco Javier Mendieta Jiménez**

Director General de la Agencia Espacial Mexicana

## Sección 1

1. Momentos estelares en la historia de la medicina espacial, 1
2. Inicios y avances de la medicina espacial en México, 11
3. El Cosmos, 19
4. Tecnología de la información aplicada a la medicina espacial, 39
5. Telemedicina y medicina satelital, 55
6. Perfil del hombre cósmico, 73
7. Astrobiología y medicina espacial, 87
8. Aportaciones de la tecnología espacial a la salud humana, 99
9. Dispositivo para la estabilización de la postura en microgravedad, 121

Image Number W7EB11091-2008 Credit: Image courtesy of NASA





# 1. Momentos estelares en la historia de la medicina espacial

Rolando Neri Vela

Desde que el ser humano apareció en la Tierra, es seguro que tuvo en mente la incógnita de las cosas que tuvieran que ver con el cielo y con la observación de las estrellas; cuando pasaron los siglos, debió haber un momento en que se interesó por viajar a través del espacio, de acortar distancias y tiempos.

Uno de los grandes genios de la humanidad fue Leonardo da Vinci, que vivió el Renacimiento y diseñó máquinas voladoras.

El 19 de septiembre de 1783 los hermanos Michel Joseph y Étienne Jacques de Montgolfier realizaron un experimento con su globo recién inventado (“Montgolfiera”) para describir si el hombre era capaz de soportar la ascensión a las capas altas de la atmósfera. Para ello, colocaron un carnero, un gallo y un pato en la barquilla del globo y realizaron con éxito el primer experimento de la medicina aeronáutica. Debido a su proeza, el rey condecoró a Étienne Jacques con la Orden de San Miguel. Entre sus invenciones destacan el ariete hidráulico, un calorímetro para determinar la calidad de las turbas, un ventilador para la destilación en frío, una prensa hidráulica, etc.

Michel Joseph Montgolfier escribió *Mémoires sur la machine aérostatique* (París, 1784), *Ballons aérostatiques* (Berna, 1784), *Notes sur le béliet hydraulique* (París, 1803) y algunas otras memorias aparecidas en *Journal des mines* y *Journal de l'École Polytechnique*.

Entre los escritos de ambos hermanos Montgolfier se encuentran *Discours sur l'aérostas* (1783) y *Les voyageurs aériens* (1784).

El 20 de agosto de 1783 la Academia de Ciencias de París nombró a los hermanos Montgolfier miembros correspondientes, otorgándoles, además, un premio de 600 libras. Luis XVI también le otorgó al padre de los Montgolfier cartas de nobleza.

A partir de esos resultados, Jean François Pilâtre de Rozier y François L. D'Arlandes efectuaron el 21 de noviembre de 1783 un viaje en globo por aproximadamente 25 minutos, que concluyó felizmente.

Pilâtre de Rozier fue un físico y aeronauta francés, quien nació en Metz el 30 de marzo de 1756, habiendo fallecido en Boulogne-sur-Mer el 15 de junio de 1785. Habiendo estudiado primero cirugía, después se colocó como practicante en una farmacia, para después trasladarse a París, en donde estudió matemáticas, física y química, pero como no tenía los recursos económicos necesarios, para hacerse de algún dinero repetía en el Marais los experimentos de Franklin sobre la electricidad ante un público cada vez más numeroso.

Al ser nombrado profesor de química en Reims, permaneció en esa ciudad durante medio año, enseñando esa ciencia, para después regresar a París, en donde fue nombrado intendente de los gabinetes de física y química del hermano del rey, en 1781. Al mismo tiempo abrió al pueblo un museo de química, cuyo laboratorio se hallaba provisto de diferentes aparatos y máquinas,

que puso a disposición de los sabios para sus investigaciones. En este laboratorio efectuó algunas experiencias acerca del gas del alumbrado.

El descubrimiento de los hermanos Montgolfier hizo que Pilâtre de Rozier abandonara sus estudios químicos para secundar a los hermanos en sus experimentos de aerostática, siendo el primero en elevarse por los aires dentro de la cesta de un globo, pues hasta entonces sólo se habían puesto en la canasta algunos animales.<sup>1</sup>

François Laurent d'Arlandes siguió la carrera militar, y siendo mayor de infantería realizó la primera ascensión en globo libre que hasta entonces se hubiera hecho, el 24 de noviembre de 1783, en los jardines del Chateau de la Muette, yendo a caer, sin incidente alguno, al otro lado de París, en la Butte aux Cailles.<sup>2</sup>

El 5 de junio de 1783 se lanzó por primera vez un globo de aire caliente sin tripulación. En un principio, el empleo de globos de hidrógeno permitió alcanzar alturas superiores y efectuar viajes de mayor duración. Así, el físico francés Jacques Alexandre César Charles realizó en París un viaje aéreo de más de dos horas, en el que recorrió una distancia de 43 kilómetros; sus globos de hidrógeno se conocieron más tarde con el nombre de "Charlier".

Charles fue un físico y matemático francés, quien después de haber estudiado en su juventud música, mecánica y pintura, fue inspector en el Ministerio de Hacienda. Más tarde los trabajos realizados por Benjamín Franklin lo inclinaron al estudio de la física; cuando en 1783 los hermanos Montgolfier hicieron sus primeros ensayos sobre la navegación aérea, dedicó algunas de sus conferencias a esos trabajos, perfeccionando el globo al sustituir el aire dilatado por el calor con el hidrógeno.

El primero de diciembre de 1783 se elevó en el Campo de Marte, en París, en el globo Charlière (lleno de hidrógeno), junto con Robert.

Poco después Charles inventó el hidrómetro termométrico y mejoró el heliostato de Gravesand, y además publicó varios trabajos en *Recueils de l'Académie des Sciences* y en el *Journal de Physique*.

Volviendo a Rozier, el 15 de octubre de 1783 se elevó por medio de un globo cautivo, y el 21 de noviembre volvió a efectuar el ensayo, esta vez en un globo libre, en presencia de toda la corte, acompañándole en este ascenso el marqués de Arlandes. El éxito de estas ascensiones le animó a repetir las al año siguiente en Lyon y en Versalles, proyectando entonces atravesar en globo el Canal de la Mancha, valiéndose para este fin de los experimentos combinados de los Montgolfier y de Charles, colocando un globo lleno de aire caliente debajo de otro lleno de hidrógeno. Con este doble aerostato, construido en Boulogne-sur-Mer a expensas del ministro de Calonne, se elevó el 15 de junio de 1785, junto con el físico Pierre Romain, pero el ensayo fue fatal para ambos aeronautas, pues a unos 400 m de altura se incendió la aeronave y sus ocupantes fueron lanzados de aquella elevación, pereciendo en la catástrofe.<sup>3</sup>

Pilâtre de Rozier publicó, acerca de su primera ascensión, *Première expérience de la Montgolfière* (París, 1784) y en el *Journal de Physique* insertó varias Memorias sobre cuestiones de física y química.<sup>4</sup>

Zambecari, un conde italiano, desarrolló entre 1804 y 1812 una técnica relativamente segura para dirigir un globo, pero en uno de sus intentos de vuelo por el mar Adriático sufrió síntomas de congelación. Así narró su viaje:

<sup>1</sup> Enciclopedia Universal Ilustrada Europeo Americana, tomo 44. Hijos de J. Espasa, editores. Barcelona, 1930, p. 891.

<sup>2</sup> Ídem, p. 237.

<sup>3</sup> Ídem, p. 891-892.

<sup>4</sup> Ídem, p. 892.

<sup>5</sup> Schott, Heinz, director. Crónica de la medicina, 4ª. edición mexicana. Intersistemas Editores. México, 2008, p. 239.

<sup>6</sup> Ídem, p. 304.

*El frío insoportable que dominaba en la región en que nos encontrábamos, la extenuación que teníamos debido a la falta de ingestión durante 23 horas, la aflicción que se apoderó de mi alma, todo ello unido me provocó una pérdida absoluta de la consciencia [sic] y caí sobre el suelo de la barquilla en un estado de letargo.*

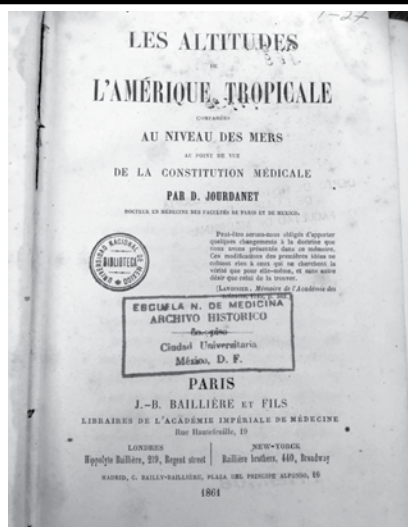
Los viajes en globo realizados a finales del siglo XVIII supusieron una innovación importante en la historia de la tecnología; sin embargo, las alteraciones fisiológicas que se producen a gran altura ya se habían constatado desde antes.

En 1590 el jesuita José de Acosta había descrito la sintomatología padecida por los soldados españoles en el monte Pariacaca: “Estoy convencido de que el elemento aire en este lugar está tan enrarecido y es tan tenue, que la respiración humana ya no es posible”.<sup>5</sup>

En 1735 el geógrafo y matemático Antonio Ulloa describió en Perú el cuadro clínico de la hipoxia: cansancio, vértigo, lipotimia, disnea y pirexia.

El 5 de septiembre de 1862 el meteorólogo británico James Glaisher, que había realizado una serie de vuelos en globo de carácter científico con el aeronauta Henry Coxwell, bajo los auspicios de la *British Association for the Advancement of Science*, redactó el primer informe detallado sobre los síntomas del mal de altura; en relación con un vuelo en el que alcanzaron los 7 000 metros de altura, Glaisher informó que había creído asfixiarse y no poder realizar ningún experimento, y que llegaría la muerte si no descendían rápidamente; había experimentado un desmayo de unos 5 minutos, sin consecuencias posteriores.<sup>6</sup>

En 1861 Denis Jourdanet publicó su trabajo *Les altitudes de l’Amérique Tropicale comparées au niveau des mers au point de vue de la constitution médicale* (Figura 1.1). Jourdanet era doctor en medicina de las facultades de París y de México.



**Figura 1.1.** Imagen de la portadilla del trabajo publicado por Denis Jourdanet en París (J.B. Bailliere et fils, 1861).



*Les altitudes de l'Amérique Tropicale...* apareció en París, editado por J. Baillièrre et fils, y marcó un hito en la historia de la fisiología de la respiración. En él aparecieron estudios acerca de la patología a nivel del mar, el miasma palúdico, la respiración en los países cálidos, la fiebre amarilla, el tifo, la neumonía, entre otros tópicos más.

Recordemos que aunque desde el decenio de los veintes y treintas del siglo XIX ya se empezaba a hablar del origen microbiano de las enfermedades, no fue sino hasta los estudios de Louis Pasteur, hechos entre 1861 y 1864, que la teoría microbiana de la enfermedad desplazó a la teoría miasmática, por lo que en el texto de Jourdanet aún se habla de la segunda.

En México el principal promotor del estudio de la fisiología de las alturas fue Daniel Vergara-Lope Escobar (1865-1938), un médico muy reconocido, quien desde sus años de estudiante en la Escuela Nacional de Medicina solía frecuentar el Instituto Médico Nacional, institución cuya vida a pesar de ser efímera (1888-1915) dio frutos de gran valía para la ciencia nacional e internacional.

Persona cuya vida se ha prestado a controversias fue Hubertus Strughold, quien nació en Westtünnen bei Hamm, Westfalia, el 15 de junio de 1902, y que estudió en las universidades de Münster, Göttingen, Munich y Würzburg; se doctoró en 1922.

Se suele relacionar a Strughold con la *Operación Paperclip*, realizada por el Servicio de Inteligencia Militar de Estados Unidos, sin el conocimiento del Departamento de Estado. En 1949 fue nombrado director del Departamento de Medicina Espacial en la School of Aviation Medicine, en la base Randolph, de Texas, llegándose a conocer como el “padre de la medicina espacial”, pues además, él había acuñado este término en 1948.

Strughold intervino en forma activa en el desarrollo del traje de presión usado por los primeros astronautas estadounidenses.

Más tarde se descubrió que él o sus allegados habían llevado a cabo experimentos con humanos en el campo de concentración de Dachau, que consistieron en someter a los prisioneros a fuertes cambios de presión, a la falta de oxígeno, a beber agua de mar, a cambios bruscos de temperatura, a medir su resistencia al hielo, a sumergirlos en agua, etc., a consecuencia de lo cual fallecían.

En 1993 su imagen fue borrada del mural denominado The World History of Medicine, de la Universidad del estado de Ohio, quitándose también su nombre de la Biblioteca de Medicina Espacial de Randolph.<sup>7</sup>

En el desarrollo de la investigación espacial tiene un papel importante la figura de Yuri Gagarin, quien el 12 de abril de 1961 se convirtió en el primer ser humano en volar en el espacio durante una hora y 48 minutos, en una misión que orbitó la Tierra. El 5 de mayo de ese mismo año Alan B. Shepard despegó de Cabo Cañaveral en el cohete Mercury Redstone 3, convirtiéndose en el primer astronauta de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) en volar en el espacio. Estas misiones abrieron una gran posibilidad para realizar nuevos estudios acerca del comportamiento del hombre en el espacio.

La primera década de la exploración del espacio por el ser humano buscó determinar si el hombre podía vivir y trabajar con seguridad en el mismo. Ese decenio cerró con la misión Apolo 11, cuando el mundo entero observó el 20 de julio de 1969 cómo Neil Armstrong y Buzz Aldrin se convertían en los primeros hombres en caminar en la superficie lunar.

En 1970, el 19 de junio, tras un vuelo de casi 18 días de duración, aterrizaba la nave espacial *Soyuz 9* en las cercanías de Karaganda. El programa de los astronautas consistía en comprobar cómo actúa la ingravidez a largo plazo sobre los seres humanos.

<sup>7</sup> <http://jewishcurrents.org/wp-content/uploads/2010/02/Hubertus-Strughold.pdf>

Cinco días después de finalizado el vuelo, los astronautas mostraron signos de inestabilidad en el sistema cardiovascular; entonces se dijo que la “enfermedad espacial” era el efecto de la ingravidez prolongada a la que estaban expuestos los viajeros del espacio, pues se producía un trastorno del sentido del equilibrio (cinetosis), lo que provocaba alteraciones en otros sistemas orgánicos.

La medicina espacial se enfrentaba a la problemática de la ingravidez, la influencia de la radiación cósmica (radiobiología espacial), y sobre todo, las funciones del mantenimiento de la vida bajo las condiciones del vuelo (atmósfera, temperatura, humedad, alimentación, higiene en la cabina), así como la sobrecarga psicológica de los viajeros, pues son especialmente importantes los sistemas de control telemétrico con pequeños transmisores con los que puede registrarse y almacenarse los datos en la Tierra, registrándose y evaluándose el ECG, las vibraciones superficiales en el tórax, la frecuencia respiratoria, la conducción de las ondas de pulso en distintos lugares del cuerpo, la estructura de la voz y el sonido del habla así como la observación visual a través de cámaras de televisión.

El segundo decenio de la exploración espacial evaluó la adaptación y el desempeño en las misiones de larga duración, viviendo los astronautas de la NASA en la Skylab Space Station.

Las alteraciones óseas y la pérdida de masa muscular fueron aspectos notados en los astronautas después de los viajes de larga duración, a pesar del programa de ejercicios durante la órbita. Un equipo de baja presión negativa en el cuerpo fue usado por primera ocasión para determinar la respuesta cardiovascular a un estrés ortostático simulado en la órbita. Fueron obtenidos los índices acostumbrados de deficiencia cardiovascular reducida.

Los cambios fisiológicos asociados con la adaptación a la microgravedad sugirieron la necesidad de más investigaciones para desarrollar contramedidas para mitigar las potenciales alteraciones fisiológicas deletéreas observadas en órbita o después del aterrizaje.

El tercer decenio en la investigación espacial correspondió a la utilización de los transbordadores, trayendo consigo el entendimiento de las capacidades humanas en el espacio y el uso de la ausencia de gravedad como una variable científica importante para ayudarnos a comprender el papel que desempeña la gravedad en los procesos biológicos y físicos sobre la Tierra.

La medicina espacial como ciencia se inició por primera vez con motivo del viaje experimental que llevó a cabo la perra *Laika* a bordo de la nave Sputnik II, en 1957, y el primer médico que realizó un viaje espacial fue Boris B. Jegorow (nacido en 1937) el 12 de octubre de 1964.<sup>8</sup>

Las investigaciones espaciales han dado muy buenos resultados; la National Aeronautics and Space Administration ha dado a conocer, entre otras noticias más, numerosos tipos de calzado para atletismo, con plantillas desarrolladas a partir de las botas utilizadas en las bases lunares, los purificadores de agua, que permiten tratar la misma sin utilizar productos químicos, etc.

Con la Estación Espacial Internacional los clínicos han comprendido cómo optimizar la salud y el comportamiento de los astronautas trabajando por periodos prolongados de microgravedad así como el conocimiento científico en muchas áreas de vida fundamental.<sup>9</sup>

Una de las ramas de la medicina que ha tenido un gran desarrollo ha sido la cardiología espacial, principalmente a raíz de los estudios de Vasili Vasilievich Parin.

Esta nueva área de la medicina espacial ha sido claramente definida por Parin, Baevsky y Gazenko en el artículo “The heart and blood circulation in space”, publicado en 1965 en *Cor et vasa*, y en el mismo año la revista *Cardiology* presentó su trabajo *Achievements and success in space cardiology*. En estos trabajos se demostró que es el sistema nervioso vegetativo el que juega un papel principal en la adaptación en condiciones de ingravidez.

<sup>8</sup> Ídem, p. 546.

<sup>9</sup> Williams, David R. A historical overview of space medicine. MJM. 2001;6:62-5.

En el *18th International Astronautic Federation Congress*, en 1967, Parin y sus colaboradores presentaron su investigación “Heart rate rhythm as indicator of state of neuroendocrine regulation of organism in space flight environment”.

El análisis de la tasa de variabilidad del corazón durante los vuelos espaciales fue una de las aportaciones científicas y técnicas importantes en la medicina espacial de los años 60 del siglo xx.

Nuestros conceptos de la adaptación humana a las condiciones de ingravidez han ido cambiando considerablemente después de los estudios de Parin. En los años 80, la cardiología espacial tomó nuevos impulsos al desarrollar nuevos métodos de investigación del sistema circulatorio sanguíneo en el espacio. La grabación de un ECG durante 24 horas, conocido en la actualidad como *Holter* fue realizado durante un vuelo espacial de larga duración.

Atención particular pudiera darse al método de la balistocardiografía, que es capaz de examinar la función contráctil del corazón por la captura de los micromovimientos del pulso del cuerpo humano. Este fue uno de los métodos favoritos de Parin, pues fue pionero en su desarrollo y aplicación a mediados de los 50 en Rusia.

Los 90 fueron caracterizados por una intensa cooperación internacional en la cardiología espacial. Un proyecto de colaboración en medicina espacial con Austria es mencionado en la historia de la medicina, cuando los experimentos *Pulstrans and Night* fueron realizados a bordo de la estación espacial *MIR*. El experimento *Pulstrans* fue hecho para estudiar las respuestas vasculares bajo condiciones de ingravidez.

En los inicios del siglo xxi, la investigación cardiaca dio como resultado misiones espaciales de más larga duración a bordo de la estación espacial *Mir*.

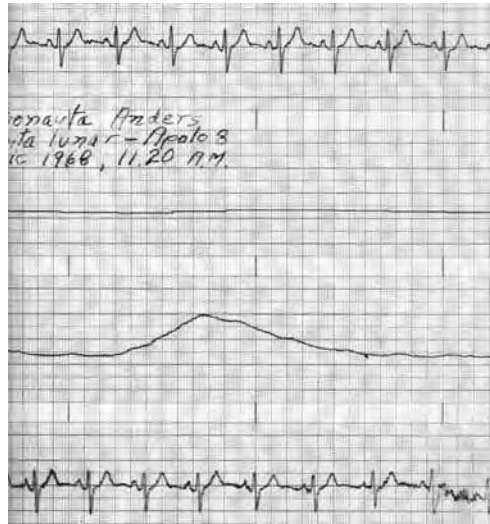
Una nueva fase en los estudios de las reacciones de adaptación del sistema circulatorio comenzó con el inicio de la operación de la Estación Espacial Internacional. El énfasis se centró en la evaluación individual del grado de tensión del sistema regulatorio y las reservas funcionales del organismo. Desde 2003 el experimento científico *Pulse*, el alcance del cual incluye la grabación del ECG, fotopleitismogramas digitales y tasas respiratorias, han sido dirigidos en la Estación Espacial Internacional.

La expansión y la extensión adicionales de dicho experimento fueron emprendidas en colaboración con expertos alemanes. El nuevo equipo *Pnevnomokard* fue desarrollado y diseñado con su participación para lograr un cardiograma de impedancia y un seismocardiograma. Desde 2007 el experimento científico *Pnevnomokard* ha sido realizado mensualmente a bordo de la Estación Espacial Internacional, cubriendo pruebas funcionales con tasas respiratorias fijas, con la técnica de inspiración y espiración, con una prueba ortostática activa antes de la misión espacial y después de ella.

Una nueva línea de investigación en la cardiología espacial ha sido el estudio de la regulación vegetativa de la circulación sanguínea durante el sueño nocturno basado en registros fisiológicos. Derivado de esto, el equipo *Sonocard* es capaz de gravar la calidad del sueño de los astronautas que es de gran importancia para el monitoreo y el control de los estados funcionales de los individuos de la tripulación, especialmente cuando han manejado actividades de mucho estrés, por ejemplo, las operaciones en el espacio exterior.

México también ha tenido personas que han impulsado la investigación en medicina espacial, como el doctor Ramiro Iglesias Leal, quien fue fundador de la Asociación Mexicana de Medicina Aeroespacial, y el primer ser humano en recibir e interpretar un electrocardiograma enviado desde una nave espacial, el del astronauta Anders, tripulante del *Apolo VIII*, en diciembre de 1968<sup>10</sup> (Figura 1.2).

<sup>10</sup> Iglesias Leal, Ramiro. La ruta hacia el hombre cósmico. IPN-Editorial Limusa. Grupo Noriega Editores. México, 2009, lámina 4.



**Figura 1.2.**  
Imagen del electrocardiograma tomado en nave espacial, en diciembre de 1968.

Las molestias corporales presentadas durante los vuelos espaciales han sido variadas, y aunque la mayor parte de estos problemas han sido resueltos con los recursos disponibles a bordo, otras fueron graves, como los casos de la tripulación del Salyut 5 (Volynov y Zolobov), quienes después de 49 días en órbita, el 6 de julio de 1976, tuvieron que ser regresados por cefalea intratable; los cosmonautas del Salyut 7, después de 65 días de vuelo, el 17 de septiembre de 1985, interrumpieron la misión debido a una complicación de prostatitis sufrida por Vasyutin; el día 6 de febrero de 1987 fue traído a la Tierra el cosmonauta Leveikin, quien había pasado 174 días en la estación MIR, debido a una arritmia cardíaca (taquicardia supraventricular) imposible de corregir con los procedimientos habituales. También se dio el caso del astronauta James Irwin, del Apolo 15, quien en julio de 1971 y en plena actividad sobre la superficie lunar, presentó bigeminismo ventricular sostenido que fue atribuido a un déficit de potasio en la sangre y también a la fatiga; no ameritó la suspensión de la misión, pero este trastorno del ritmo cardíaco pudo haber sido el preámbulo de un problema grave, pues Irwin falleció 22 años después por infarto de miocardio.<sup>11</sup>

Los accidentes a bordo durante los numerosos viajes espaciales han sido de poca importancia, pero se han registrado cuatro muertes, dos de ellos en el programa espacial ruso, el primero cuando la nave Soyuz 1, al descender el 23 de abril de 1967, perdió la presión interior, pereciendo el cosmonauta Komarov; el segundo ocurrió al regreso de la astronave Soyuz 11, el 6 de junio de 1971, también por pérdida de la presión atmosférica interior, que costó la vida a los cosmonautas Dobrovolsky, Volkov y Patsayev. El tercer accidente trágico tuvo lugar en el Centro Espacial Kennedy el 28 de enero de 1986, cuando 73 segundos después del despegue el transbordador Challenger explotó, muriendo instantáneamente los astronautas Scobee, Smith, McNair, Onizuka, Resnik, Jarvis y McAuliffe.

<sup>11</sup> Ídem, p. 163.

En enero de 2003 el transbordador Columbia estalló y se desintegró con siete tripulantes a bordo, cuando regresaban a la Tierra al término de una misión de 16 días. Las víctimas de este accidente fueron los astronautas Husban, McCool, Anderson, Brown, Chawala, Clarck y Ramon.<sup>12</sup>

En cada misión espacial la medicina ha mostrado grandes adelantos. La telemetría aplicada a la medicina ha rendido beneficios en el análisis de la locomoción de los minusválidos, en el estudio del movimiento muscular; estos sistemas de telemetría graban las señales recibidas de los sensores musculares e indican dónde pueden existir vestigios de locomoción. También se han desarrollado marcapasos mejorados y monitores de la actividad cardiaca.<sup>13</sup>

La telemedicina actual se apoya en sistemas de barrido lento que nos muestran en pequeños monitores de rayos catódicos y de plasma el estado general del paciente y permiten obtener a larga distancia estudios radiológicos de todo el cuerpo.

También se han desarrollado medicamentos, mayor seguridad en los asientos diseñados para pasajeros de aviones, automóviles y vehículos en general, cubiertas protectoras y pinturas para puentes, edificios y estructuras sujetas a corrosión, lubricantes que trabajan a muy altas temperaturas, etc.

En 1985, en la misión 61-B se llevaron a cabo experimentos con electropuntura, con el propósito de reducir las tensiones y náuseas en los viajeros espaciales y de restablecer el sentido del equilibrio mediante la aplicación de estímulos eléctricos en puntos de electropuntura previamente definidos. La importancia de este ensayo fue el proporcionar un método alternativo para restablecer las condiciones normales del ser humano en el espacio exterior, sujeto a la microgravedad por periodos prolongados.<sup>14</sup>

La investigación médico-espacial es sumamente cara; en este año 2016 los investigadores de la University of Texas Southwestern Medical Center han sido galardonados con un fondo de tres y medio millones de dólares estadounidenses para estudiar cómo la radiación espacial afecta el riesgo de cáncer en los astronautas que tomen parte en las misiones a Marte.

El doctor Sandeep Burma, quien es experto en radiología oncológica examinará el incremento en el riesgo de padecer glioblastoma, y el doctor Jerry Shay, profesor de Biología celular estudiará si una droga conocida como CDDO (bardoxolone), administrada antes de la exposición a la radiación, reduce el riesgo de padecer cánceres de pulmón y de colon.<sup>15</sup>

En un artículo periodístico aparecido hace poco, se habla del astronauta Scott Kelly, en el que algunos de los cambios más notables es la pérdida de masa muscular y la “inflamación” de los globos oculares. A Kelly se le harán estudios durante los próximos años para detectar cambios a corto, mediano y largo plazos. Durante una hipotética misión a Marte, los astronautas tendrían que enfrentar tres niveles de gravedad, y durante el viaje interplanetario de seis meses experimentarían la ingravedad. Al llegar a la superficie del planeta se enfrentarían a un tercio de la gravedad que experimentan en la Tierra, y a su regreso su organismo se tendría que volver a adaptar a la gravedad en la que nacieron.

Las transiciones entre campos de gravedad afectan la orientación, la coordinación, el equilibrio y la locomoción. Según el artículo del diario en cuestión “los reportes de la NASA basados en las experiencias previas de sus astronautas reportan que sin gravedad los huesos pierden densidad en alrededor de 1% por mes, y 1.5% en el caso de las mujeres, lo que en la Tierra tardarían en perder durante un año”. Y agrega que “considerando que un viaje a Marte podría durar un total de tres años, incluso después de regresar a la Tierra, la pérdida de hueso no podría corregirse ni mediante rehabilitación, acrecentando además el riesgo de fracturas relacionadas con la osteoporosis a medida de que envejeczan”.

---

<sup>12</sup> *Ibíd*em

<sup>13</sup> Resultados de los experimentos realizados en el espacio Misión 61-B. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México, 1987, p. 8.

<sup>14</sup> *Ídem*, p. 42.

<sup>15</sup> UTSouthwestern Medical Center News, Jan. 12, 2016.

Adicionado en la información, se señala en el artículo que Scott Kelly, junto con su gemelo Mark, están involucrados en la investigación de la respuesta inmune al analizar los efectos de la vacuna de la gripe estacional, aplicada tanto en tierra firme como en el espacio.<sup>16</sup>

Las investigaciones en medicina espacial continúan a paso acelerado; un proyecto de la NASA, el *Vision Impairment and Intracranial Pressure* se ha iniciado después de que la misma NASA documentó que sus astronautas regresaban del espacio con problemas visuales, y que estos dilemas pueden durar años. De acuerdo con la NASA, los problemas visuales varían desde cambios hipermetrópicos y pliegues coroides hasta aplanamientos del globo ocular y papiledema.<sup>17</sup> Estas y otras incógnitas mantienen alerta a los médicos y a los investigadores, pues las dudas y las soluciones a ellas afloran a cada momento, y el intelecto humano no deja de trabajar.

---

<sup>16</sup> González Durand, Berenice. Diario de un astronauta. *El Universal*. Lunes 14 de marzo de 2016, p. E14.

<sup>17</sup> *Ophthalmology Times*, May 1, 2016.



## 2. Inicios y avances de la medicina espacial en México

Raúl Carrillo Esper, Juan Alberto Díaz Ponce Medrano, Lucio Padrón SanJuan

Desde los inicios de la humanidad el hombre se ha sentido atraído por las estrellas, hecho que quedó plasmado en diferentes corrientes teológicas, en la literatura y en un gran número de manifestaciones derivadas del intelecto humano. El modelo conceptual inicial consideraba al hombre y a la Tierra como el centro del universo, pero posteriormente a la luz de la ciencia esto se modificó radicalmente al demostrarse que la Tierra, junto con otros planetas, giran alrededor del sol y que nuestro sol es sólo una pequeña estrella de los millones que existen en nuestra galaxia y en el universo, originadas todas en una gran explosión conocida como el “*big-bang*”, evento que se desarrolló a partir de una singularidad espacio-temporal hace aproximadamente catorce mil millones de años. Todo se derivó de esta gran explosión, que dio origen a un gran número de partículas elementales que a una gran temperatura se unieron en torno al bosón de Higgs para dar origen a los elementos primigenios como el hidrógeno y el helio, que conforme colisionaron entre sí durante la expansión inicial del universo dieron como resultado elementos más pesados como el carbono, el oxígeno y todos los que integran la tabla periódica de los elementos.

Con el avance de la ciencia y la tecnología el hombre se fijó como uno de sus tantos objetivos poder viajar al espacio y colonizar otros mundos. En un inicio esto cayó en territorio de la ciencia-ficción. Julio Verne en su novela *De la Tierra a la Luna*, narra las aventuras de unos intrépidos astronautas que viajan a la Luna en trajes de paisano y sin la menor preparación y equipamiento, excepto por unas sombrillas que portaban, y que para su sorpresa es habitada por unos seres a los que llaman “selenitas”. La novela es llevada magistralmente a la pantalla en 1902 por el cineasta francés Georges Méliès. “*Le voyage dans la lune*” antecede a lo que sucedió 63 años después en condiciones muy diferentes a la de sus personajes, la llegada del hombre a la luna. Neil Armstrong posa su pie en nuestro satélite el 21 de julio de 1969 y dice sus ya famosas palabras “es un pequeño paso para el hombre, pero un gran salto para la humanidad”.

Los viajes espaciales son resultado de la conjunción de la ciencia con la tecnología, su objetivo, vencer la gravedad terrestre, salir de la atmósfera, orbitar la tierra, viajar en el espacio, llegar a otros planetas y poder llevar a un ser humano fuera de la Tierra, pero en especial hacerlo regresar sano y salvo. La medicina y sus ciencias afines son y han sido parte esencial del proyecto espacial.

La medicina espacial se define como la ciencia médica que estudia los efectos biológicos, fisiológicos y psicológicos de la microgravedad y los vuelos espaciales, tiene sus orígenes en la medicina aeronáutica o de aviación, pero al paso del tiempo y con la explosión del conocimiento científico y tecnológico se ha convertido en una especialidad independiente de la medicina y en estrecha interrelación con diferentes especialidades médicas, psicología, nutrición y otras actividades científicas como la astrobiología, telemedicina y biotecnología, entre otras.

La medicina espacial, con base en un bien planeado y financiado programa de investigación y desarrollo, ha alcanzado grandes logros en el conocimiento de la fisiopatología y enferme-



dades que condiciona la microgravedad, los mecanismos adaptativos y los riesgos que corren los astronautas no sólo durante los viajes orbitales, sino también en viajes de gran distancia en el espacio y en la futura colonización de otros planetas, en especial Marte.<sup>1</sup>

El resultado final de la investigación biotecnológica y en salud en materia de medicina espacial no sólo ha impactado en el desarrollo de los viajes espaciales y en el bienestar de un puñado de seres humanos que tienen la oportunidad de tripular las naves, sino que también ha tenido un impacto directo en la salud de la humanidad y en su comodidad tecnológica, baste mencionar como algunos ejemplos que el velcro, los pañales desechables, los brazos del robot quirúrgico que se ha consolidado como uno de los grandes avances de la tecnología quirúrgica, sistemas de potabilización y reciclado de agua, seguimiento satelital de enfermedades infecciosas transmitidas por vectores, telemedicina, desarrollo farmacológico y nutricional, entre otros, se derivan de la investigación biotecnológica y médica espacial. De esta manera la inversión en recursos e investigación tienen un retorno de beneficio global a favor de la salud humana.

El ser humano es resultado de miles de años de evolución adaptada a la gravedad terrestre. Los viajes espaciales imponen en la homeostasis una readaptación de la Gravedad-1 (G1) a la microgravedad imperante en las naves espaciales y en los mundos más cercanos a la Tierra en los que se harán los primeros intentos de colonización, en este caso la Luna y Marte. Además se deberá de prever la disponibilidad de agua, alimentos, manejo de residuos, protección contra radiación solar, urgencias médicas y deterioro orgánico y cognitivo, entre otros.<sup>2</sup>

La información derivada de los programas de investigación es enorme, pero se puede puntualizar en los siguientes:

- Nivel muscular y óseo, se presenta una acentuada atonía y atrofia muscular y disminución en la síntesis de proteínas constitutivas del músculo. Se ensancha el disco intervertebral por ganancia de agua lo que condiciona un incremento de la estatura de 5 a 7 cm, esto genera dolor bajo de espalda. Se presenta una rápida descalcificación, de aproximadamente 1% por mes, en fémur, pelvis y columna vertebral, lo que incrementa en riesgo de fracturas y desarrollo de cálculos renales
- A nivel cardiovascular se presenta una importante redistribución de líquidos al compartimento torácico y a sistema nervioso central que da el aspecto a los astronautas de una "pierna de pollo", se desarrolla un estado de disautonomía, atrofia cardíaca, alteraciones iónicas en los sistemas de células cardíacas y la conducción que predispone al fenómeno de T alternante e incrementa el riesgo de arritmias malignas y disminución en la densidad capilar, en especial en los músculos de las extremidades inferiores
- A nivel endocrino se presentan alteraciones del sistema renina-angiotensina-aldosterona, disminuye la síntesis de eritropoyetina y se incrementan los niveles de norepinefrina y hormona antidiurética
- La respuesta inmune se ve afectada por la radiación espacial, ya sea solar o cósmica, que no puede ser contenida del todo por la estructura de la nave, el estrés, la respuesta neuroendocrina, alteraciones del patrón de sueño y la exposición a los contaminantes propios del interior de la nave
- El ambiente de microgravedad impone a receptores de piel, músculo, articulaciones y sistema vestibular cambios que condicionan el síndrome de adaptación al espacio
- Estrés y disfunción cognitiva secundarios a vivir en un ambiente cerrado y estrecho, con ruido y vibración constante, luz artificial, privación de sueño y el sentimiento de soledad y aislamiento

Gracias a este conocimiento y desarrollo biotecnológico derivado ha sido posible que el ser humano haya podido dejar la superficie terrestre, sobrevivir en ambientes microgravitatorios, vivir, con todo lo que esto significa, en ambientes confinados y haya podido viajar a nuestro satélite, la Luna.<sup>3-7</sup>

Los astronautas son personas jóvenes, sanas y sometidas a un entrenamiento estricto, a pesar de lo cual pueden enfermar, sufrir accidentes o presentar colapso emocional durante estancias prolongadas en el espacio. Algunos de los problemas médicos más comunes que se presentan durante las misiones espaciales son trauma menor, infecciones, síndrome de adaptación espacial quemaduras, enfermedades respiratorias, gingivitis, cefalea, dolor bajo de espalda, mareos, fatiga, depresión inmunológica resultado de la exposición a radiación solar y cósmica, actividades espaciales extravehiculares, temperatura y humedad dentro de la cabina, procesos adaptativos a la microgravedad y confinamiento en un ambiente cerrado.<sup>8</sup>

Para disminuir riesgos secundarios a las alteraciones condicionadas por microgravedad se han desarrollado trajes y sistemas de ejercicio encaminados a mantener la eficiencia cardiovascular y osteomuscular, dietas especiales hipercalóricas que aseguren además una adecuada carga proteica, procesos encaminados a mantener la estabilidad psicológica y monitoreo en base de programas de telemedicina espacial, entre otros. En los viajes espaciales prolongados no es remoto que los astronautas se enfrenten a situaciones de paro cardíaco y arritmias letales, infecciones graves, disbarismo, trauma mayor, hemorragia y necesidad de procedimientos quirúrgicos. Para enfrentar estas situaciones se han desarrollado técnicas especiales de reanimación cardiopulmonar, manejo de la vía aérea y procedimientos quirúrgico-anestésicos en microgravedad, además de contar con un botiquín básico que contiene antibióticos, analgésicos, epinefrina, dexametasona, nitroglicerina, lidocaína, morfina, atropina, soluciones y hemoglobina artificial, entre otros, con el objetivo de manejar las situaciones de urgencia médica más frecuentes en un ambiente de microgravedad.

Desde el inicio del programa espacial, en cada una de las misiones la investigación y adelantos en medicina espacial han aportado mayor seguridad y tecnología médica. En el Proyecto Mercury se dotaba a los astronautas de un kit que consistía en vasoconstrictores y esteroides para el manejo del estado de choque y antivertiginosos para el manejo de la disfunción neurovestibular; en el proyecto Géminis se dieron grandes avances en el monitoreo a distancia de los astronautas y en telemedicina, durante el proyecto Apolo se dotó a los astronautas de un mejor equipamiento, sistema de monitoreo y un entrenamiento básico para la detección de los principales problemas relacionados con la estancia en microgravedad. A los transbordadores espaciales se les dotó de un mejor equipamiento médico y se desarrolló el Sistema Médico Orbital, el cual consistía en un entrenamiento formal a los astronautas para resolver problemas médicos y el equipamiento para poder estabilizar a un astronauta enfermo o herido y poderlo transportar con relativa seguridad de regreso a la Tierra, se mejora el sistema de monitoreo a distancia y se implementa la evaluación ultrasonográfica.

En la Estación Espacial Internacional los sistemas de alerta y seguridad clínica de los astronautas mejoró de manera significativa gracias a la experiencia obtenida en misiones previas y a las nuevas aportaciones derivadas de la investigación. El entrenamiento médico a los astronautas tiene mayor tiempo de duración e incluye, entre otras acciones, a las maniobras de RCP, esta preparación tiene como objetivo resolver los principales problemas médicos en confinamientos y estancias prolongadas en ambiente de microgravedad; el botiquín a bordo cuenta con 190 medicamentos.<sup>9-11</sup>

Hubertus Strughold fue un médico alemán. Nació en Westtuennen, Westfalia, en 1898. Estudio medicina y ciencias naturales en las universidades de Muenster, Goettingen, Munich y Wuerzburg. Su interés por la medicina aérea y luego la espacial se hizo patente desde los inicios de su actividad profesional al especializarse en fisiología, investigando, entre otras cosas, en los cambios fisiológicos que presentaban los pilotos. En 1936 fundó la "Zietschrift fur Luftfarhme-

dizin” (revista de Medicina de Aviación). En 1937 fue nombrado miembro honorario de la Asociación Aeroespacial de los Estados Unidos de América. En 1948 el doctor Strughold acuñó el término “Medicina Espacial”. Para 1949, planteó durante el simposio titulado “Consideraciones fisiológicas sobre la posibilidad de vida en condiciones extraterrestres”, la factibilidad no sólo de que el hombre viajara al espacio, sino que pudiese colonizar y habitar otros planetas. Veinte años después el primer hombre posa su pie en la Luna. El doctor Strughold fue el primer profesor de medicina espacial, como especialidad diferente de la medicina aeroespacial.<sup>12,13</sup>

En 1949 el coronel Harry G. Armstrong, comandante de la Escuela de Medicina de Aviación de los Estados Unidos de América, fundó el primer Departamento de Medicina Espacial en la historia de la medicina y el doctor Strughold fue el primer y único profesor de la materia, enfatizando en la interrelación entre la medicina espacial con la biomedicina, biología espacial, astrobiología y bioastronáutica. Centró sus actividades en la investigación sobre los cambios fisiológicos y del comportamiento que se pudiesen presentar en los vuelos extraatmosféricos y en el espacio. El doctor Strughold produjo 180 publicaciones científicas, pero una de las más relevantes titulada “*Where Does Space Begin?, Functional Concept of the Boundaries between the Atmosphere and Space*”, trata ampliamente sobre el potencial del ser humano para la exploración espacial.<sup>14</sup> Por todas sus contribuciones y a pesar de las controversias alrededor de su persona por su activa participación en el régimen nazi, el doctor Hubertus Strughold es considerado el “Padre de la Medicina Espacial”; murió el 25 de septiembre de 1986.

El doctor Ramiro Iglesias Leal nació en Santa Rosalía, municipio de Camargo, Tamaulipas, en 1925. Estudió medicina en la Universidad Nacional Autónoma de México graduándose en 1955, realizó su especialidad de cardiología en el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez y en los institutos de cardiología de Londres y París. Estudió medicina aeroespacial bajo la tutela de los doctores Charles Berry<sup>14</sup> y el ya citado Hubertus Strughold. El doctor Iglesias Leal dedicó su vida profesional a la cardiología pero en especial se destacó por su interés en la medicina aeroespacial. Fue el primer médico mexicano dedicado a esta interesante rama de la medicina. Su actividad profesional y académica y producción científica siempre giró alrededor de la medicina espacial. Es importante mencionar que durante su estancia en la NASA en 1968 recibió el primer electrocardiograma enviado desde el espacio durante la misión del Apolo VIII. De sus múltiples publicaciones destacan los libros intitolados *La ruta hacia el hombre cósmico* y *Cardiología aeroespacial*, los cuales han sido multipremiados. El doctor Iglesias ha enfatizado en diferentes foros sobre la importancia de la investigación aeroespacial y los beneficios que ha aportado a la humanidad. Para honrarlo como un tamaulipeco distinguido, el planetario de Ciudad Victoria, Tamaulipas, recibió el nombre de “Dr. Ramiro Iglesias Leal” en 1998. Por sus contribuciones y destacada actividad profesional el doctor Iglesias Leal es considerado el “Pionero y Padre de la Medicina Espacial en México”. Su incansable trabajo hizo posible que la medicina aeroespacial se posicionara en nuestro país, fundando una escuela a la que se han incluido un gran número de interesados en la materia cuyo resultado ha sido la formación de especialistas que se han distribuido en el territorio nacional.

En México existe un gran rezago en medicina espacial, entendida como una especialidad independiente de la medicina aeroespacial o aeronáutica, por lo que es necesario retomar el tema e iniciar un programa coordinado e incluyente encaminado no sólo a la preparación de médicos en esta disciplina, sino también fomentar la investigación en esta tan interesante área del conocimiento con el objetivo de mantener a nuestro país en el concierto científico internacional. En medicina espacial los retos son muchos, pero hay que iniciar con un pequeño paso para posteriormente dar el gran salto.

En el año 2010 se expide la Ley que crea a la Agencia Espacial Mexicana (AEM) iniciando operaciones en el 2011. Su misión es utilizar la ciencia y la tecnología espacial para atender

las necesidades de la población mexicana y generar empleos de alto valor agregado impulsando la innovación y el desarrollo del sector espacial para contribuir a la competitividad y al posicionamiento de México en la comunidad internacional, con el uso pacífico, eficaz y responsable del espacio. Su visión es contar con una infraestructura espacial soberana y sustentable de observación de la Tierra, navegación y comunicaciones satelitales de banda ancha, que contribuya a mejorar la calidad de vida de la población y al crecimiento económico de México. Como parte de sus múltiples actividades y encargos contempla el desarrollo de la medicina espacial. Con motivo del sesquicentenario de la fundación de la Academia Nacional de Medicina de México (ANMM), por iniciativa del doctor Enrique Ruelas Barajas, presidente en turno de la corporación y de los doctores Héctor Robledo Galván, Carlos Varela Rueda, Raúl Carrillo Esper y del Ing. José Antonio Cascajares se formalizó una alianza estratégica con la Agencia Espacial Mexicana para unir fuerzas y desarrollar un programa cuyo objetivo es estructurar, fortalecer, difundir la medicina espacial y estimular la generación de recursos humanos en esta importante e interesante área, dentro del marco normativo de la AEM y de la ANMM, sumando esfuerzos con otras iniciativas ya implementadas.

Desde que se inició el proyecto conjunto, AEM-ANMM, ha dado sus primeros frutos, destacando la convocatoria a diferentes instituciones, que ha resultado en la organización de foros de difusión, publicaciones científicas y en la organización del primer Congreso Nacional de Medicina Espacial, bajo el auspicio de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Es importante mencionar que se está estructurando la plataforma científica y tecnológica con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), para contar con la organización, normatividad y recursos para la formación de médicos e investigadores en la disciplina de medicina espacial.

El 2016 es un año muy especial e importante para el proyecto por tres acontecimientos de gran trascendencia. El 4 de mayo se llevó a cabo en el recinto de la Academia y como parte de sus sesiones semanales reglamentarias, la sesión de “Medicina Espacial”, en la que participó de manera conjunta la AEM y la Sociedad Mexicana de Medicina del Espacio y Microgravedad (SoMMEM), en ésta se trataron temas relacionados con la adaptación fisiológica a la microgravedad y las enfermedades más comunes que presentan los astronautas, además de que se trató lo relacionado con la política en materia de medicina espacial por el director de la AEM. Es importante mencionar que en los 150 años de historia de la corporación es la primera vez que se trata este tema, por lo que podemos considerarla como una sesión histórica. El 20 de mayo y teniendo como marco el auditorio Abraham Ayala González del Hospital General de México (HGM) se llevó a cabo el Tercer Foro de Medicina Espacial y Ciencias Afines. Esto fue posible gracias al interés del doctor César Athié Gutiérrez, director de la institución, por el proyecto y por este evento de gran trascendencia. De esta manera el HGM es la primera institución médica en donde se realiza un evento de este tipo, que lo posiciona a la vanguardia en esta rama de la medicina.

Finalmente, y como si se alinearan los astros, en septiembre se llevó a cabo el Congreso Mundial de Astronáutica en nuestro país, evento científico de impacto mundial. Durante el desarrollo de este evento internacional y gracias al apoyo de la AEM y de la Universidad Marista se organizó el segundo Congreso Mexicano de Medicina Espacial, en el que se presentó, en el marco del congreso mundial de astronáutica, el texto que tienen en sus manos, resultado del apoyo de la ANMM y del esfuerzo de todos los profesores que participaron como autores de capítulos. Es importante resaltar que este libro aparece como documento de postura de la Academia y en el que además de varias secciones relacionadas con la medicina espacial y ciencias afines se desarrolla la postura y política en materia de medicina espacial. Definitivamente, 2016 es un año muy especial.

La medicina espacial es fascinante y gracias a todos los médicos y científicos que se han dedicado a su desarrollo al paso de los años, desde su creación como una disciplina y especialidad de la medicina, ha hecho posible la permanencia del hombre en ambientes fuera de la superficie



**Figura 2.1.** Scott Kelly (*izquierda*) y Mikjhail Kornoenko (*derecha*) en la Estación Espacial Internacional. Los primeros seres humanos en permanecer 340 días confinados en una nave espacial en un ambiente de microgravedad.

terrestre. El logro más grande al momento, sin demeritar los viajes a la Luna, es la Estación Espacial Internacional (EEI), en la que las tripulaciones pasan varios meses en un ambiente de microgravedad. Recientemente dos astronautas, el estadounidense Scott Kelly y el ruso Mikjhail Kornoenko, completaron su estancia de 340 días en la EEI, hecho sin precedentes en la historia de la humanidad, resultado del éxito de la medicina y la tecnología y que da las bases para la preparación de viajes espaciales largos tripulados por seres humanos y la posibilidad de colonización de la Luna y el viaje a Marte (Figura 2.1).

El desarrollo de un programa de medicina espacial integral requiere de una infraestructura compleja que incluya una organización administrativa, financiera, científica y tecnológica, cuyos objetivos finales serían el desarrollo de los siguientes departamentos, cada uno de los cuales tendría funciones específicas:

- **Fisiología de vuelo:** estudiará algunas de las principales alteraciones durante los vuelos espaciales, como desempeño de la tripulación, sueño, efecto de la exposición continua al ruido, baromedicina y lo relacionado con sistemas biomédicos y de salud
- **Clínica de Medicina de vuelo:** encargada de incluir en sus investigaciones a la medicina espacial, medicina de aviación, oftalmología espacial, terapia ocupacional en vuelos y estancias espaciales prolongadas, programas de vacunación espaciales
- **Fisiología espacial:** que incluirá el estudio de programas de nutrición, metabolismo óseo, volumen intravascular, hemodinamia, biología molecular y celular, fisiología y adaptación muscular en microgravedad
- **Psicología espacial:** encargada de estudiar el comportamiento y convivencia del ser humano en confi-

namiento cerrado y estrecho por tiempo prolongado, la respuesta al estrés y los principales problemas psicológicos durante el viaje espacial. El comportamiento y adaptación al colonizar otros planetas. Y la readaptación a su regreso, en especial durante la reintegración del astronauta a la vida en la Tierra, posterior a una estancia espacial prolongada

- **Biología de la radiación:** área de gran importancia en especial por la intensa exposición de los astronautas a la radiación más allá de la protección de los anillos de Van-Allen. En ésta se integrarán la astrobiología, la biofísica, el biodiagnóstico, oncología y microbiología espacial y el desarrollo de sistemas de protección
- **Biología gravitacional:** se encargará de estudiar la adaptación y respuesta a diferentes sistemas con gravedad diferente a la terrestre
- **Nutrición espacial:** que incluirá en su programa de desarrollo no sólo la dieta y menú de los astronautas durante vuelos y estancias espaciales prolongadas, sino también su adecuación, aporte equilibrado de nutrientes (calorías, nitrógeno, grasas, oligoelementos y vitaminas), preservación y en especial el desarrollo de un programa de nutrición sustentable durante la colonización de otros planetas

El programa de medicina espacial mexicano va iniciando, el camino es largo, pero se están construyendo, consolidando y sentando las bases para su desarrollo integral, de tal manera que nuestro país participe activamente en este importante desarrollo científico y tecnológico. Con el trabajo conjunto y armonioso con un objetivo común entre la ANMM, la AEM y todas las iniciativas, instituciones y agrupaciones que se unan al proyecto, el futuro es promisorio.

## Referencias

1. Prisk GK. Microgravity. *Compr Physiol*. 2011;1:485-97.
2. Pietsch J, Bauer J, Egli M, Infanger M, Wise P, Ulbrich C, et al. The effects of weightlessness on human organism and mammalian cells. *Curr Mol Med*. 2011;11:350-64.
3. Stewart LH, Trunkey D, Rebagliatti SG. Emergency medicine in space. *J Emerg Med*. 2007;32:45-54.
4. Willey JS, Lloyd SA, Nelson GA, Bateman TA. Space radiation and bone loss. *Gravit Space Biol Bull*. 2011;25:14-21.
5. Liakopoulos U, Leivaditis K, Eleftheriadis T, Dombros N. The kidney in space. *Int Urol Nephrol*. 2012;44:1893-901.
6. Stein TP. Weight, muscle and bone loss during space flight: another perspective. *Eur J Appl Physiol*. 2013;2171-81.
7. Hughson RL. Recent findings in cardiovascular physiology with space travel. *Resp Physiol Neurobiol*. 2009;169:38-41.
8. Gontcharov IB, Kovachevich IV, Pool SL, Navinkov AL, Barratt MR. Short communication: medical care system for NASA-Mir spaceflights. *Aviat Space Environ Med*. 2002;73:1219-23.
9. Lerner DJ, Parmet AJ. Interventional radiology: the future of surgery in microgravity. *Aviat Space Environ Med*. 2013;84:1304-06.
10. Beck G. Emergency airway management in orbit: an evidence based review of possibilities. *Respir Care Clin N Am*. 2004;10:401-21.
11. Rehnberg L, Ashcroft A, Baers JH, Campos F, Cardoso RB, Velho R, et al. Three methods of manual external chest compressions during microgravity simulation. *Aviat Space Environ Med*. 2014; 85:687-93.
12. Armstrong H, Haber H, Strughold H. Aero medical problems of space travel, panel meeting, school of aviation medicine. *Aviat Space Environ Med*. 1949;19: 383-417.
13. Hoffer GW. Ode to history and celebration of Space Medicine: 50 years of visión from AsMa Space Medicine Branch. *Aero Medical Association*. *Aviat Space Environ Med*. 2001;72:156-7.
14. Berry C. Medicina de los astronautas (1974). En: Viesca-Treviño C (ed). *Las Conferencias Miguel Jiménez e Ignacio Chávez*. Colección de Aniversario 150 de la Academia Nacional de Medicina. Cd.Mx.: Intersistemas Editores; 2015: p. 114.



# 3. El Cosmos

Raúl Mújica García

## ■ Introducción: una imagen dice más que mil palabras

Seguramente hemos escuchado este dicho. Quizá su origen está en el hecho de que lo registrado con nuestros ojos deja mayor impresión que cualquier otra señal. Es más impresionante cuando nos damos cuenta de que lo que vemos es sólo una porción de la realidad, y no sólo a que tenemos límites de visión debido al decremento del brillo de los objetos que se encuentran a grandes distancias o al tamaño de éstos, cuando son muy pequeños su brillo es menor; nos referimos a tipos de luz que nuestros ojos no pueden detectar debido a que están limitados a percibir una porción muy pequeña del espectro electromagnético.

La luz es el principal medio por el cual podemos conocer la naturaleza de los objetos celestes, y no sólo la luz que llamamos visible, sino todas las “luces”, en las diferentes frecuencias del espectro electromagnético, la mayoría de las cuales no podemos observar con nuestros ojos, como los rayos X o el infrarrojo.

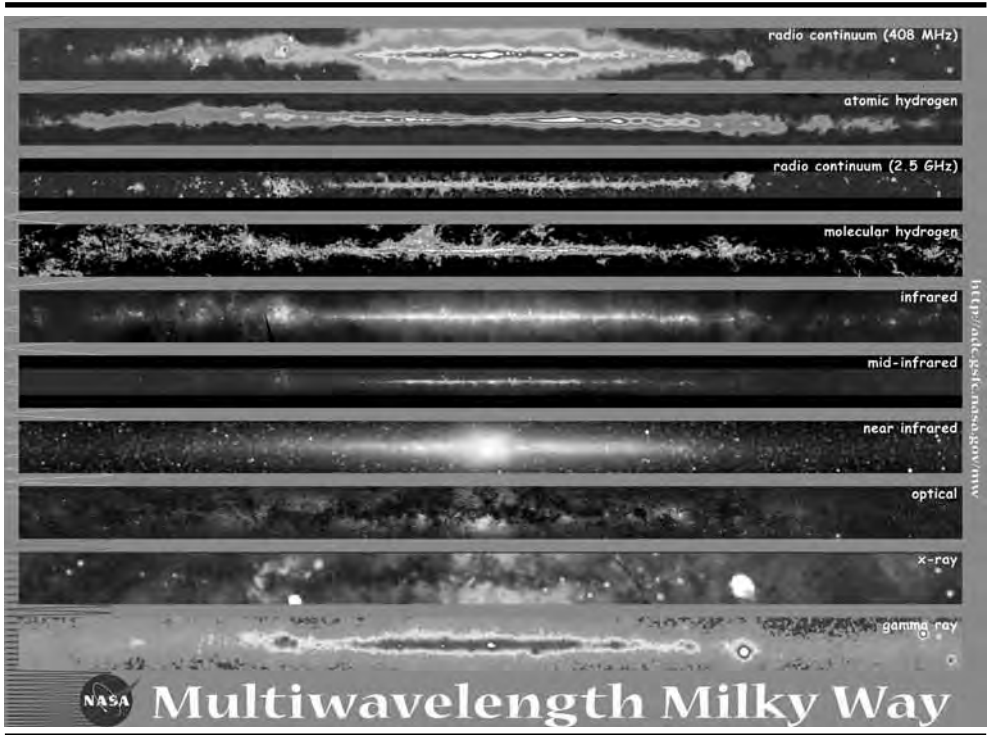
La luz es una onda electromagnética. Dividimos al espectro total de las ondas electromagnéticas en diferentes regiones, asignando bandas de frecuencias o de longitudes de onda. Tenemos las regiones de radio, microondas, infrarrojo (IR), luz visible (óptico), ultravioleta (UV), rayos X y rayos gamma. Las longitudes de onda mayores son para el radio (de hasta kilómetros), más cortas para la luz en el óptico (milésimas de milímetro) y mucho más cortas para rayos gamma (millonésimas de milímetro).

William Herschel descubrió la luz infrarroja. Heinrich Hertz generó y detectó ondas de radio en 1888, ondas predichas por James Clerk Maxwell un cuarto de siglo antes de que se detectaran. En 1895, Wilhelm Roentgen detectó un tipo de radiación desconocida, a la que llamó “X”, y que podía revelar detalles, incluso dentro del cuerpo humano, los huesos. Poco a poco se reconoció que mientras el IR y el radio estaban en un extremo del espectro electromagnético, más allá del rojo, los rayos X estaban al otro lado, más allá del UV.

Sin embargo, aunque varios de estos descubrimientos se aprovecharon en la física y otras ramas, no fueron de inmediato aprovechados por los astrónomos, principalmente porque, por infortunio en este caso, tenemos un gran filtro, la atmósfera, que no permite el paso de la mayor parte de la radiación, y por fortuna también, ya que el UV y la radiación más energética podrían haber inhibido el desarrollo de la vida en el planeta.

La opacidad atmosférica complica el estudio de la radiación con frecuencias fuera de la banda visible y del radio que proviene de los objetos celestes. Es necesario entonces, para observar otras regiones del espectro, con excepción de unas ventanas muy angostas en el IR, salir de la atmósfera, colocar telescopios con sus detectores en globos a gran altura, en cohetes sonda o en satélites artificiales (Figura 3.1).





**Figura 3.1.**  
Nuestra galaxia, la Vía Láctea, observada en diferentes frecuencias,

No sólo basta con observar la luz, debemos colectarla y registrarla para posteriormente analizarla. Y como en todas las ciencias, mientras más información tenemos, es mejor, pues en Astronomía, mientras más luz podamos colectar, mejor será nuestro análisis. En este sentido, el desarrollo de la ciencia y tecnología del espacio ha sido de gran ayuda para el estudio multifrecuencia del Universo, para estudiar el Cosmos a todo color.

En este capítulo haremos una revisión de las misiones más importantes en cada frecuencia, al mismo tiempo que repasaremos las contribuciones de los grandes científicos con cuyo nombre han sido bautizadas estas grandes misiones.

## Los rayos gamma: el universo violento

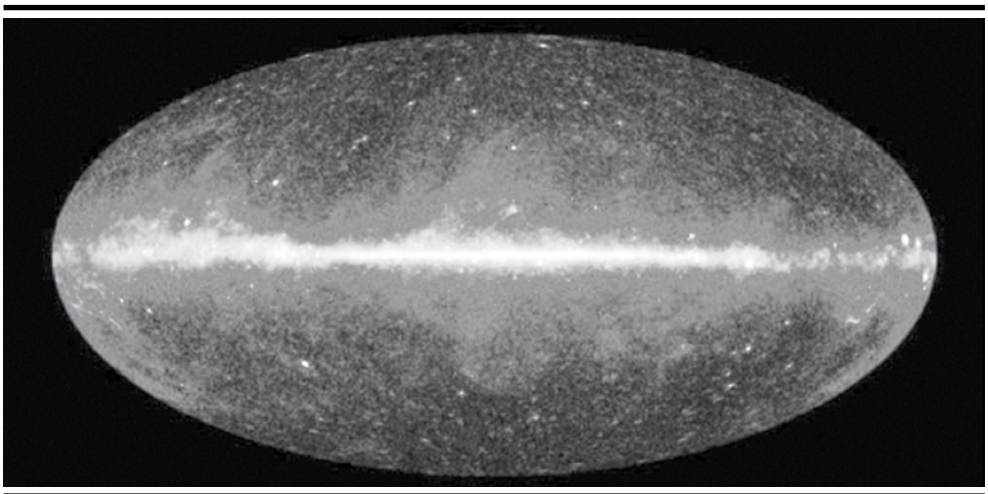
Los rayos gamma ( $\gamma$ ) se producen en los eventos más energéticos del Universo, como estrellas de neutrones, pulsares, supernovas y en regiones alrededor de los agujeros negros. Los rayos  $\gamma$  son un tipo extremo de radiación electromagnética. Corresponden a las longitudes de onda más cortas y los de mayor energía en todo el espectro electromagnético. Alcanzan energías mayores a 1 MeV (1 000 000 eV).

Se han desarrollado tres tipos de detectores astronómicos para rayos  $\gamma$ :

- Telescopios espaciales como el Fermi  $\gamma$ -Ray Space Telescope, detectando fotones de entre 0.1 y 100 GeV. Fermi es capaz de cubrir la totalidad del firmamento en tan sólo tres horas
- Telescopios Cherenkov atmosféricos ubicados en sitios geográficos con cielos nocturnos oscuros, capaces de detectar fotones de más de 30 GeV
- Detectores de superficie como HAWC, detectando fotones con energías por encima de 100 GeV

Cuatro misiones espaciales de rayos  $\gamma$  han mapeado su distribución en un intervalo de energías entre 50 y 1 000 MeV. En 1967, un detector en el satélite OSO-III descubrió que la Vía Láctea es una fuente de rayos  $\gamma$ . En el siguiente decenio, con las misiones SAS-II y Cos-B se mapeo el plano galáctico y se localizaron un poco más de dos docenas de fuentes  $\gamma$  puntuales, determinando que dos de ellas eran los pulsares de Vela y el Cangrejo, y otra más 3C 273, un cuasar. La cuarta misión se puso en órbita en 1991 y duró hasta el año 2000, el Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO) estaba equipado con cuatro instrumentos distintos y más sensibles que todos los anteriores. Uno de ellos era COMPTEL que observó rayos  $\gamma$  de 1 a 30 MeV emitidos por isótopos radioactivos en el medio interestelar, otro fue EGRET que detectó más de 250 fuentes de fotones con energías por encima de 100 MeV.

La misión más reciente y muy superior a las anteriores se llama Fermi-LAT (Large Aperture Telescope de Fermi) y ha estado en órbita desde 2008. Fermi-LAT ha detectado más de 3 mil objetos en la banda de rayos gamma (Figura 3.2), objetos ya detectados previamente como los blazares y pulsares y otros que no habían sido detectados antes como estrellas binarias, novae, cúmulos globulares, galaxias normales, así como galaxias con brotes de formación estelar (Starburst) y Seyfert. Encontró además que los destellos de rayos  $\gamma$  (GRB o *gamma-ray burst*) pueden producir fotones de por lo menos 90 GeV.



**Figura 3.2.**  
Mapa del cielo en rayos gamma obtenido con Fermi-LAT



Enrico  
Fermi

Nació en Roma el 29 de septiembre de 1901. En 1926 descubrió las leyes estadísticas, conocidas actualmente como “estadística de Fermi”, que gobiernan a las partículas sujetas al Principio de Exclusión de Pauli (ahora se les conoce como «fermiones», en contraste con los «bosones» que obedecen la estadística de Bose-Einstein).

El profesor Fermi fue autor de un gran número de artículos en física teórica y experimental.

En la década de los años 1950, Enrico Fermi demostró que choques en el medio interestelar pueden acelerar partículas subatómicas a muy altas energías. Fermi infirió que las explosiones de supernova de la Galaxia pueden explicar los rayos cósmicos, partículas de alta energía que inciden en la atmósfera terrestre.

Fermi recibió el Premio Nobel de Física en 1938 por su trabajo en la radioactividad artificial producida por neutrones y por las reacciones nucleares provocadas por neutrones lentos.

*Tomado de: Nobel Lectures, Física 1922-1941, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1965.*

## Rayos X: fuegos artificiales perpetuos en el Universo

Debido a su resolución espacial, los telescopios de rayos X no pueden “ver” con gran precisión la posición del objeto emisor, por lo que es necesario observar, en el intervalo visible del espectro electromagnético, varios objetos alrededor de las coordenadas de cada fuente de rayos X para determinar su naturaleza.

Cientos de noches de observación se requirieron para completar el proyecto que, de alguna manera, reactivó el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), en Cananea, Sonora. Se trataba de identificar las contrapartes ópticas de las fuentes de rayos X detectadas por un satélite llamado ROSAT (Röntgensatellit), se estudiaron seis regiones en el cielo del norte obteniendo imágenes y espectros en luz visible para identificar el objeto que estaba emitiendo los rayos X.

ROSAT, que fue lanzado en 1990 y duró hasta 1999, fue el primer contacto con los rayos X que tuve, ya que identificando en el óptico fuentes detectadas con este satélite es que realicé mi tesis doctoral.

Este observatorio de rayos X, propuesto por el Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE), fue diseñado, construido y operado en Alemania, pero con la participación de Estados Unidos y el Reino Unido. Ha sido también uno de los satélites más importantes ya que cambió nuestra visión del cielo en estas frecuencias.

En 1896 Wilhelm Roentgen reportó desde Würzburg, Alemania, unos rayos desconocidos, unos rayos misteriosos, de ahí la “X”, que penetraban placas metálicas y que podían mostrar los

huesos del cuerpo humano. Unos 15 años después se demostró que Roentgen había descubierto una nueva variación, un nuevo intervalo, de la radiación electromagnética, la diferencia es que su longitud de onda era mucho más corta que la luz visible, y por lo tanto de mucha mayor energía; por eso estos rayos eran capaces de “apretujarse” y atravesar aun placas delgadas de metal.

Aunque estos descubrimientos ampliaron los horizontes de la investigación en la Física, no tuvieron influencia inmediata directa en la astronomía debido principalmente a que, como ya hemos mencionado, por fortuna, la atmósfera de la Tierra deja pasar la luz visible y las ondas de radio, sin que sean parcial o del todo absorbidas, mientras que la luz ultravioleta, que amenazaría la vida en la Tierra, no la atraviesa, como tampoco lo hacen los rayos X o los gamma.

De tal manera que estos y otros intervalos espectrales, con excepción de algunas bandas muy angostas en el infrarrojo, pueden ser detectadas sólo si salimos de la atmósfera para librarlos de sus efectos. Por eso es que se han colocado telescopios y detectores a gran altura, al inicio en globos, luego en cohetes y lo más eficiente ha sido en satélites.

Los primeros telescopios de rayos X se utilizaron principalmente para observar el Sol, ya que siendo una fuente muy brillante, debido a su cercanía, facilitaría su detección teniendo en cuenta la tecnología de la época. Calculando la intensidad de la radiación de las estrellas más cercanas y suponiendo que emiten con la misma intensidad que el Sol, se estimó que los detectores debían ser cien mil veces más sensibles que los existentes para poder detectarlas. Esto causó una pérdida de interés en algunos científicos, pero no en todos.

El grupo liderado por uno de los astrónomos más influyentes en la banda de los rayos X, Ricardo Giacconi, luego de varios intentos, y en realidad buscando la detección de rayos X en la Luna, registró en 1962 la fuente denominada Sco X-1, la primera fuente de rayos X en la dirección de la constelación del Escorpión y la primera fuente fuera del sistema solar. Un paso gigantesco ya que, como mencionamos antes, muchos científicos no creían posible detectar fuentes de este tipo.

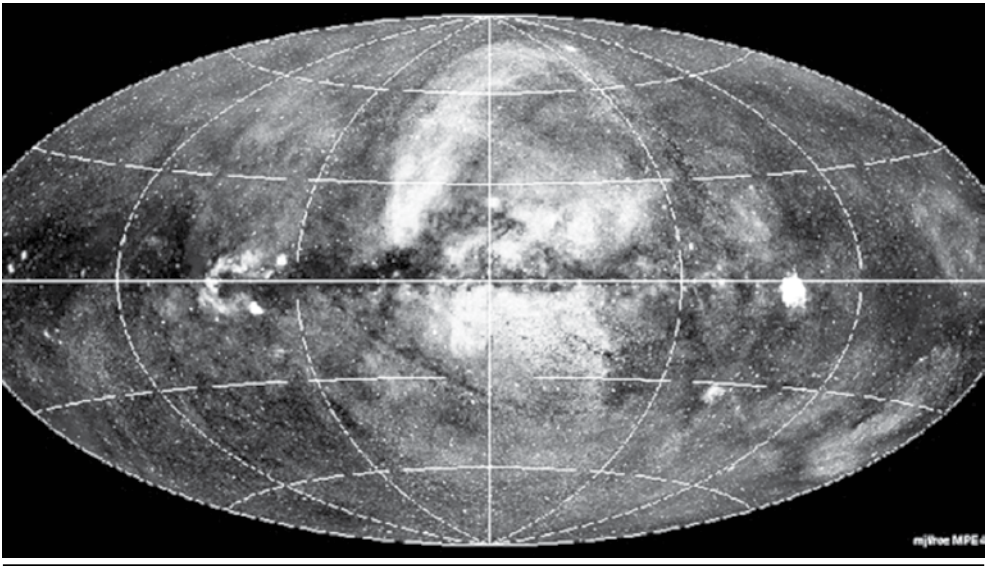
Para que se generen rayos X se requiere que haya condiciones ambientales extremas. Los rayos X tienen longitudes de onda muy cortas, son mucho más energéticos que la luz visible, por lo que se requiere considerablemente mucha más energía para producirlos.

Pasaron varios años para descubrir la naturaleza de la fuente Sco X-1, se trata de lo que llamamos un sistema binario de rayos X de baja masa, estrellas ligadas gravitacionalmente que están intercambiando material; sin embargo, observaciones posteriores descubrieron más cosas que están siendo estudiadas aún por los satélites de rayos X más recientes.

Por otro lado, debieron pasar otros años más para poder obtener imágenes, y no simples detecciones. Las primeras imágenes, aparte del Sol, en rayos X, se obtuvieron también desde cohetes. El primer objeto que se observó fue el cúmulo de Virgo en 1975, posteriormente, en 1977, con una óptica especial, se obtuvieron las primeras imágenes de remanentes de supernova.

Luego de estos avances, hubo un gran desarrollo en astronomía de rayos X, tanto en los detectores cada vez más sensibles, como en los telescopios, cada vez con mayor capacidad para coleccionar este tipo de luz. Los satélites resultaron fundamentales para el avance de la astronomía de rayos X; el primero fue llamado Uhuru, que significa “Libertad” en Swahili, y que llevó a cabo el primer mapeo exhaustivo del cielo en rayos X. Es claro que los grandes avances se dieron con los primeros satélites en órbita, el Observatorio Einstein en 1978, demostró que había una diversidad de objetos en el universo emitiendo en rayos X, revelando, además, la estructura de objetos extendidos, como las galaxias cercanas y los remanentes de supernova.

Posteriormente se han puesto en órbita otras misiones que han resultado muy exitosas al obtener imágenes cada vez de mejor calidad, algunas de ellas son EXOSAT, ROSAT y ASCA. En particular, ROSAT mostró la capacidad de este tipo de satélites para obtener imágenes científicamente de gran valor (Figura 3.3).



**Figura 3.3.**  
Mapa del cielo en rayos X obtenido con ROSAT.

El desarrollo de los telescopios de rayos X continuó en esta dirección, la misión Chandra de la NASA, lanzada en 1999, tiene una resolución 50 veces superior a la de ROSAT. Sus imágenes revelan grandes detalles antes no disponibles. Este es un gran logro, que se debe en mucho a la tecnología aplicada a los espejos del telescopio para darles una alta calidad. Cabe mencionar que los espejos tienen una configuración distinta a los telescopios ópticos, en lugar de estar alineados, están anidados. Podemos imaginarnos barriles de diferentes tamaños colocados uno dentro del otro, tienen la superficie interior aluminizada para que de esta manera utilicen el principio de incidencia rasante y colecten la mayor cantidad de luz posible.

Aunque existen actualmente varias misiones importantes como Suzaku, XMM-Newton o NuSTAR, los astrónomos no dejan de planear las siguientes. Si al principio de la astronomía de rayos X parecía que no se detectaría ningún objeto distinto al Sol, ahora, mientras se sigan desarrollando mejores detectores y telescopios para observar más profundo en el cielo, sabemos que encontraremos nuevas y sorprendentes cosas.

Es claro que el desarrollo de las ciencias espaciales nos ha permitido ver el cielo de una manera completamente diferente a la de nuestros antepasados. Aun las impresionantes noches estrelladas en las que se observan brillantes puntos con mínimas variaciones, contrastan con el cielo en rayos X, en el que podemos apreciar patrones siempre cambiantes. Esto se debe a que se requieren procesos extremos que involucran gran energía para poder generar radiación también de gran energía.

Binarias interactuantes, enanas blancas, supernovas, galaxias activas, cúmulos de galaxias, emiten y son estudiados en estas frecuencias. El cielo en rayos X es como “fuegos artificiales perpetuos en patrones siempre cambiantes”.



**Wilhelm  
Conrad  
Röntgen**

Nació el 27 de marzo de 1845, en Lennep en la provincia del Bajo Rin de Alemania. Su nombre se asocia principalmente con el descubrimiento de los llamados rayos X. En 1895 estudiaba los fenómenos que acompañan el paso de una corriente eléctrica a través de un gas de extremadamente baja presión. El trabajo de Röntgen sobre los rayos catódicos lo llevó al descubrimiento de un nuevo y diferente tipo de rayos.

En la tarde del 8 de noviembre de 1895, mientras trabajaba en sus experimentos con tubos de descarga, encontró que los objetos de diferentes espesores interpuestos en la trayectoria de los rayos generados mostraron transparencia variable en la imágenes registradas en placas fotográficas. Cuando inmovilizó durante algunos momentos la mano de su mujer en la trayectoria de los rayos y obtuvo una placa fotográfica, observó la imagen de la mano de su esposa, mostrando las sombras proyectadas por los huesos de la mano y la de un anillo que llevaba puesto, rodeado por la penumbra de la carne, que era más permeable a los rayos, por lo que arrojó una sombra más tenue. Este fue el primer "röntgenogram" obtenido. Debido a que su naturaleza era entonces desconocida, les dio el nombre de rayos-X. Más tarde, Max von Laue y sus alumnos demostraron que eran de la misma naturaleza electromagnética que la luz, pero se diferencian de ella sólo por la mayor frecuencia de su vibración.

Además del Premio Nobel en 1901, recibió numerosos honores. En varias ciudades hay calles que llevan su nombre, y una lista completa de premios, medallas, doctorados honorarios, miembro honorario y correspondientes de las sociedades científicas en Alemania como en el extranjero, y otros honores que llenarían una página entera de este libro. Era un gran alpinista. Amable y cortés por naturaleza. Nunca quiso tener un ayudante y prefería trabajar solo. Gran parte de la instrumentación que utilizó fue construida por él mismo con gran ingenio y habilidad experimental. Röntgen falleció en Munich el 10 de febrero de 1923.

*Tomado de:* Nobel Lectures, Física 1922-1941, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1965.



# El ultravioleta: el inicio de la astronomía a grandes alturas

Sabemos que la radiación UV es bloqueada por la capa de ozono de la atmósfera. Eso impide que detectores en la superficie de la Tierra puedan registrarla. De tal manera que fue necesario que se desarrollara tecnología que alcanzara grandes alturas para poder llevar a cabo observaciones en esta banda.

Al repasar la historia de la astronomía UV, podemos mencionar algunas de las principales misiones: la estación espacial Skylab, el Orbiting Astronomical Observatory (OAO-NASA), el satélite Copernicus, el Astronomical Netherlands Satellite (ANS), el International Ultraviolet Explorer (IUE), las sondas Viajero 1 y 2 (Voyager), el Telescopio Espacial Hubble (HST) y el Galaxy Evolution Explorer (GALEX).

Es importante destacar que la primera observación astronómica desde el espacio se llevó a cabo justo en esta banda del espectro. Sucedió luego de terminar la Segunda Guerra Mundial. En 1946, aprovechando la tecnología de guerra utilizada en los cohetes V2, se pudieron colocar detectores sensibles a estas longitudes de onda, más allá del azul, a grandes alturas, a más de 100 km. Se trató de estudiar la parte superior de la atmósfera y sirvieron para obtener información del Sol en el UV con un espectrómetro instalado en la cola del V2. Dado el éxito, posteriormente se llevaron a cabo experimentos para obtener datos en rayos X.

En el UV podemos analizar fenómenos que no pueden ser estudiados en otras bandas. Las atmósferas de planetas y lunas en el Sistema Solar, algunos procesos en la formación de las estrellas, la composición química del medio interestelar, la liberación de energía en estrellas muy masivas, entre otros.

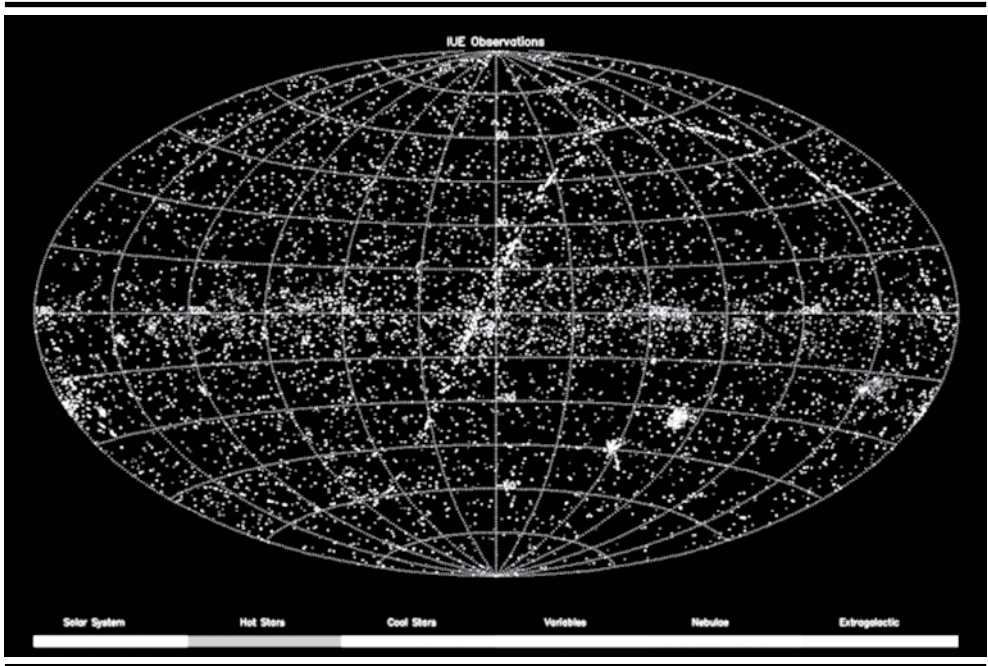
Estos excelentes resultados impulsaron nuevas y mejores misiones, ya no sólo en cohetes, también se utilizaron globos sonda, transbordadores espaciales y satélites. Entre las misiones más exitosas en el UV podemos resaltar los resultados de las sondas Viajero 1 y 2, el Explorador Internacional Ultravioleta y el Explorador Ultravioleta de Galaxias.

Las sondas Viajero tenían tres misiones: planetaria, interplanetaria e interestelar. La primera es muy conocida, Cosmos se encargó de hacer una gran promoción y hace un par de años se anunció el inicio de la misión interestelar, cuando abandonaron la vecindad solar. Actualmente estas sondas se encuentran a una distancia aproximada de 20 mil millones de kilómetros de nosotros. Son los objetos creados por el hombre que más se han alejado de la Tierra.

Con respecto a las observaciones en el UV, resaltan los datos obtenidos con el espectrómetro UV que permitieron estudiar estrellas calientes, estrellas frías con mucha actividad magnética (lo que origina ráfagas y protuberancias, como en el Sol), los remanentes de explosiones de estrellas gigantes, la emisión UV de sistemas estelares en nuestra galaxia, la Vía Láctea, entre muchos otros objetos.

Otra misión exitosa fue el Explorador Internacional Ultravioleta (IUE, por sus siglas en inglés). Lanzado en 1978 el IUE fue equipado con un espejo de 40 cm de diámetro. La misión inicialmente programada para tres años, quizá cinco, se prolongó a casi 19 años. En este tiempo colectó espectros en las regiones del lejano y del cercano UV. El legado del IUE consta de más de 100 mil espectros de objetos que van desde la Luna hasta galaxias lejanas (Figura 3.4).

GALEX, el Explorador Ultravioleta de Galaxias, fue otra de las misiones destacadas, la última completamente dedicada a investigaciones UV. Con un espejo de 50 cm estuvo en funcionamiento durante más de diez años, de 2003 a 2013. Observó cientos de millones de galaxias, algunas en las etapas iniciales del Universo lo que permitió estudiar el proceso de formación estelar para diferentes edades del Universo. De manera más local, GALEX pudo distinguir anillos de radiación UV en galaxias cercanas y hacer un censo de las denominadas asociaciones OB,



**Figura 3.4.**  
Mapa del cielo en ultravioleta obtenido con IUE.

además de observar cientos de millones de estrellas de la Vía Láctea. Un gran legado en la banda UV.

**El futuro.** Sólo hay una misión espacial en proceso de construcción, el Observatorio Espacial Mundial (WSO, por sus siglas en inglés), proyecto liderado por la Agencia Espacial Rusa (ROSCOSMOS) y la Universidad Complutense de Madrid, España. El WSO será muy similar a IUE pero con una capacidad colectora casi 2 mil veces mayor. Algunos investigadores del INAOE están involucrados en este proyecto que pretende, entre muchos otros objetivos, estudiar las atmósferas de muchos de los planetas extrasolares.

## Telescopio Espacial Hubble: un caso muy especial

El Telescopio Espacial Hubble (HST) es frecuentemente noticia debido a sus espectaculares resultados, sin embargo en junio de 1990, pocos meses después de su lanzamiento en el transbordador Discovery (24 de abril), el motivo de la noticia era desalentador y causó gran conmoción en la comunidad astronómica mundial: se había descubierto que el espejo primario del telescopio tenía una aberración esférica, un defecto que produce que la luz de los objetos observados se disperse, formando un halo difuso.



A pesar de que la calidad de la imagen superaba la de los telescopios terrestres, no era la que se esperaba lograr. Este problema, causado por un error en el dispositivo de medición en el pulido del espejo, fue corregido hasta la primera Misión de Mantenimiento del Hubble en diciembre de 1993, los astronautas, luego que los ingenieros y científicos analizaron y desarrollaron la manera de corregir la óptica, restauraron el telescopio y éste llegó a su nivel de rendimiento.

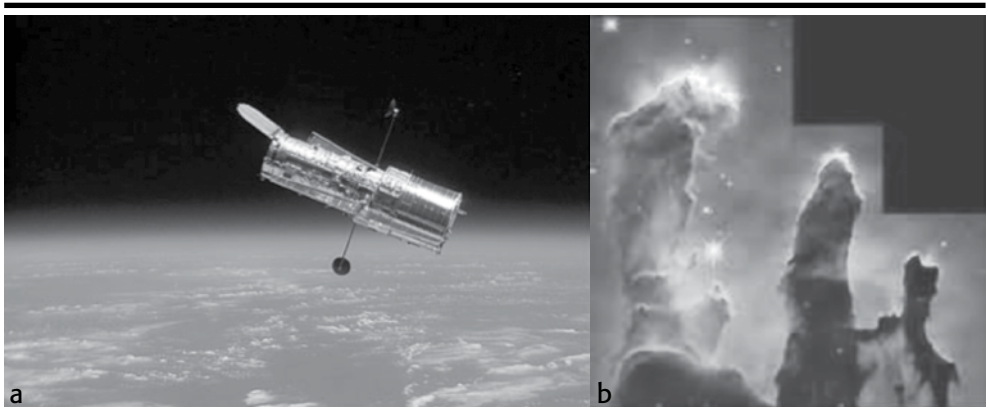
Además de la corrección del problema óptico a través de la instalación de un nuevo dispositivo, Costar, que consiste en cinco pares de espejos correctivos que se colocaron delante de los instrumentos iniciales, una cámara y un espectrógrafo para objetos débiles, y un espectrógrafo de alta resolución, se sustituyó otro instrumento para mejorar la observación en el ultravioleta.

La óptica de la llamada Wide Field and Planetary Camera 2, que también se instaló durante la misión 1993, fue diseñada para corregir la aberración esférica. Este fue el primer caso de un instrumento del Hubble que incorporaba desde su diseño la óptica correctiva.

Posteriormente hubo otras misiones para dar mantenimiento o cambiar la instrumentación. Todos los instrumentos instalados desde entonces se construyeron con la óptica que hacía las correcciones internas para la aberración esférica, haciendo eventualmente a Costar innecesario. Durante la Misión 4, los astronautas eliminaron Costar para dar paso a un nuevo instrumento, el Cosmic Origins Spectrograph (Espectrógrafo de Orígenes Cósmicos).

Con el Telescopio Espacial Hubble se han llevado a cabo grandes descubrimientos. Ha tenido un extraordinario impacto en la ciencia, la cultura y la sociedad. Debido a su versatilidad, el Hubble ha hecho contribuciones fundamentales a casi todas las ramas de la astronomía, desde nuestro propio sistema solar, las observaciones detalladas de los planetas extrasolares y el censo de las poblaciones estelares en galaxias cercanas, hasta lo más profundo del Universo lejano.

Robert Williams, que es parte del Comité Evaluador Externo del INAOE, quien fue director del Space Telescope Science Institute, mencionó en una conferencia en el INAOE que los descubrimientos del Hubble fueron fundamentales para apoyar la teoría de la evolución cuando el creacionismo estaba ganando terreno en la educación (Figura 3.5).



**Figura 3.5.**  
**a,** Telescopio Espacial Hubble. **b,** Imagen conocida como “Los pilares de la creación”.



**Edwin  
Hubble,**  
un astrónomo  
sin Nobel

Edwin Hubble nació en Missouri en 1889; desde joven ya era un estudiante prometedor, a tal grado que al graduarse de la preparatoria, en 1906, el director le dijo: “Edwin Hubble, te he observado durante cuatro años y nunca te he visto estudiar por 10 minutos”. Y luego de una pausa: “Aquí tienes una beca para la Universidad de Chicago.”

Infelizmente, por error administrativo —qué raro— se asignó también la beca a otro estudiante, por lo que debió compartir los fondos y pagar parte de sus gastos trabajando en múltiples actividades. Obtuvo un grado en Matemáticas y Astronomía en 1910.

Era un gran deportista; esto le valió una beca para Oxford, donde estudió Derecho debido a una promesa a su padre, además de Literatura y Español. Al regresar a Estados Unidos, en 1913, ejerció parcialmente como abogado y trabajó como profesor de secundaria y entrenador de baloncesto hasta mayo de 1914, cuando decide retomar su pasión, la astronomía, e ingresa al posgrado.

Cuando estaba terminando su doctorado, Hubble fue invitado por George Ellery Hale a trabajar en el Observatorio de Monte Wilson, en Pasadena, California, pero lo rechazó ya que debió servir en Francia durante la guerra, pero dicen que a su regreso, aún vistiendo el uniforme, se presentó a Monte Wilson, donde se localizaba el telescopio más poderoso de la época, el telescopio Hooker con un espejo primario de 100 pulgadas.

En Monte Wilson aplica el método iniciado por Henrietta Leavitt, del Observatorio de la Universidad de Harvard, que utiliza la variación de las llamadas estrellas Cefeidas, para determinar la distancia a un objeto en la “nebulosa” M31.

La distancia que determinó para este objeto era de ¡un millón de años luz! Esto lo colocaba fuera de la Vía Láctea y establecía que estas “nebulosas” eran galaxias similares a la nuestra, y que contienen millones de estrellas. Un gran descubrimiento, pero no el más grande de Hubble.

Hubble se dedicó entonces a observar estas galaxias, midió sus velocidades a través del efecto doppler en sus espectros y en 1929 hizo otro descubrimiento sorprendente: todas las galaxias parecían estar alejándose de nosotros con velocidades que aumentaban en proporción a su distancia. Esta, la famosa ley de Hubble, nos dice que el Universo está en expansión. De acuerdo con Stephen Hawking, “el descubrimiento de que el Universo se está expandiendo fue una de las grandes revoluciones intelectuales del siglo xx”.

Posteriormente, en 1942, Hubble iría a otra guerra; regresando tendría un papel fundamental en el diseño y construcción de otro gran telescopio, el Hale de 200 pulgadas en Monte Palomar, que sería el mayor telescopio en la Tierra durante varios decenios.

Hubble murió en 1953. Se dice que sus descubrimientos cambiaron nuevamente nuestra percepción del lugar que ocupamos en el Universo, con lo que la elección de su nombre para el Telescopio Espacial no pudo ser más apropiado.

## Infrarrojo: todos resplandecemos

La situación en el IR aún más complicada que en otras bandas ya que no sólo se trata de enfriar los detectores, sino el telescopio completo ya que produce radiación justo en esta región del espectro que queremos observar, igualmente la atmósfera puede radiar en estas frecuencias. Igualmente nosotros “brillamos” en estas frecuencias

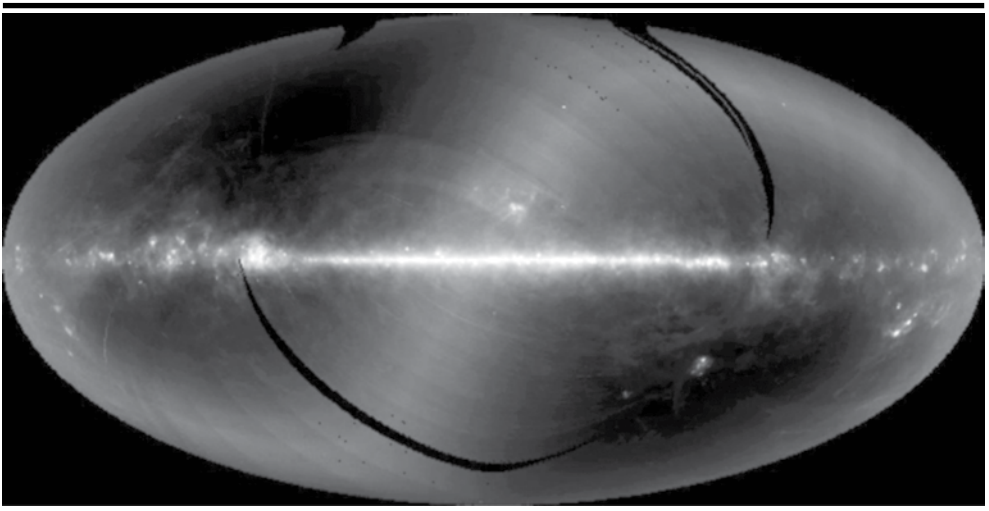
Por otro lado, en el IR la luz no es dispersada por el medio interestelar, aunque sí es absorbida por el dióxido de carbono y el vapor de agua en la atmósfera, se tiene entonces la ventaja de que se puede observar dentro de nubes densas de polvo y hacia el centro de la galaxia.

Entre las primeras observaciones que se llevaron a cabo en esta banda, destacan las del Kuiper Airbone Observatory (KAO, por sus siglas en inglés), un avión equipado con un pequeño telescopio. Sitios muy altos o en aeroplanos pueden evitar la mayor parte del vapor de agua en la atmósfera, sin embargo, para observar más allá de  $15\ \mu\text{m}$  (en el IR las bandas se denotan en micras o micrones) es necesario mayor altura.

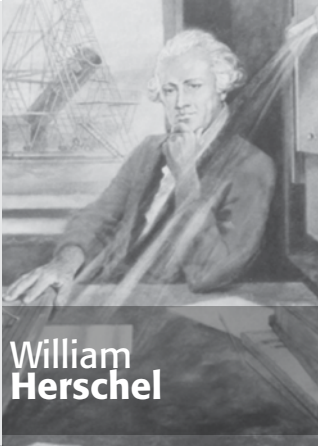
Sin duda, uno de los satélites más exitosos es el Infrared Astronomy Satellite (IRAS) lanzado en 1983, y que en los 10 meses de vida que tuvo, escaneó el cielo completo casi tres veces.

Con IRAS se descubrió nuevos objetos llamados “*infrared cirrus*” (cirrus infrarrojos), fuentes extendidas y con gran estructura que aún no se entienden completamente. También se detectaron, muy fácilmente, objetos en el sistema solar, como los cometas, o la emisión de polvo en regiones de formación estelar (Figura 3.6).

Hay dos versiones del descubrimiento de la radiación IR. En la primera se dice que, al estar estudiando el espectro de la luz visible, Herschel dejó una vela más allá del extremo rojo y, debido al calor de la radiación IR, empezó a derretirse. La otra versión nos dice que no era una vela, sino un termómetro, en la misma zona, ya que había colocado termómetros en cada color del espectro, y éste registró una temperatura, debido desde luego a la radiación IR. En ambos



**Figura 3.6.**  
Mapa del cielo en IR obtenido con IRAS.



**William  
Herschel**

Descubrió la radiación infrarroja. Hijo de un músico, nació en Hanover, Alemania, en 1738. Se mudó a Inglaterra para enseñar música y ahí vivió la mayor parte de su vida. Afortunadamente se interesó en la astronomía al grado que construyó sus propios telescopios, mejorando los diseños existentes en la calidad y tamaño de sus componentes ópticas, mismas que él producía. Además, descubrió Urano, estudió la evolución de las estrellas y sugirió la existencia de otras galaxias, además de la Vía Láctea.

casos el descubrimiento parece fortuito, pero seguro lo entendió debido a que estaba estudiando el espectro electromagnético.

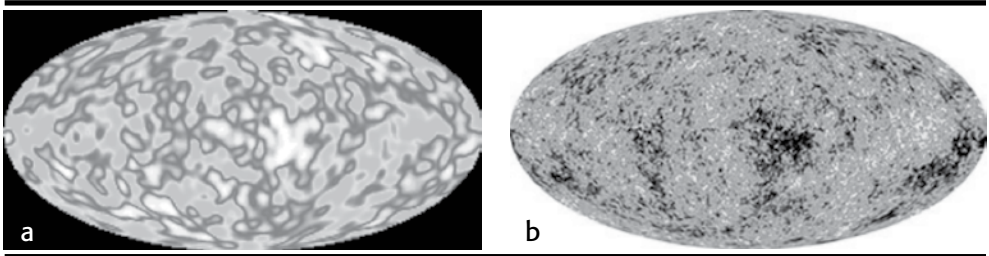
La misión **Herschel** fue diseñada para estudiar los objetos fríos en el Universo en las frecuencias infrarrojas y milimétricas. Estuvo en funcionamiento de mayo de 2009 a abril de 2013. Es la misión espacial cuyas componentes ópticas, un espejo de 3.5 m de diámetro, son las mayores hasta la fecha. No sólo observó objetos lejanos en el Universo, para probar la formación de estrellas y galaxias a lo largo de la historia del Universo, sino que también estudió el sistema solar, en particular la composición química de asteroides y cometas para contribuir al estudio de la formación de planetas.

Cuando el helio utilizado para enfriar sus instrumentos se agotó, Herschel había llevado a cabo más de 40 mil observaciones científicas, durante más de 25 mil horas. Todas estas observaciones se hicieron públicas; están disponibles para todos los astrónomos en el planeta desde finales de 2013.

## **Microondas: el origen de las estructuras cósmicas**

La llamada radiación cósmica de fondo en microondas (CMBR, Cosmic Microwave Background Radiation) es un remanente del *Big Bang*. El primer satélite en producir una imagen de esta etapa temprana del Universo fue el Cosmic Background Explorer (COBE) con el que se obtuvieron mediciones muy precisas de la radiación difusa, en longitudes de onda entre una micra y un centímetro, en toda la esfera celeste.

COBE fue lanzado en noviembre de 1989 y terminó sus operaciones en diciembre de 1993. Iba equipado con tres instrumentos, uno para comparar, de manera muy precisa, el espectro de la radiación cósmica de microondas con un cuerpo negro, otro para mapear la radiación cósmica, también de manera muy precisa, y un tercero para buscar la radiación cósmica de fondo en el IR.



**Figura 3.7.**

Mapa del cielo obtenido con **a**, COBE y **b**, WMAP. Estos mapas dan una gran cantidad de información acerca de la estructura fundamental del Universo.

Con COBE fue posible descubrir la forma de la distribución de la radiación cósmica de fondo del Universo, que es similar a un cuerpo negro, y su anisotropía. COBE mostró que el espectro de radiación coincide con las predicciones de la teoría del Big Bang. Por otro lado, las “manchas” o variaciones en el mapa del cielo completo obtenido por COBE, ligadas a las variaciones en la densidad en los orígenes del Universo, se piensa que son el origen de las estructuras (los cúmulos de galaxias o los grandes huecos o regiones vacías) del universo actual (Figura 3.7 a).

Mas de 10 años después, en julio del 2001, la misión WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) fue enviada al espacio y llevó a cabo mediciones mucho más precisas y fundamentales para la cosmología.

WMAP reveló las condiciones que existían en el universo temprano a través, nuevamente, de medir las propiedades de la CMBR, esta radiación que se liberó unos 375 mil años después del nacimiento del universo. En este proyecto, WMAP generó el mapa de la CMBR usando diferencias en las temperaturas medidas en direcciones opuestas (Figura 3.7 b).

WMAP iba equipado de un juego de radiómetros de microondas con reflectores primarios de  $1.4 \times 1.6$  m de diámetro, necesarios para obtener la resolución angular deseada. El objetivo era medir la temperatura en microondas con una precisión de una millonésima parte de un grado.

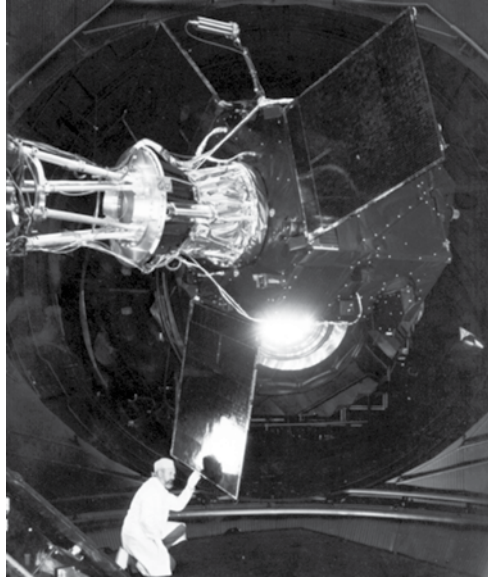
Estas variaciones, de la radiación cósmica de fondo medidas por WMAP, son extremadamente pequeñas: una parte del cielo tiene una temperatura de  $2.7251$  °K, mientras que otra tiene  $2.7249$  °K. Estas pequeñas diferencias de temperatura habían sido observadas en 1992 por COBE, pero en grandes escalas angulares. WMAP midió esta anisotropía con mucho mayor detalle y con una mayor sensibilidad.

Estas mediciones tan precisas nos revelan el tamaño, contenido de materia, edad, geometría y destino del Universo. También revelan las estructuras primordiales que sirvieron de semilla para formar galaxias. WMAP determinó, entre muchas otras cosas referentes, por ejemplo, a la materia y energía oscuras, que el Universo tiene una edad de 13.7 mil millones de años.

## **Grandes nombres, grandes historias, grandes misiones, grandes resultados**

Hiparco, Tycho, Kepler, Galileo, Copérnico, son nombres tan reconocidos que han sido asignados, desde luego, a misiones espaciales con objetivos asociados, de alguna manera, a la contri-





---

**Figura 3.8.**  
El satélite Hipparcos durante la etapa de revisión.

bución de cada uno de estos científicos al desarrollo del conocimiento. Este capítulo también podría haber sido estructurado de manera cronológica, de acuerdo con la época en que vivió cada uno de estos grandes científicos.

La misión **Hipparcos**, es una misión espacial europea que determinó las posiciones de más de 100 mil estrellas con alta precisión, unas 200 veces más precisas que las determinadas hasta antes de su lanzamiento, así como las posiciones, un poco menos precisas, de más de dos millones y medio de estrellas. Además, la misión determinó distancia, movimiento, brillo y colores de estas estrellas.

Uno de los métodos para determinar la distancia a las estrellas es el llamado Paralaje Trigonométrico. Comparando posiciones de una estrella cercana, con respecto a las estrellas de fondo, en extremos opuestos de la órbita terrestre, es posible determinar su distancia mediante trigonometría. Esto equivale a determinar el ángulo bajo el cual se observaría el radio de la órbita terrestre desde la estrella. El error del método aumenta con la distancia y como ésta interviene en el cálculo de parámetros fundamentales de la estrella, la comunidad astronómica consideró como objetivo prioritario mejorar su precisión.

Esta tarea fue encomendada al satélite Hipparcos que durante sus tres años y medio de vida observó casi 120 mil estrellas con la más alta precisión. Afortunadamente, el desarrollo de la tecnología ha facilitado la medida de ángulos muy pequeños, equivalentes, por ejemplo, al subtendido por el tamaño de un hombre situado en la Luna, o a medir desde 10 m de distancia el crecimiento del cabello humano durante 10 segundos.

Hipparcos confirmó la predicción de Einstein sobre el efecto de la gravedad en la luz estelar, descubrió que la Vía Láctea está cambiando de forma y ayudó, con sus datos, a predecir el impacto del cometa Shoemaker-Levy con Júpiter en 1994 (Figura 3.8).



## Hiparco de Nicea

Hiparco de Nicea fue un filósofo y matemático en la antigua Grecia; sin embargo, es más conocido por ser el pionero de la Astrometría, disciplina que trata de medir la posición de las estrellas y la determinación de sus distancias y movimientos propios.

Hiparco es considerado el mayor astrónomo de la era precristiana, no sólo construyó un observatorio en la Isla de Rodas y definió correctamente la posición de los polos celestes, sino que compiló un catálogo con la posición y las magnitudes de 850 estrellas, creando el primer mapa de las estrellas. Se le considera también el fundador de la trigonometría.

Hiparco llevó a cabo su trabajo astronómico utilizando solamente sus ojos, ya que lo realizó mucho antes del desarrollo del telescopio. De esta manera midió las posiciones de estrellas y planetas que le pasaban por encima cada noche. El catálogo que produjo fue el primero de muchos que se han compilado a lo largo de la historia de la astronomía.

**Tycho** es el nombre con que se designó a dos catálogos resultado también de la misión Hipparchus utilizando un mapeador de estrellas auxiliar con el que se determinó la posición de más de dos millones y medio de estrellas con menos precisión que el instrumento principal,



Tycho Brahe fue un astrónomo danés que realizó meticulosas observaciones del cielo nocturno, en especial de los planetas, durante más de 20 años. Observó una Supernova (SN) en 1572 y un cometa en 1577. Sus mediciones de las paralajes demostraron que estos objetos estaban más allá de la órbita de la Luna. Sus mediciones de brillo de la SN mostraron su variabilidad. En 1599 se trasladó a Praga para continuar sus observaciones de los planetas junto a Johannes Kepler. Las observaciones de Tycho también las realizó a simple vista. El telescopio seguía sin llegar.



**Figura 3.9.**  
Localización del campo de estudio de la misión Kepler.

pero todavía con una precisión sin precedente. El catálogo Tycho 1 contiene un poco más de un millón de estrellas, mientras que el Catálogo Tycho 2 incluye más de dos millones y medio. Incluye 99% de todas las estrellas hasta magnitud 11, estrellas que son casi 100 mil veces más débiles que Sirio, la estrella más brillante en el cielo.

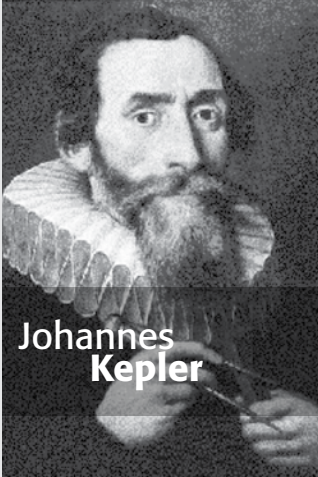
Uno de los temas con mayor actividad, actualmente en astronomía, es la búsqueda de exoplanetas, planetas fuera del sistema solar, planetas orbitando otras estrellas. Estos planetas se descubrieron desde los noventas. Se ha encontrado evidencia de planetas gigantes gaseosos, de super-Tierras calientes con órbitas de corto periodo, así como planetas gigantes congelados.

El desafío de la misión **Kepler** de la NASA fue buscar planetas tipo terrestre, por ejemplo, aquellos cuyos tamaños varían desde la mitad de la Tierra y hasta el doble de ella, pero que además deben estar localizados en la llamada zona habitable, aquella donde el agua puede existir en estado líquido en la superficie del planeta (Figura 3.9).

Kepler apunta de manera continua una misma región del cielo localizada en dirección a la constelación del Cisne. Está equipada con una gran cámara CCD que observa, al mismo tiempo, las variaciones en el brillo de más de 150 mil estrellas. Estas variaciones se deben al eclipse parcial que provocan los planetas que las orbitan al pasar en la línea de nuestra visión.

Al 26 de mayo de 2016, Kepler ha encontrado 4 mil 696 candidatos a exoplanetas, ha confirmado 2 mil 327 exoplanetas y ha confirmado 21 exoplanetas con tamaño menor al doble del tamaño de la Tierra y que están localizados en la zona habitable.





Johannes  
Kepler

Johannes Kepler nació el 27 de diciembre de 1571 en Weil der Stadt, Württemberg, en el sacro Imperio Romano, de nacionalidad alemana. Enfermizo y de padres humildes, con una inteligencia excepcional obtuvo una beca para estudiar en la Universidad de Tübingen donde conoció las ideas de Copérnico.

Kepler analizó la gran cantidad de datos que Tycho Brahe había acumulado al observar los planetas. Realizó cálculos precisos de sus órbitas y enunció tres leyes matemáticas que describían sus movimientos, conocidas como las Tres Leyes de Kepler. Con sus resultados impulsó la aceptación del modelo copernicano del sistema solar.

## A manera de conclusión

En este capítulo hemos presentado sólo algunas de las grandes misiones que llevan grandes nombres. Ya sea que sigamos en orden histórico a los grandes astrónomos o en orden cronológico el desarrollo de telescopios espaciales, o a través de las regiones del espectro electromagnético, encontraremos que se han obtenido grandes resultados dignos de los grandes nombres que llevan las misiones.

En nuestro país no contamos aún con telescopios propios en ninguna banda, sin embargo, hay varias iniciativas que lo lograrán, esperemos pronto. Sin embargo, en México sí contamos con telescopios que cubren observaciones en un amplio intervalo del espectro electromagnético. El Gran Telescopio Milimétrico-Alfonso Serrano cubre la región de los milímetros, el High Altitude Water Cerenkov, los rayos cósmicos y gamma, mientras que en Cananea y San Pedro Mártir se localizan telescopios dedicados a la parte visible y el IR. Además, se cuenta con colaboraciones en el Very Large Array (radio) y el Gran Telescopio Canarias (visible e IR). Y existen proyectos en sus fases muy iniciales para observaciones en el UV.

Es muy importante contar con instrumentos en cada intervalo espectral de la luz, ya que la mayor parte del trabajo astronómico actual se realiza de manera multifrecuencia, de este modo los astrónomos podemos tener una idea más completa de la naturaleza de los objetos celestes. Estamos en una época en la cual podemos estudiar, pero principalmente disfrutar, el cielo en todo su esplendor, el Cosmos a todo color.

# Referencias

An Introduction to Modern Astrophysics. Bradley W. Carroll, Dale A. Ostlie. Pearson Addison-Wesley, 2007.  
Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics. Paul Murdin IoP, Inst. of Physics Publ., 2001.  
Exploring the X-ray Universe. Frederick D. Seward and Philip A. Charles. Cambridge University Press, 2010.  
Handbook of Infrared Astronomy. I. S. Glass. Cambridge University Press, 1999.  
Los Sonámbulos. Origen y desarrollo de la Cosmología. Arthur Koestler. QED y Conaculta, 2007.  
The Invisible Sky. Bernd Aschenbach Hermann-Michael Hahn Joachim Trümper, Springer-Verlag, 1998.

## **Páginas en Internet**

### **Rayos gamma:**

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1938/fermi-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1938/fermi-bio.html)  
<http://fermi.gsfc.nasa.gov/>

### **Rayos X:**

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1901/roentgen-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1901/roentgen-bio.html)  
<http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10424/>

### **Ultravioleta:**

<http://archive.stsci.edu/iue/>  
<http://www.galex.caltech.edu/index.html>

### **Telescopio Hubble:**

<http://www.spacetelescope.org/projects/Hubble25/>  
<http://www.stsci.edu/~wms/>  
<http://hubblesite.org/>

### **Infrarrojo:**

<http://www.jpl.nasa.gov/missions/infrared-astronomical-satellite-iras/>  
<http://sci.esa.int/herschel/>

### **Microondas:**

[http://www.nasa.gov/topics/universe/features/cobe\\_20th.html](http://www.nasa.gov/topics/universe/features/cobe_20th.html)  
<http://map.gsfc.nasa.gov/media/121238/index.html>

### **Grandes nombres:**

<http://kepler.nasa.gov/Mission/>  
<http://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos>



# 4. Tecnología de la información aplicada a la medicina espacial

Teresa de la Torre León, Marcelo Alejandro de la Torre León, Raúl Carrillo Esper

## ■ Introducción

La tecnología de la información es la aplicación de ordenadores y equipos de telecomunicación para almacenar, recuperar, transmitir y manipular datos, que con frecuencia son utilizados en el contexto de negocios y en este caso en el contexto de la medicina espacial.<sup>1</sup> Este término se puede utilizar como sinónimo de las redes de computadoras pero abarca otras tecnologías de la información como la televisión, teléfonos, Internet, equipos de telecomunicación y servicios computacionales.

La medicina aeroespacial es una especialidad médica que surge como requerimiento del desarrollo de la industria aeronáutica y espacial, con el objetivo de crear condiciones idóneas para el desempeño y desarrollo humano en estos ambientes. La tecnología de la información aplicada a la medicina espacial tiene como objetivo el mejoramiento continuo tanto de los procesos educativos como promover y generar un aporte estructurado a las comunidades científicas y a la aeronáutica.<sup>1,2</sup>

La cultura de la aeronáutica obliga a tomar estas tecnologías para poder incorporar el conocimiento generado por la investigación científica y optimizar el desempeño en este contexto. No cabe duda que un médico espacial debe de contar con conocimientos científicos sólidos y conocer el empleo adecuado de los recursos tecnológicos, farmacológicos, terapéuticos, al servicio de la medicina.<sup>1,2</sup>

## Antecedentes

En los tiempos actuales la relación entre los dispositivos que ayudan al intercambio de información y la comunicación entre las personas genera una especial atención; día a día más habitantes del planeta necesitan estos dispositivos y su acceso parece una necesidad esencial, ya no sólo para permitir la interacción a distancia entre individuos, sino también para facilitar el comercio, la ciencia, el entretenimiento, la educación, y un sinnúmero de actividades relacionadas con la vida moderna del siglo XXI. El Banco Mundial ha definido el acceso que los países tienen a las tecnologías de información y comunicación (TIC) como uno de los cuatro pilares para medir su grado de avance en el marco de la economía del conocimiento (World Bank Institute, 2008).<sup>2</sup>

La cantidad de información generada en 2007 estuvo a punto de sobrepasar, por primera vez, la capacidad física de almacenamiento disponible; en el año 2006, el volumen digital creado,

capturado y replicado fue de 161 exabytes, es decir, 161 billones de gigabytes. Esto es más de lo generado en los 5 000 años anteriores. Probablemente, muchos de los panoramas de la realidad en que vivimos serían diametralmente diferentes si las tecnologías de la información y comunicación no hubiesen irrumpido de manera tan sustantiva en la agenda internacional de fines del siglo xx y comienzos del xxi. Parece oportuno comprender en qué medida la acelerada innovación y masificación de estos dispositivos digitales ha incidido en el concierto de la sociedad actual.<sup>3</sup>

## Tecnologías, conocimiento y educación

En la llamada nueva economía, el papel que desempeñan las instituciones del conocimiento es estratégico, en particular aquellas entidades dedicadas a la educación, así como otras organizaciones orientadas a impulsar investigación y desarrollo, innovación, generación e intercambio de conocimiento y nuevas tecnologías. Podría plantearse que las sociedades del conocimiento ya existían desde antes, pero lo que realmente no tiene precedentes es la rapidez y magnitud con la que se generan, difunden y expanden estos conocimientos. En esta línea, la educación del siglo xxi está llamada a avanzar en la dirección (y la velocidad) adecuada para enfrentar los diversos desafíos y oportunidades que ofrece la sociedad del conocimiento. Por ello, se puede postular que debe existir una estrecha relación entre aprendizaje, generación de conocimiento, innovación continua y uso de las nuevas tecnologías. En este sentido, sería interesante comprender en qué medida las tecnologías de información y comunicación han contribuido a la reconfiguración de este escenario.<sup>3,4</sup>

En consecuencia, el aprendizaje continuo y la habilidad para desarrollar nuevas competencias adquieren un papel de relevancia sustantiva. En este contexto, las tecnologías de información y comunicación se convierten en dispositivos facilitadores y articuladores de muchas de las tareas que debe llevar a cabo un profesional del siglo xxi. Un uso estratégico y a la vez crítico de las TIC, así como del conocimiento, ha de perfilarse como un eje transversal en los proyectos educativos de nuestros días.<sup>4</sup>

## Definición

Se consideran dispositivos tecnológicos (*hardware* y *software*) que permiten editar, producir, almacenar, intercambiar y transmitir datos entre diferentes sistemas de información que cuentan con protocolos comunes. Estas aplicaciones, que integran medios de informática, telecomunicaciones y redes, posibilitan tanto la comunicación y colaboración interpersonal (persona a persona) como la multidireccional (uno a muchos o muchos a muchos). Estas herramientas desempeñan un papel sustantivo en la generación, intercambio, difusión, gestión y acceso al conocimiento.<sup>5</sup>

Las TIC (Tecnologías de la Información y Comunicaciones) son las tecnologías que se necesitan para la gestión y transformación de la información, y muy en particular el uso de ordenadores y programas que permiten crear, modificar, almacenar, proteger y recuperar esa información. Las TIC, como elemento esencial de la sociedad de la información habilitan la capacidad universal de acceder y contribuir a la información, las ideas y el conocimiento. Hacen posible, por tanto, promover el intercambio y el fortalecimiento de los conocimientos mundiales en favor del desarrollo, permitiendo un acceso equitativo a la información para actividades económicas, sociales, políticas, sanitarias, culturales, educativas y científicas, dando acceso a la información que está en el dominio público. Las TIC generan ventajas múltiples tales como un

público instruido, nuevos empleos, innovación, oportunidades comerciales y el avance de las ciencias. Desde el punto de vista de la educación, las TIC elevan la calidad del proceso educativo, derribando las barreras del espacio y del tiempo, permitiendo la interacción y colaboración entre las personas para la construcción colectiva del conocimiento, y de fuentes de información de calidad (aprendizaje colectivo),<sup>5</sup>

## Características

1. Permiten la adquisición, producción, almacenamiento, tratamiento, comunicación, registro, acceso y presentación de datos, información y contenidos (en forma alfanumérica, imágenes, videos, sonidos, aromas, vibraciones, temperaturas, movimientos, acciones a distancia)
2. El rol fundamental lo tienen, en este conjunto de operaciones, la informática y las telecomunicaciones; todas estas infraestructuras y redes de comunicaciones convergen en una sola red
3. Técnicas que en un sentido genérico permiten la captura, almacenamiento, tratamiento y difusión informatizada de la información
4. La integración de aplicaciones diferentes y el compartimento de trabajos en grupo, que permiten la automatización de flujos de trabajo y el acceso y la gestión simultánea de la información por parte de diversos usuarios
5. El desarrollo del diseño de arquitecturas de sistemas informáticos que posibilitan el acceso y la gestión de datos de forma rápida y segura
6. La implantación de medios y herramientas que permiten la comunicación entre sistemas diferentes y el intercambio electrónico de datos de diferentes formatos
7. Procesan, almacenan, sintetizan, recuperan y presentan información representada de la más variada forma
8. Tratamiento y acceso a la información. Dar forma, registrar, almacenar y difundir contenidos informacionales necesarios para administrar la información
9. Convertirla, almacenarla, administrarla, transmitirla y encontrarla
10. Se recibe, manipula y procesa información, y que facilitan la comunicación entre dos o más interlocutores
11. No funcionan como sistemas aislados, sino en conexión con otras mediante una red
12. Tecnologías de emisión y difusión
13. No sólo dan cuenta de la divulgación de la información, sino que además permiten una comunicación interactiva
14. El incremento exponencial de la fusión de las tecnologías de información, capacidad de los equipos y divulgación, herramientas de almacenamiento y recuperación de datos
15. Interactividad. La interactividad es posiblemente la característica más importante de las TIC para su aplicación en el campo educativo. Mediante las TIC se consigue un intercambio de información entre el usuario y el ordenador. Esta característica permite adaptar los recursos utilizados a las necesidades y características de los sujetos, en función de la interacción concreta del sujeto con el ordenador
16. Interconexión. La interconexión hace referencia a la creación de nuevas posibilidades tecnológicas a partir de la conexión entre dos tecnologías. Por ejemplo, la telemática es la interconexión entre la informática y las tecnologías de comunicación, propiciando con ello, nuevos recursos como el correo electrónico, etc.

17. Instantaneidad. Las redes de comunicación y su integración con la informática, han posibilitado el uso de servicios que permiten la comunicación y transmisión de la información, entre lugares alejados físicamente, de una forma rápida
18. Elevados parámetros de calidad de imagen y sonido. El proceso y transmisión de la información abarca todo tipo de información: textual, imagen y sonido, por lo que los avances han ido encaminados a conseguir transmisiones multimedia de gran calidad, lo cual ha sido facilitado por el proceso de digitalización
19. Digitalización. Su objetivo es que la información de distinto tipo (sonidos, texto, imágenes, animaciones, etc.) pueda ser transmitida por los mismos medios al estar representada en un formato único universal. En algunos casos, por ejemplo los sonidos, la transmisión tradicional se hace de forma analógica y para que puedan comunicarse de forma consistente por medio de las redes telemáticas es necesario su transcripción a una codificación digital, que en este caso realiza bien un soporte de **hardware** como el modem o un soporte de **software** para la digitalización.
20. Mayor Influencia sobre los procesos que sobre los productos. Es posible que el uso de diferentes aplicaciones de la TIC presente una influencia sobre los procesos mentales que realizan los usuarios para la adquisición de conocimientos, más que sobre los propios conocimientos adquiridos. En los distintos análisis realizados, sobre la sociedad de la información, se remarca la enorme importancia de la inmensidad de información a la que permite acceder Internet. En cambio, muy diversos autores han señalado justamente el efecto negativo de la proliferación de la información, los problemas de la calidad de la misma y la evolución hacia aspectos evidentemente sociales, pero menos ricos en potencialidad educativa –económicos, comerciales, lúdicos, etc.–. No obstante, como otros muchos señalan, las posibilidades que brindan las TIC suponen un cambio cualitativo en los procesos más que en los productos. Ya hemos señalado el notable incremento del papel activo de cada sujeto, puesto que puede y debe aprender a construir su propio conocimiento sobre una base mucho más amplia y rica. Por otro lado, un sujeto no sólo dispone, a partir de las TIC, de una "masa" de información para construir su conocimiento sino que, además, puede construirlo en forma colectiva, asociándose con otros sujetos o grupos. Estas dos dimensiones básicas (mayor grado de protagonismo por parte de cada individuo y facilidades para la actuación colectiva) son las que suponen una modificación cuantitativa y cualitativa de los procesos personales y educativos en la utilización de las TIC
21. Penetración en todos los sectores (culturales, económicos, educativos, industriales...). El impacto de las TIC no se refleja únicamente en un individuo, grupo, sector o país, sino que se extiende al conjunto de las sociedades del planeta. Los propios conceptos de "la sociedad de la información" y "la globalización", tratan de referirse a este proceso. Así, los efectos se extenderán a todos los habitantes, grupos e instituciones conllevando importantes cambios, cuya complejidad está en el debate social hoy en día
22. Innovación. Las TIC están produciendo una innovación y cambio constante en todos los ámbitos sociales. Sin embargo, es de reseñar que estos cambios no siempre indican un rechazo a las tecnologías o medios anteriores, sino que en algunos casos se produce una especie de simbiosis con otros medios. Por ejemplo, el uso de la correspondencia personal se había reducido ampliamente con la aparición del teléfono, pero el uso y potencialidades del correo electrónico ha llevado a un resurgimiento de la correspondencia personal.
23. Tendencia hacia automatización. La propia complejidad empuja a la aparición de diferentes posibilidades y herramientas que permiten un manejo automático de la información en diversas actividades

personales, profesionales y sociales. La necesidad de disponer de información estructurada hace que se desarrollen gestores personales o corporativos con distintos fines y de acuerdo con unos determinados principios.

24. Diversidad. La utilidad de las tecnologías puede ser muy diversa, desde la mera comunicación entre personas, hasta el proceso de la información para crear informaciones nuevas.<sup>5-7</sup>

Las TIC están provocando profundos cambios y transformaciones de naturaleza social, cultural y económicos. Hasta tal punto el impacto social de las nuevas tecnologías es tan poderoso, que se afirma que estamos entrando en un nuevo periodo o etapa de civilización humana: la llamada sociedad de la información y el conocimiento. Las TIC, como elemento esencial de la sociedad de la información, habilitan la capacidad universal de acceder y contribuir a la información, las ideas y el conocimiento. Hacen posible, por tanto, promover el intercambio y el fortalecimiento de los conocimientos mundiales en favor del desarrollo, permitiendo un acceso equitativo a la información para actividades económicas, sociales, políticas, sanitarias, culturales, educativas y científicas, dando acceso a la información que está en el dominio público.<sup>7,8</sup>

Los usos y aplicaciones de las nuevas tecnologías en los diversos campos de la actividad humana y social, exigen reconocer los impactos y transformaciones que ocasionan, así como ver la forma en que estas nuevas tecnologías se aprovechan para lograr un aprendizaje continuo, a distancia, y bajo el control de quienes aprenden. Las TIC generan ventajas múltiples, tales como un público instruido, nuevos empleos, innovación, oportunidades comerciales y el avance de las ciencias. Las TIC elevan la calidad del proceso educativo, derribando las barreras del espacio y del tiempo, permitiendo la interacción y colaboración entre las personas para la construcción colectiva del conocimiento y de fuentes de información de calidad (aprendizaje colectivo). Han sido detonadores del desarrollo económico de la sociedad.<sup>8,9</sup>

La acelerada innovación e hibridación de estos dispositivos ha incidido en diversos escenarios. Entre ellos destacan: las relaciones sociales, las estructuras organizacionales, los métodos de enseñanza-aprendizaje, las formas de expresión cultural, los modelos de negocios, las políticas públicas nacionales e internacionales, la producción científica, entre otros. En el contexto de las sociedades del conocimiento, estos medios pueden contribuir al desarrollo educativo, laboral, político, económico, al bienestar social, entre otros ámbitos de la vida diaria.<sup>9,19</sup>

Sin interés de uniformar las estrategias adecuadas para insertar con éxito las nuevas tecnologías en el aula, resulta oportuno señalar que la adopción de las TIC tiene que venir acompañada de un conjunto de habilidades (destrezas) complementarias, en este marco denominadas competencias digitales, las cuales exceden con creces el manejo de determinados dispositivos tecnológicos.<sup>9,10</sup>

Las TIC se desarrollan a partir de los avances científicos producidos en los ámbitos de la informática y las telecomunicaciones. Las TIC son el conjunto de tecnologías que permiten el acceso, producción, tratamiento y comunicación de información presentada en diferentes códigos (texto, imagen, sonido,...). El elemento más representativo de las nuevas tecnologías es sin duda el ordenador y más específicamente, Internet. Como indican diferentes autores, Internet supone un salto cualitativo de gran magnitud, cambiando y redefiniendo los modos de conocer y relacionarse del hombre.<sup>9,10</sup>

## Clasificación

Podemos diferenciar los programas y recursos que podemos utilizar con el ordenador en dos grandes categorías:



1. recursos informáticos: nos permiten realizar el procesamiento y tratamiento de la información
2. recursos telemáticos: Internet, orientados a la comunicación y el acceso a la información<sup>11</sup>

## Aplicaciones informativas

Las aplicaciones o programas que podemos utilizar con el ordenador en algunos casos no requieren el uso de las redes de comunicación, sino que están diseñados para su uso de forma local. Estas aplicaciones informáticas están bastante extendidas, siendo las más utilizadas por los usuarios principalmente las aplicaciones informáticas (procesador de texto, hoja de cálculo, gestor de bases de datos, etc.), que se adaptan a las necesidades de usuarios de diferentes ámbitos y profesiones. No obstante, podemos encontrar otras aplicaciones que son utilizadas en ámbitos más específicos o concretos (p. ej., aplicaciones estadísticas, contabilidad, gestión, medicina).<sup>10-12</sup>

## Recursos telemáticos

Las redes de comunicación tanto si son globales y públicas (Internet) como locales y privadas (Intranet) nos permiten conectar un ordenador cliente a un servidor a través del cual podemos acceder a la información de los diferentes nodos de la red. Ejemplo de ellas: comunicación asíncrona, acceso, obtención y utilización de información y/o recursos, comunicación síncrona, telemáticas, correo electrónico (*email*), listas de distribución, grupos de noticias, transferencia de ficheros, telnet, páginas web, charlas, audioconferencia y videoconferencia.<sup>10,12,13</sup>

## Acceso a recursos

Mediante la *world wide web* accedemos al conjunto inmenso de páginas web, ubicadas en servidores de todo el mundo, que están conectados entre sí mediante la red Internet. El usuario necesita disponer de un programa informático (programa cliente) capaz de comunicarse con los servidores, para ello debe ser capaz de utilizar el protocolo http de comunicación. Las páginas web son básicamente aplicaciones multimedia interactivas, ya que se componen de hipertextos en los que se pueden incluir información con múltiples códigos (texto, imagen, sonido,...).<sup>14</sup>

El gran éxito de la web ha venido de la mano de la feliz unión de un protocolo de comunicación y un estándar de lenguaje que se ha extendido rápidamente y ha contribuido de forma decisiva a la incorporación de innumerables usuarios y proveedores de información en este nuevo entorno. Hoy en día, la comunicación asíncrona como acceso a la información es sinónimo de *www* y está incorporando cada vez mayor número de funcionalidades, e integrando otras herramientas como FTP (transferencia de archivos). Además, el simple acceso a la información está derivando hacia procesos de comunicación más complejos y sofisticados con la incorporación de herramientas de bases de datos, simuladores, etc., que proporcionan nuevas e importantes perspectivas de futuro en términos generales y también para la educación. Es sobradamente conocido el hecho de la gran cantidad de páginas a las que se puede acceder vía *www*, y la necesidad de utilizar *software* que nos permita localizar, de la forma eficiente y con gran rapidez, las páginas y sitios web en donde podemos encontrar la información o temática que nos interesa, con esta finalidad se han diseñado los "buscadores".<sup>14</sup>

Mediante FTP podemos intercambiar archivos entre un ordenador cliente y otro servidor, es decir, podemos enviar y copiar archivos desde nuestro ordenador personal a un ordenador remoto que actúa como servidor de Internet. También podemos llevar a cabo el proceso inverso, copiando en nuestro ordenador archivos almacenados en el servidor. Para acceder al ordenador remoto (servidor) se requiere la identificación mediante código de usuario y contraseña. Los privilegios de acceso vendrán determinados por el perfil de usuario que dispongamos.<sup>14</sup>

Telnet permite utilizar los recursos de un ordenador remoto, actuando nuestro ordenador personal como un terminal del ordenador remoto. Para ello, mediante un programa de emulación nos conectamos con el ordenador remoto, de forma que el usuario está utilizando el recurso del ordenador remoto desde su propio ordenador. Mediante Telnet se están utilizando programas, datos, espacio de trabajo, etc., en el ordenador central al que se ha accedido. El ordenador personal del usuario no hace otro trabajo que recibir y transmitir las informaciones a este ordenador central remoto.<sup>14</sup>

## Comunicación asíncrona

La comunicación no se establece en tiempo real.

**Correo electrónico.** Permite enviar y recibir información personalizada, intercambiando mensajes entre usuarios de ordenadores conectados a Internet. Presenta ciertas ventajas sobre otros sistemas de comunicación tradicional: rapidez, comodidad, economía, posibilidad de archivos adjuntos. Para poder utilizar este recurso de Internet los usuarios deben disponer de una dirección de correo electrónico y de un programa cliente de correo. La dirección de correo electrónico, suministrada al usuario por el proveedor de Internet, consta de cuatro elementos.<sup>14,15</sup>

**Listas de distribución.** Permite la formación de comunidades virtuales compuestas por grupos de personas que tienen intereses comunes, y que se comunican enviando su información a la dirección electrónica de la lista. El intercambio de la información se realiza a través del correo electrónico, de tal modo que los correos que llegan a la lista, son reenviados a los integrantes de la misma. La lista de distribución puede ser pública o privada y puede estar moderada o no tener ningún control.<sup>15</sup>

**Los grupos de noticias o foros de debate.** Pueden compararse a un tablón de anuncios en el que cualquier usuario puede enviar su comentario, respuesta o participación en un debate. Se asemeja, por tanto, a una discusión activa en línea en la que los participantes se incorporan en momentos diferentes y todos pueden seguir a través de los contenidos comunes que se van incorporando a tal discusión. Generalmente, no son moderados, por lo que la información que se transmite suele tener un carácter coloquial e informal. Dada la gran cantidad de mensajes que se reciben los grupos de noticias han sido clasificados por temas, existiendo en la actualidad más de 15 000 grupos dedicados a temas diferentes.<sup>15</sup>

## Comunicación síncrona

La comunicación se establece en tiempo real.

**Charlas.** Mediante esta herramienta se pueden establecer “charlas” entre dos o más usuarios de Internet. La comunicación es sincrónica, esto es, los usuarios que conversan lo hacen en tiempo real, por lo que tiene la característica de inmediatez en la comunicación que la asemeja a una conversación presencial, aunque los interlocutores pueden estar situados en cualquier parte del mundo. Las características propias de la actividad implicada por estas herramientas hacen

que la comunicación se condicione en cierto sentido. Por una parte, la agilidad de la conversación –aun utilizando el sonido, lo que es muy infrecuente todavía– hace que los mensajes sean cortos y tiendan a emplear formas especiales de codificación en la comunicación –símbolos que adquieren una especial significación abreviando una idea o una frase–. De otro lado, la ausencia de otros elementos de comunicación, que sí existen en la conversación presencial –lenguaje gestual, corporal, etc.–, provoca que éste tenga que introducirse de otra forma y/o altere de manera sustancial la comunicación. Es necesario para su correcto uso tener presente determinadas cuestiones relativas a la seguridad y privacidad.<sup>15</sup>

**Audioconferencia-Videoconferencia.** Mediante la audioconferencia o videoconferencia, un especialista en un tema puede pronunciar una conferencia que puede ser escuchada y visionada por un grupo de interlocutores, situados en diferentes lugares. La complejidad de estos sistemas y su costo hace que aún no sean utilizados habitualmente, no obstante, la integración de estas herramientas de comunicación en actividades educativas proporciona entornos más enriquecedores, principalmente en la enseñanza a distancia, facilitando la comunicación y la tutorización. Mediante la videoconferencia se consigue una mejor aproximación a la enseñanza presencial dentro del “aula”, sustituyendo este espacio físico por el “aula virtual” de la que forman parte todos los participantes en la videoconferencia.<sup>15</sup>

## Aplicación de TIC en medicina aeroespacial

La medicina en general se ha beneficiado con algunas tecnologías espaciales como la telemetría y la percepción remota, de tal manera que con ellas se pueden atender problemas de salud en tierra. Esta práctica generó la telemedicina o medicina a distancia. En 1975, la NASA realizó un primer experimento de atención médica masiva utilizando la telemetría, en las 83 comunidades que conforman la reservación indígena del Pápagó en Arizona. Durante dos años éstas recibieron la misma atención médica que se proporciona a los astronautas en el espacio, ya que las unidades móviles estaban dotadas con el equipo que se usa en misiones espaciales.<sup>16</sup>

**Medicina aeroespacial.** El organismo, en las condiciones que reinan en el espacio (microgravedad, etc.), tiene un funcionamiento diferente al que presenta en la superficie terrestre. La medicina espacial estudia la misma especie que la medicina “terrestre”, pero cuya fisiología se ve alterada por el medio espacial, volviendo de nuevo, al regresar a la Tierra, a las leyes fisiológicas que afectan al organismo en la superficie terrestre, tras un periodo de readaptación que depende de la duración de la estancia en el espacio (p. ej., recuperación progresiva de la función de la musculatura esquelética, etc.). Asimismo, el ambiente espacial constituye un magnífico laboratorio para investigaciones biomédicas imposibles de realizar bajo la influencia de la gravedad terrestre: no sólo la fisiología humana varía en condiciones de ingravidez, también cambian algunos procesos celulares. La microgravedad de los laboratorios orbitales permite la creación de moléculas de futuros nuevos fármacos imposibles de fabricar en la Tierra, pues la estructura molecular de los mismos no es posible crearla bajo los efectos de la gravedad terrestre, todo lo cual revela evidentes posibilidades de futuro para la farmacología.<sup>17</sup>

**Aplicación de la tecnología en la medicina aeroespacial.** La medicina es la segunda ciencia más beneficiada por la carrera espacial, después de la electrónica terrestre. La tecnología espacial, debido a la transferencia de tecnología a otros ámbitos de la vida, es muy importante en nuestras vidas; estos son algunos ejemplos:<sup>17</sup>

1. **Investigación en osteoporosis:** a partir del hecho de que en estado de ingravidez se produce una desmineralización ósea, surgen nuevas líneas de investigación en la materia
2. **Investigación de los efectos de las radiaciones sobre el cuerpo humano:** se están realizando estudios en microorganismos resistentes a las radiaciones para averiguar cómo protegen dichos seres vivos su DNA de las radiaciones, lo cual se aplicará en proteger al ser humano de los efectos de éstas. El estímulo para dicho estudio fue el hecho de comprobar un aumento en la incidencia de cáncer y catarata en astronautas de los viajes espaciales de los años 60 y 70. Especialmente sensibles a esas radiaciones fueron quienes viajaron a la Luna, al viajar más allá de los cinturones de radiación de Van Allen de la magnetosfera terrestre.

Por tanto, las expediciones espaciales tripuladas han planteado la necesidad de investigar en profundidad los efectos de las radiaciones sobre el organismo humano, lo que es especialmente importante para las futuras misiones a Marte en las que los astronautas estarán sometidos durante un tiempo mayor de exposición, y que al mayor tiempo de exposición hay que añadir el hecho de viajar fuera de la protección de la magnetosfera terrestre, por debajo de la cual se encuentra la órbita de la Estación Espacial Internacional<sup>18</sup>

3. **El cáncer no progresa en ingravidez:** desde la década de los años 70 se han realizado experimentos en el espacio que han puesto de manifiesto que las células cancerígenas no se multiplican en estado de ingravidez<sup>18</sup>
4. **Nuevas moléculas de fármacos:** en el estado de microgravedad del espacio se pueden sintetizar estructuras moleculares imposibles de conseguir en la gravedad terrestre<sup>18</sup>
5. **Parches transdérmicos:** los creó la NASA para solucionar el problema del mareo espacial de los astronautas. Posteriormente fueron apareciendo nuevas indicaciones terapéuticas. Cada vez es mayor el número de fármacos que se pueden administrar por dicha vía, y también es mayor el número de indicaciones: para la prevención de la angina de pecho, para el tratamiento del dolor crónico intenso, anticoncepción, nicotina para la deshabituación en el tabaquismo, tratamiento del parkinson, terapia hormonal sustitutiva en la menopausia, etc.

Otra razón por la que los parches se utilizan cada vez con más frecuencia en medicina radica en las ventajas y comodidad sobre otras vías de administración de medicamentos

6. **Telemedicina:** la telemedicina surgió del programa espacial al precisar los médicos espaciales el control de las funciones vitales del astronauta en sus viajes al espacio, ante el desconocimiento previo a los primeros viajes espaciales de cómo respondería el organismo ante dicho medio hostil. La telemetría no sólo tuvo una finalidad diagnóstica, sino también terapéutica, permitiendo dar instrucciones médicas, incluso quirúrgicas por técnicas de telemetría. A partir de estas técnicas diseñadas para el espacio, se pueden dar instrucciones médicas y quirúrgicas por telemetría en la Tierra a personal no sanitario en situaciones de emergencia y aislamiento en regiones apartadas para tratar una apendicitis, reducir una fractura o una luxación, realizar la extracción de piezas dentales, etc. En la NASA se realizan múltiples experimentos de telemedicina<sup>18</sup>
7. **Neurofisiología y neurología:** en estado de ingravidez se producen alteraciones en la fisiología del sistema nervioso, cuyo estudio tiene utilidad en el estudio general de la neurofisiología y neurología

8. **Estudios de la fisiología ocular:** en el estado de ingravidez se produce un aumento de la agudeza visual, que revierte al regresar a la Tierra
9. **Nuevos materiales empleados en prótesis traumatológica:** gran parte de las endoprótesis de traumatología están constituidas de titanio, metal cuya utilización se ha generalizado con el desarrollo de la tecnología espacial al soportar cambios muy extremos de temperatura, y tener una gran resistencia mecánica, siendo mucho más ligero que el acero. Además, es muy resistente a la corrosión.  
La gran ventaja de los materiales espaciales es su extraordinaria resistencia y ligereza en relación con los materiales convencionales, pues en el espacio el peso y la resistencia son muy importantes<sup>18</sup>
10. **Laparoscopias y artroscopias** son posibles gracias a las minicámaras que se desarrollaron para el programa espacial<sup>18</sup>
11. **Estudios sobre el envejecimiento:** se ha constatado una aceleración reversible del envejecimiento en las estancias de varios meses en el espacio, recuperándose transcurridos unos meses desde el regreso a la Tierra. La investigación sobre este fenómeno puede arrojar más información sobre el proceso del envejecimiento normal
12. **Avances en alimentos y nutrición,** así como en conservación y procesado de alimentos. La liofilización de alimentos se desarrolló para los primeros viajes espaciales tripulados. El horno microondas para calentar y cocinar alimentos se desarrolló por la NASA para que los astronautas pudieran ingerir alimentos calientes en el espacio<sup>18</sup>

**Transferencia de la tecnología.** La transferencia de tecnología desde la investigación espacial hacia el resto de la ciencia y de la tecnología ha hecho avanzar considerablemente la Ciencia y la Tecnología en general, y la Medicina y la fisiología en particular, todo lo cual ha cambiado la vida del ser humano hasta el extremo de que, de no haber existido la referida investigación espacial de estos últimos decenios, nuestra vida sería muy diferente, no disfrutando de muchos de los avances tecnológicos y médicos actuales. La investigación espacial ha mejorado la calidad de vida del ser humano. En definitiva, la fisiología y la medicina se han visto muy favorecidas por el desarrollo de los proyectos espaciales, del mismo modo que, en general, éstos han supuesto significativos avances para la ciencia y la tecnología, constituyendo un importante impulso para las mismas. Como complemento a la relación y revisión de avances en fisiología y en medicina derivados de la investigación espacial, es conveniente ilustrar, con una breve exposición, la transferencia de tecnología espacial a todo el ámbito científico y tecnológico, especialmente en lo relativo a los progresos tecnológicos secundarios a la tecnología espacial que inciden en nuestra vida cotidiana, mejorando la calidad de vida del ser humano, y cómo la investigación espacial ha constituido un importante impulso para el avance de la ciencia y la tecnología.<sup>19</sup>

Desde el momento en que la medicina se ocupa del ser humano y de su salud, es decir de su bienestar (definición de salud según la Organización Mundial de la Salud en su constitución de 1946: estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente la ausencia de infecciones o enfermedades), procede reseñar también lo que incide en dicho bienestar y mejora de la calidad de vida, como los avances técnicos y científicos que los han procurado. Entre ellos se encuentran los siguientes:<sup>18,19</sup>

- Progreso científico, tecnológico e industrial derivado de la investigación espacial
- Electrónica: los ingenios espaciales requerían la construcción de componentes electrónicos de unas dimensiones lo más reducidas posible, lo que desembocó en una auténtica revolución de la electrónica, especialmente en materia de miniaturización y de optimización. Fue, y reitero de nuevo, la ciencia más beneficiada por la Astronáutica. Esa miniaturización permitió la aparición de los ordenadores personales, los teléfonos móviles (la tecnología digital de los mismos procede de la de las cápsulas Apolo de los años sesenta), la amplia gama de aparatos y dispositivos electrónicos existentes en la actualidad, por ejemplo, las minicámaras empleadas en cirugía laparoscópica y artroscópica, etc., los circuitos electrónicos de los ingenios espaciales, para poder resistir los elevados niveles de radiación cósmica y solar. Dicha tecnología espacial de endurecimiento de los circuitos electrónicos se aplicó posteriormente a los aparatos electrónicos de nuestra vida cotidiana para impedir las interferencias entre el reloj, el teléfono móvil, el ordenador y otros dispositivos electrónicos. En el futuro, el desarrollo de esta tecnología impedirá las interferencias de, por ejemplo, el teléfono móvil con los equipos electrónicos hospitalarios, entre otras aplicaciones
- Informática: los proyectos espaciales requirieron un importante desarrollo de la informática para poder llevarlos a cabo
- Avances en telecomunicaciones: el sistema que tienen las antenas del "rover" que se utiliza sobre la superficie del planeta Marte en las últimas misiones no tripuladas que se han enviado a dicho planeta, tienen un sistema mediante el cual pueden comunicar directamente desde Marte con la Tierra, resistiendo las condiciones medioambientales del Planeta rojo. Dicho sistema (más simplificado y económico) es el que se ha incorporado en los trenes de alta velocidad para poder instalar antenas en los mismos que permitan disponer de banda ancha de Internet durante todo el trayecto, incluidos los túneles
- Telecomunicaciones por satélite que permiten la fluidez e inmediatez en las comunicaciones transoceánicas, las emisiones intercontinentales de televisión, el funcionamiento de la Bolsa gracias a la intercomunicación de los valores bursátiles a escala mundial, etc.
- Otras aplicaciones de los imprescindibles satélites artificiales utilizamos en nuestra vida cotidiana: los sistemas de localización por satélite geostacionario (GPS), la telefonía móvil por satélite y la convencional, pues la red de antenas repetidoras en último extremo conectan con un satélite, el correo electrónico y la utilización de Internet, cuya implantación a escala global es sólo viable a través de las telecomunicaciones por satélite, el funcionamiento de la Bolsa gracias a la intercomunicación de los valores bursátiles a escala mundial, etc.
- Otras importantes aplicaciones de los satélites son: el estudio del medio ambiente y de los recursos naturales (tanto terrestres como oceánicos), etc.
- Avances en meteorología: con anterioridad a la era de los satélites meteorológicos era impensable que la meteorología pudiera llegar a la precisión actual en sus predicciones a corto plazo
- El estudio de otros planetas supone un marco de referencia imprescindible para aprender más sobre el nuestro, al constituir la única forma de poder tener un elemento de comparación. Por ejemplo, un magnífico laboratorio para estudiar el clima terrestre, además de los satélites artificiales que orbitan nuestro planeta, sería el estudio de la espectacular, complicada y gigantesca atmósfera de

Júpiter, cuyos procesos no tienen parangón en la Tierra por su magnitud, y que sirven para entender los fenómenos meteorológicos que se producen en nuestra comparativamente pequeña escala terrestre

- A partir de dichos conocimientos, y una vez extrapolados al modelo de la atmósfera terrestre, se obtendrá la tecnología suficiente como para controlar los ciclones y huracanes evitando sus catastróficos efectos. Entonces, el ser humano podrá empezar a dejar de ser víctima de la tiranía de la naturaleza, generadora de catástrofes y tragedias humanas (se podrá, en un futuro lejano, mejorar artificial y deliberadamente el clima, para prevenir desastres al actuar sobre la génesis de los fenómenos atmosféricos de forma puntual, y quizá también luchar contra la desertización)
- Avances en cibernética (por la necesidad de progresar en materia de autómatas programables para la infinidad de sistemas automáticos de los vehículos espaciales)
- Avances en fotografía: objetivo fotográfico especial usado en el Proyecto Apolo para poder filmar y fotografiar con poca luz. Posteriormente se incorporó a las cámaras convencionales
- Helio 3: sólo existen grandes cantidades de helio 3 en la Luna. Una tonelada del mismo producirá la cantidad de energía que consume actualmente Estados Unidos durante un año, cuando se termine de desarrollar la tecnología de la fusión nuclear (que es la forma como el Sol produce su energía, la cual nos llega a la Tierra). Téngase en cuenta que Estados Unidos utiliza 25% de la energía mundial, con lo que con cuatro toneladas sería suficiente para todo el consumo mundial de energía durante un año al ritmo actual
- Avances en Tribología, que es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación de, por ejemplo, los motores. En Astronáutica se han conseguido sistemas de lubricación que mantienen lubricados ininterrumpidamente durante 15 años los componentes mecánicos de los satélites, cuyos elementos tienen un movimiento prácticamente continuo. Dicha tecnología se podrá aplicar a los automóviles y a cualquier otro motor, lo que prolongará la vida útil de los mismos, simplificando, además, el mantenimiento y mejorará el rendimiento
- Avances en la escritura manual. Dado que los bolígrafos convencionales no funcionaban en el espacio al no “caer” la tinta hacia la punta del mismo a causa de la ausencia de gravedad, en la NASA se diseñaron bolígrafos en cuya carga se bombea la tinta para poder escribir en el estado de microgravedad espacial
- Estudios del subsuelo terrestre: por ejemplo, mediante el satélite GRACE, de la NASA, que dispone de radares de gravedad y subsuelo
- Satélites de detección de incendios por infrarrojos, gracias a los cuales se ha acortado el tiempo de respuesta desde el inicio del incendio. El único inconveniente es que aún hay muy pocos, con lo que es todavía imposible abarcar todo el territorio en tiempo real
- Detección de NEO (*near earth object*): asteroides y cometas cuyas trayectorias se acercan a la de la órbita de la Tierra, algunas de cuyas órbitas tienen un punto de intersección con la de ésta
- Avances en aeronáutica: es especialmente importante destacar que en el futuro se conseguirá construir aviones no contaminantes, cuyo combustible será el hidrógeno, al igual que en el caso de los cohetes espaciales. El resultado de la combustión es vapor de agua, como las nubes

- Paneles solares fotovoltaicos de generación de energía eléctrica. Como es sabido, dichos paneles se diseñaron para los satélites artificiales, los cuales precisan un aporte de energía mantenido en el tiempo, por lo que se ideó este sistema para el autoabastecimiento continuo de energía<sup>19,20</sup>
- Muchas moléculas sólo pueden obtenerse o fabricarse en el estado de la microgravedad del espacio, además de las de nuevos fármacos (lo cual ya se ha comentado), también se pueden construir nuevos materiales como el acero poroso (de menor peso que el acero convencional, pero con la misma resistencia), componentes electrónicos, etc. La investigación espacial ha impulsado el estudio de la resistencia de materiales, cuyos resultados se han empleado en el diseño de las prótesis de traumatología<sup>19,20</sup>
- El titanio: no olvidemos que si hoy en día se utiliza el titanio en muchos contextos de la vida, es gracias a la investigación espacial, que desarrolló múltiples aplicaciones de este metal (como la ya comentada de las prótesis de traumatología), el cual es apto para resistir las temperaturas extremas de frío y calor del espacio<sup>19,20</sup>
- El piroceram forma parte del revestimiento externo de algunos cohetes y, tras su uso para el espacio, se aplicó a la vida cotidiana al ser el elemento del cual están fabricadas las fuentes transparentes y resistentes a altas temperaturas usadas en la cocina, las ventanas del horno, las de las chimeneas de leña y de las estufas, las de los aparatos de rayos U.V.A., etc. (El piroceram es una especie de cristal cerámico transparente con un coeficiente de dilatación cercano a cero, y por tanto resistente a bruscas oscilaciones térmicas, desde altas temperaturas al frío y viceversa). Por otra parte, se idearon igualmente minicámaras para las misiones espaciales; pues bien, las laparoscopias y artroscopias son posibles gracias a esas minicámaras del programa espacial<sup>19,20</sup>
- Utilización en nuestra vida cotidiana de algunos inventos originalmente ajenos a la carrera espacial que se empezaron a emplear para los proyectos espaciales al crearse la necesidad de su uso y que posteriormente se utilizaron en la vida diaria de los ciudadanos. Por ejemplo, el teflón que se utilizó en el revestimiento externo de los cohetes espaciales, después de lo cual se empleó en la fabricación de sartenes antiadherentes<sup>19,20</sup>
- Cierres tipo velcro, que el programa espacial sacó igualmente del reino de los inventos inútiles, al utilizarlo profusamente en el interior de las naves espaciales como medio de sujeción de múltiples objetos en el ambiente de microgravedad del espacio, evitando así que deambulen a la deriva. A partir de dicho uso para el espacio, empezó a emplearse en la indumentaria deportiva, incluso en la ropa urbana, en las bolsas de deporte, correas de todo tipo, etc.<sup>19,23</sup>

El programa espacial ha generado la colaboración entre científicos e ingenieros de élite de todos los campos nunca vista fuera del ámbito espacial, lo que ha permitido una increíble interacción entre las diferentes áreas de la ciencia y la tecnología.<sup>22,24</sup>

## Conclusiones

En realidad, vivimos en el espacio: la Tierra es una “burbuja” que viaja por el cosmos, en la cual ha surgido la vida, protegida por la atmósfera. La utilización adecuada del espacio proporcionará un desarrollo sostenible en la Tierra. Muchas entidades dedicadas al ámbito espacial se ocupan



de estudiar nuevas aplicaciones de la tecnología espacial a la vida cotidiana en la superficie de la Tierra por transferencia de tecnología de aquello que se construye para el espacio. En definitiva, es el consabido y tantas veces comentado en medios científicos: *aprovechamiento del espacio extraterrestre para nuestras condiciones de vida en la Tierra*.<sup>25</sup>

Muchas empresas han desarrollado productos derivados de tecnologías que han tenido sus orígenes en la industria aeroespacial y de las que se están beneficiando los consumidores, la mayoría de ellos sin saberlo. Existen más de 1 750 ejemplos de productos derivados de tecnologías de la NASA que no sólo han mejorado la vida de las personas, sino que han creado empleos y generado beneficios económicos para las empresas que los han comercializado. La NASA no fabrica ni comercializa directamente estos productos, pero muchas empresas públicas y privadas adoptan estas tecnologías de la agencia espacial para desarrollar productos comerciales en áreas como la medicina, el transporte, la seguridad, la energía, el medio ambiente, la tecnología de la información y la producción industrial. Muchas de las tecnologías que ha desarrollado la NASA se han utilizado para mejorar la seguridad del instrumental de alta precisión para el tratamiento de enfermedades.

*"Mientras exploramos nuevas formas de ofrecer cuidados médicos al personal de la estación espacial, también exploramos nuevos métodos para diagnosticar los problemas de salud de personas en la Tierra que viven a cientos de kilómetros del médico o del hospital más cercano".<sup>25,26</sup>*

# Referencias

1. Bautista A, Alba C. "¿Qué es tecnología educativa?: autores y significados", Revista Pixel-bit 1997;9, 4. <http://www.us.es/pixelbit/art94.htm>
2. Cabero J. (1998) Impacto de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación en las organizaciones educativas. En: Lorenzo M y otros (coord). Enfoques en la organización y dirección de instituciones educativas formales y no formales (pp. 197-206). Granada: Grupo Editorial Universitario.
3. Almenara C, Barroso J, Romero R, Llorente M, Roman G. Definición de nuevas tecnologías [en línea] OCV de la Universidad de Sevilla, Facultad de Ciencias de la Educación. España. [[http://ocwus.us.es/didactica-y-organizacion-escolar/nuevas-tecnologias-aplicadas-a-la-educacion/NTAE/asigntae/apartados\\_NNTT/apartado3-2.asp.html](http://ocwus.us.es/didactica-y-organizacion-escolar/nuevas-tecnologias-aplicadas-a-la-educacion/NTAE/asigntae/apartados_NNTT/apartado3-2.asp.html) (junio 2009)].
4. Apri D. Working Party on indicators for the information society: classifying information and communication technology (ICT) Services. OECD - Committee for Information, Computer and Communications Policy [[http://www.oilis.oecd.org/olis/2001/doc.nsf/LinkTo/NT00004D5E/\\$FILE/JT00114257.PDF](http://www.oilis.oecd.org/olis/2001/doc.nsf/LinkTo/NT00004D5E/$FILE/JT00114257.PDF) (junio de 2008)]
5. Fernández R. (2005) Marco conceptual de las nuevas tecnologías aplicadas a la educación [en línea] Universidad de Castilla-La 316 Zer 14-27 (2009), pp. 295-318 Mancha, España [<http://www.uclm.es/profesorado/ricardo/DefinicionesNNTT.html> (junio 2009)].
6. Gantz J. The diverse and exploding digital universe: An updated forecast of worldwide information growth through 2011 [en línea] 2008. International Data Corporation. Disponible en web: <http://www.emc.com/collateral/analyst-reports/diverse-exploding-digital-universe.pdf>
7. González A, Gisbert M, Guillen A. Hacia una definición de TIC. En: EDUTEC. Revista Electrónica de Tecnología Educativa. España: Universidad de las Islas Baleares [<http://edutec.perublogs.com/2006/07/Hacia-una-definicion-de-TIC.html> (junio de 2008)].
8. Govantes A. Retos y posibilidades que imponen las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones a la educación en los países del tercer mundo. En: Revista Digital de Educación y Nuevas Tecnologías [<http://contexto-educativo.com.ar/2001/2/nota-04.htm> (junio 2008)].
9. Lundvall L, Bengt A. National systems of innovation. Toward a theory of innovation and interactive learning. Pinter Publishers Zer 2009;4:295-318
10. Van Dijk, J, Hacker, Kenneth L. The digital divide as a complex and dynamic phenomenon. En: The Information Society, No. 19 Taylor & Francis Inc. [<http://web.nmsu.edu/~comstudy/tis.pdf> (junio 2008)].
11. Davis J, Johnson R, Stepanek J, Fogarty J. Fundamentals of aerospace medicine. Philadelphia: Williams & Wilkins; 2008. 2. Boeing statistical summary of commercial jet airplane accidents: worldwide operations 1959-2005.
12. National Transportation Safety Board. [www.nts.gov](http://www.nts.gov)
13. Federal Aviation Administration. [www.faa.gov](http://www.faa.gov)
14. Flight Safety Foundation. [www.flightsafety.org](http://www.flightsafety.org)
15. Rayman R. Aerospace medicine: Challenges and opportunities. Aviat Space Environ Med. 2005;76:992-6.
16. Burian B, Barshi I, Dismukes K. The challenge of aviation emergency and abnormal situation. NASA Ames Research Center. California 2005. 9.
17. Helmreich RL, Merritt AC. Culture at work in aviation and medicine. National, organizational and professional influences. Hampshire: Ashgate Publishing Co., 2005.
18. Mjos K. Basic cultural elements affecting the team function on the flight deck. The International Journal of Aviation Psychology. 2004;14:151-69.
19. Young L. Perception of the body in space: mechanisms. En: Darian-Smith I (ed). Handbook of physiology; section 1, the nervous system; volume III, sensory processes, part 2. Bethesda: American Physiological Society. 1984:1023-66.
20. Hammer L. Aeronautical Systems Division studies in weight-lessness: 1959-1960. Wright-Patterson Air Force Base, OH: Aeronautical Systems Division, Air Force Systems Command, United States Air Force; 1961. Wadd Technical Report 60-715.
21. Cabero J. Impacto de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación en las organizaciones educativas. En: Lorenzo M y otros (coord). Enfoques en la organización y dirección de instituciones educativas formales y no formales. Granada: Grupo Editorial Universitario. 1998:197-206.
22. Kranzberg M. "Science-Technology-Society: It's as Simple as XYZ!". Theory into Practice. 1984;2:4-9.
23. Committee on Creating a Vision for Space Medicine During Travel Beyond Earth Orbit, Board on Health Sciences Policy, Institute of Medicine. Safe Passage: Astronaut Care for Exploration Missions. En: Ball JR, Evans CH Jr (ed). Washington, DC: National Academy Press; 2005.
24. Ray P. Emergency Egress Requirements for Space Station Freedom NASA Research Report-NASA/CR-184253, Publication N92-15850, October 1991, pp. JJ 1-4. NASA/ASEE Summer Faculty Fellowship Program, 1991. University of Alabama, Huntsville, Alabama.
25. Billica RD, Doam CR. A health maintenance facility for space station Freedom. Cutis. 1991;48:315-8.
26. Bergin KG. The medical problems of space flight. Nurs Times. 1971;67:787-9.
27. Space Studies Board: National Research Council. A Strategy for Research in Space Biology and Medicine in the New Century. Washington, DC: National Academy Press; 1998.
28. Santy PA, Bungo MW. Pharmacologic considerations for shuttle astronauts. J Clin Pharmacol. 1991;31:931-3.



# 5. Telemedicina y medicina satelital

Juan Carlos Hernández Marroquín

## ■ Introducción

Hablar de Telemedicina no es nuevo, es hablar históricamente del aprovechamiento que las hoy conocidas “*Tecnologías de la información y comunicación*” (TIC) han ido desarrollando en cada época al mundo médico, con ello permitir que el profesional de primer nivel de atención conecte comunidades y sitios geográficos remotos con sitios donde existe infraestructura médica de alta tecnología como lo sería profesionales de segundo y tercer niveles de atención médica. Todo ello en beneficio de una atención expedita y de calidad para los pacientes.

Gracias a los datos y referencias que hoy se encuentran disponibles en Internet, es prácticamente imposible atribuir a alguien en específico el nacimiento de la telemedicina. Sin embargo, se dispone de información y aportes diversos de científicos de diversas áreas, singulares actores médicos y no médicos, así como diversos momentos históricos que han permitido su desarrollo y evolución. Sólo teniendo información sobre el contexto histórico es factible entender el porqué del desarrollo particular de cada proyecto o programa de telemedicina.

Sin el propósito de hacer omisiones, a grandes rasgos podemos enlistar algunos desarrollos en telemedicina muy puntuales, así como su evolución histórica en el contexto mundial y en nuestro país.

Bajo una visión académica, se decidió hacer una revisión de bibliografía vía EBSCO®, y Thomson Reuters®, por considerarlas bases de datos serias. Sin embargo, las palabras clave, que se observaron en los artículos iniciales publicados, dieron pie a hacer un seguimiento de ellas adecuándolas a búsquedas nuevas. Se observó que habría que hacer separación de lapsos específicos de búsqueda, dependiendo de las palabras clave, lo cual correlacionaría con el contexto de los avances médicos y tecnológicos de la época.

Queda claro que el inicio de los grandes desarrollos de la telemedicina se fueron dando en paralelo al desarrollo aeroespacial, como parte del insoslayable monitoreo médico de los astronautas. En el caso de los desarrollos estadounidenses, el inicio de la serie Apolo®, por la década de los sesenta del siglo pasado, dan muestra de ello. Si bien algunos dispositivos formaron parte de secreto industrial, no podemos dejar de ver cómo en 1968, el médico mexicano Ramiro Iglesias Leal, en el invierno de ese año, durante su entrenamiento en la National Aeronautics and Space Administration (NASA), estando al cuidado de la consola médica, recibió el primer electrocardiograma de un astronauta de la tripulación desde la órbita del Apolo 8, dando inicio práctico a la Telecardiología.

Sin embargo, en paralelo, podemos citar como la primera comunicación de información médica en medios masivos, la publicación de O'keefe en 1970.<sup>1</sup> Publicando en *Communication &*

Mass Media Complete®. Medio totalmente ajeno a la literatura médica, como la conocemos hoy en día. Por otro lado, se tiene referencia que hacia 1972, Thomas Reed Willemain,<sup>2</sup> encabezando a un equipo de ingenieros publica un breve trabajo desde el Massachusetts Institute of Technology® (MIT) relacionado con investigación de operaciones y análisis de uso de redes para salud.

Era de esperarse, dado el desarrollo espacial, avances inmediatos en telecardiología, tan es así, que en la revista *Chest*® se publica el primer artículo publicado por Bird<sup>3</sup> en 1972, sobre cuidados cardiovasculares utilizando la televisión interactiva.

Apenas dos años después, en 1974, Park<sup>4</sup> auspiciado por la Fundación Rockefeller®, publica un primer texto relacionando el tema de telemedicina con una televisión interactiva para proporcionar servicios de salud.

Se pueden contabilizar para el periodo de 1960 a 1984, sólo 21 artículos con las palabras clave: *telemedicine, network, patient, health*. En este primer lapso de revisión, sólo se encontró en 1975 un artículo de revisión, por Park y Bashur<sup>5</sup> en el *Journal of Communication*®.

Hechos paralelos insoslayables:

- 1782. Publicación de materiales autoinstruccionales de educación a distancia
- 1844. Nace telégrafo, llevando algunos mensajes con información médica
- 1876. Nace el teléfono fijo a domicilios
- 1906. Nace la industria de la radio
- 1923. Primeras transmisiones por televisión
- 1943. Primeras computadoras profesionales
- 1952. Primeras computadoras en procesamiento en estudios de laboratorio médico
- 1957. URSS lanza su primer satélite
- 1960. Estados Unidos inicia carrera espacial
- 1960. Se venden los primeros equipos de salón para videoconferencia
- 1962. Creación de ARPANET®, como primer proyecto internacional de redes de trabajo
- 1970. Primeros usos de la fibra óptica
- 1972. Desarrollo del correo electrónico
- 1972. Radiolocalización de personas y médicos, a través de los llamados *beepers*
- 1974. Nacimiento de Internet
- 1976. Se genera el sistema SNOMED® por computadora para el tema de Patología quirúrgica y su transmisión a redes de trabajo
- 1978. Surge como disciplina profesional, la Informática y las telecomunicaciones
- 1979. Desarrollo de módems de comunicación
- 1979. Surge la empresa CompuServe® para dar servicio de correo electrónico e Internet en forma pública
- 1980. La National Library of Medicine® (NLM) patrocina rotación de residentes de Patología del General Mass Hospital, por laboratorios de Informática médica
- 1981. Primera computadora personal de IBM®
- 1982. Desarrollo de protocolos de trabajo basados en TCP/IP
- 1983. Primeros teléfonos celulares
- 1984. La empresa Telehealth® emplea televisores hospitalarios en circuito cerrado

Para el periodo de 1984 a 1990, al buscar bibliografía, la palabra *Telemedicine* se relaciona además de los descriptores ya mencionados, ahora con: *physician, patient y television in education*. Sólo se encontraron 8 artículos de tipo descriptivo, y una revisión generada en Ontario, Canadá, introduciendo por Higgins<sup>6</sup> los términos de *Healthcare, hospitals y rural environment*. Se publica en un medio no médico, como lo sería la revista *Información Science & Technology*<sup>6</sup>. El único artículo de revisión publicado por Greenberger<sup>7</sup> en 1989, se publicó nuevamente en *Journal of Communication*<sup>6</sup> pero con un enfoque en el campo de la investigación educativa.

A finales de 1990, las nuevas palabras clave fueron: *Information technology, medical care for the aged, telephone, telecommunication in medicine, audiotex*

En simultáneo, en el mundo sucedía:

- 1988. Primer enlace transoceánico de fibra óptica
- 1989. Introducción de las Tecnologías de información y comunicación (TIC) a las primeras escuelas primarias
- 1990. Rastreo de vehículos vía satelital
- 1990. Se publica en la revista JAMA<sup>6</sup>, que la informática se considera una subespecialidad médica
- 1990. Servidores para almacenaje de información en ambiente www

De 1990 a 1994, se localizan en las bases de datos: 196 artículos y un artículo de revisión, siendo las palabras clave: *DATA transmission systems; TELECOMMUNICATION in medicine; ARTIFICIAL satellites in telecommunication; ELECTRONIC systems; MEDICAL telematics; COMPUTER networks; Satellite Telecommunications; Computer Systems Design Service*

Un artículo clásico, ya multicitado de esta época es el trabajo de Hajime Murakami,<sup>8</sup> el cual versa sobre la transmisión de datos médicos utilizando enlaces satelitales.

En esta misma época, en la Universidad de Kansas, la figura del oncólogo Ace Allen<sup>9</sup> inicia la cadena de artículos sobre satisfacción del paciente que recibe servicios de Telemedicina, asociando con ello el trabajo de telemedicina y atención en clínicas rurales. Con esta publicación inicial, se abre el panorama hacia difusión de trabajos en revistas de salud pública, campo que no se había mencionado históricamente.

En el mundo se daba a conocer:

- 1991. Surge la world wide web<sup>6</sup>
- 1993. Surge Explorer<sup>6</sup> como primer navegador sobre Internet

Para el periodo de 1994 a 2000, hubo un *boom* respecto a publicaciones, encontrándose 1 948 artículos, y 128 revisiones, las nuevas palabras clave además de *telemedicine: Communication systems; TECHNOLOGICAL innovations, rural hospitals, managed care, mental health, feasibility, cost-effectiveness, acceptability*

En este prolífico lapso, surge la correlación con *Medicina Familiar, Radiología* y en 1993 1994 a partir de un conflicto y respuesta internacional ante desastres: Houtchens<sup>10</sup> publica el tema de *interconsulta en casos de desastre*. Hacia 1999 en el continente africano, varios autores como Moahi<sup>11</sup> empiezan a reportar desarrollo de redes de trabajo en telesalud. Los avances en paralelo:

- 1995. Surge la primera red social "Classmates<sup>6</sup>"
- 1996. Se generan los primeros microscopios médicos virtuales

- 1996. Hotmail® se posiciona como la primera empresa de correo electrónico
- 1997. Telehealth® se alía con empresa de televisión de paga Directv® y genera canales de televisión para pacientes
- 1997. Surgen las consolas de videojuegos
- 1998. Primeros prototipos de *wearables* personales médicos
- 1999. Mensajería instantánea vía Microsoft®
- 1999. Surgen los primeros blogs
- 2000. Rastreo y servicio de alarmas en domicilios particulares
- 2000. Se posiciona Google® como el mejor navegador en Internet

Del año 2000 al 2004 se publican 3 035 artículos y 47 revisiones, las nuevas palabras clave: *emergency, diversity, multi-center, home health, integration, connectivity, PATIENT monitoring; business models, cost-benefits analysis, rural, value chain analysis*. El mundo conocía sobre:

- 2001. Primeros Ipods®
- 2003. Nace LinkedIn® como la primera red social profesional
- 2004. Nace Facebook®

Del año 2004 a la fecha, los descriptores que se agregan son: *computerized, decision support, information systems, medical records, primary health*.

Del 2004 al 2010, existen 8 562 artículos y 206 revisiones, se introducen gran cantidad de trabajos en lo que respecta al papel de enfermeras en *Telemedicina, teleasistencia y telehomecare*, sobre todo europeos, así como atención de urgencias. Desde el 2007, se habla ya de nuevos modelos y tendencias en atención médica con apoyo de los nuevos dispositivos que hoy conocemos como “*wearables*”

A partir del 2007, y de las publicaciones de Gagnon,<sup>12</sup> así como de una serie de autores latinoamericanos, se menciona ya el término Telesalud y bienestar, como algo más que telemedicina, es decir todo el concepto de atención integral del paciente.

En ese mismo año Jaana<sup>13</sup> y su grupo, evalúan el telemonitoreo de pacientes diabéticos, publicando interesantes conclusiones a través del seguimiento con videoconferencia y algunos dispositivos. Esto genera un parteaguas médico, el llamado *telemonitoreo de enfermedades crónico-degenerativas*.

Los nuevos descriptores en varias publicaciones: *consumer health, focus group, stakeholders, legislación* es el descriptor constante en los últimos 5 a 8 años. En este punto, de gran importancia estratégica es voltear a ver a los grupos de interés o *stakeholders*, como grupo de influencia en temas de Telemedicina y bienestar, que en la actualidad tienen gran relevancia global.

En esos años, los desarrollos notables fueron:

- 2005, primeras plataformas de conectividad de sensores médicos y domiciliarios
- 2005. Nace Youtube®
- 2006. Nace Twitter®
- 2006. Nace el concepto de “Internet de las cosas”, conectando dispositivos en el hogar, portables, en computadoras y hacia el medio ambiente
- 2007. Se incorpora GPS a teléfonos celulares

- 2008. Se vende el primer smartphone iPhone®
- 2009. Se vende la primera tablet Ipad®
- 2010. Conectividad de relojes, televisores y refrigeradores hacia Internet

Para los años más recientes, considerando del 2011 al 2016, se han localizado hasta el momento 14 054 artículos y 326 revisiones. Llama la atención en 2011 la primera revisión sobre *estilo de vida y control remoto de enfermedades* como lo menciona el trabajo de Brownsell.<sup>14</sup>

Es en los últimos cinco años, que podemos hablar de bibliografía relacionada con “*wearables*”, prueba de ello, los 219 artículos de los cuales sólo dos son revisiones, queda claro, el tiempo aún es breve para hacer revisiones de experiencias de las más recientes tecnologías en medicina. Sin embargo, si estos proyectos llegan a procesar la información de sus pacientes bajo el ambiente *Big data*, en breve podríamos tener resultados muy interesantes, de tipo predictivo y con ello dar paso a escenarios de Medicina preventiva, más que curativa.

Desarrollos importantes para la Telemedicina en un eje transversal

- 2012. Surgen las bandas y relojes para medición de constantes vitales con fines de monitoreo en ejercicio
- 2013. Proyecto Google Glass®
- 2013. Laboratorios médicos difunden sensores y pupilentes con capacidad de conectarse a Internet
- 2013. Se utiliza el término “cloud®” o nube para resguardo de archivos en Internet
- 2013. Concepto de sociedad inteligente a través de: automóvil inteligente, más edificio inteligente, más hogar inteligente, más empresa inteligente y servicios municipales inteligentes
- 2014. Primeros proyectos de Internet de las cosas con fines médicos en ropa de personas (textiles)
- 2015. Se registran diversas tecnologías como sensores para monitoreo de constantes vitales humanas
- 2015. Existen 25 billones de objetos conectados a Internet
- 2015. Se especula que para el 2020 habrá 50 billones de objetos conectados a Internet, bajo el tema “Internet de las cosas”

## Definición

Si bien existen diversos enfoques en la definición de lo que es Telemedicina, dejaremos en el presente texto el comentario imparcial que en 1994-1995 difunde la Organización Mundial de la Salud (OMS):

*“The delivery of health care services, where distance is a critical factor, by all health care professionals using information and communication technologies for the exchange of valid information for diagnosis, treatment and prevention of disease and injuries, research and evaluation, and for the continuing education of health care providers, all in the interests of advancing the health of individuals and their communities.”*

En forma intencionada, se contabilizaron los artículos publicados sobre Telemedicina en general de 1994, fecha en que la OMS publica su definición de Telemedicina, hasta enero de 2016, encontrando 25 398 artículos en revistas indexadas y 197 revisiones sistemáticas. De la



cifra mencionada, cabe aclarar, sólo 18 708 artículos (73.6%) han sido publicados en revistas académicas de tipo exclusivamente médicas.

Finalmente, a la bibliografía mexicana se le contabilizan exclusivamente 40 publicaciones en el mismo lapso, sin duda, mucho pendiente por reportar, pues el trabajo día a día se realiza en todo el país.

## Revistas especializadas

Es válido publicar experiencias en cualquier revista académica, sin embargo, queda claro que la visibilidad, lectura y difusión de sus experiencias, es mayor cuando se publica en revistas indexadas especializadas en Telemedicina.

Las revistas indexadas y especializadas en este tema, se enlistan en el Cuadro 5.1.

## Evolución de la Telemedicina

Para hablar de eras, etapas, generaciones o evolución de la Telemedicina, es necesario comentar la innovación paralela de nuevas tecnologías médicas y no médicas (Cuadro 5.2).

En paralelo, se han identificado por Cenetec<sup>®</sup> ocho dimensiones en las cuales las llamadas TIC son útiles al ámbito médico y la Telemedicina: acceso, eficacia, eficiencia, calidad, seguridad, generación de conocimiento, economía e integración.

No se debe dejar a un lado, que dentro del Programa Nacional de Telesalud desarrollado por la Secretaría de Salud–Cenetec dentro de un ambiente de multidisciplinariedad y transdisciplinariedad establece los siguientes objetivos:

- Agregar a servicios de telemedicina la llamada teleeducación
- Utilizar telesalud como estrategia de medicina preventiva

### Cuadro 5.1

#### Revistas en Telemedicina

Revista	Origen	Factor de impacto	Comentarios
<i>International Journal of Medical Informatics</i> <sup>®</sup>	1970 -	2.0	Primera revista especializada
<i>Telemedicine Today</i> <sup>®</sup>	1995-2002	1.3	Por el momento ha dejado de circular
<i>Journal of Telemedicine &amp; Telecare</i> <sup>®</sup>	1995 -	1.5	
<i>Telemedicine &amp; e-health</i> <sup>®</sup>	1995 -	1.6	
<i>Journal of Medical Internet Research</i> <sup>®</sup>	1995 -	3.4	En esta revista se publica más sobre Telemedicina

Elaboración propia

## Cuadro 5.2

### Eras de la Telemedicina

Etapa	Años	Característica
Analógica o preelectrónica	1960-1984	Soporte en medios de comunicación analógicos, satelitales y microondas, inicia uso masivo de computadoras
Electrónica	1984-1990	Utilización de Tecnologías de información y comunicación, así como servidores www, inicia la teleeducación y proyectos en comunidades rurales
Informática médica	1990-1994	Telecomunicación satelital, redes, uso masivo de Internet y correo electrónico
Socialización	1994-2000	Innovación, costo–efectividad, aceptabilidad de proyectos, desastres, Medicina familiar, colaboración vía redes sociales
Multidisciplinariedad	2001-2004	<i>Home health, monitoring, business model</i>
TIC	2005-2010	Toma de decisiones, uso masivo de TIC
Movilidad	2011-2016	Miniaturización de la tecnología, se abaten costos, Movilidad, <i>wearables</i> , monitoreo continuo, empoderamiento del paciente, responsabilidad social

Elaboración propia

- Selección y aplicación proactiva de nuevas tecnologías biomédicas
- Desarrollar el marco ético, normativo, legal de la telemedicina
- Aumentar la capacitación en el tema a diversos niveles tecnológicos

Justo en este orden de ideas, podemos asegurar que al presente, la Telemedicina agrupa a diversas disciplinas, innovadoras herramientas y nuevos paradigmas jamás imaginados. Dan cuenta de ello, la Teleadministración; el desarrollo continuo de aplicaciones móviles para *tablets*, *smartphones* y ahora *smartwatches*; el campo de la Medicina Logística; desarrollos en Domótica; nuevas líneas de investigación en Bioingeniería y Biométrica.

Qué decir de líneas de investigación en biochips y Nanotecnología que pueden dar lugar a la nueva Ingeniería de tejidos y trasplantes, Electromedicobiología y Farmacogenética.

No podemos olvidar los nuevos desarrollos en Impresión de objetos médicos en 3D que evolucionarán la medicina.

- Localización de pacientes vía GPS
- Textiles conectados (ropa inteligente)
- Uso de “*wearables*”

La Organización Mundial de la Salud,<sup>15</sup> por otro lado, ha hecho serias recomendaciones en el uso de la *Teleasistencia médica personalizada* en diferentes foros mundiales; haciendo hincapié en posible solución en países de medianos y bajos ingresos. Incluso generó una publicación en 2001, a modo de guía para identificar los factores de impacto de todo proyecto de Telemedicina.<sup>16</sup>

En abril del 2002, y nuevamente en el 2009, la Sociedad de la Información para América Latina y el Caribe: TIC, proponen un nuevo *marco institucional* para el desarrollo de trabajos regionales y empujar iniciativas de teleasistencia con fines de abatir costos y aumentar la cobertura preventiva de servicios médicos.<sup>17</sup>

En México, desde el año 2006, el Plan Nacional de Salud propone estrategias en este sector que no se han solucionado, pero que potencialmente pueden contar con el apoyo gubernamental. Se observa, es deseable generar nuevos modelos de salud que permitan la medicina preventiva personalizada y a la vez cumplan el reto de abatir costos. Esto se puede lograr, si se logra congelar ciertas variables: la autosustentabilidad del modelo y por supuesto la aceptación del paciente y sus familiares hacia la intervención de las Tecnologías de la información y la comunicación, en su vida diaria, en beneficio de su salud.

## ¿Qué áreas de la medicina facilitan la Telemedicina?

Para fines informáticos, los datos que se introducen son estrictamente formato de texto, imagen, audio y video. Inicialmente, esto facilitó el que se desarrollaran videoconferencias médicas interactivas. Debido al ancho de banda, y el costo de las telecomunicaciones, se crearon escenarios para atención de pacientes “en vivo”, o bien en la modalidad “*store & forward*”, cuando el personal de soporte al médico enviaba al sitio de interconsulta médica el expediente y algunas imágenes, audio o video del paciente. Ambos escenarios son válidos y lo importante es que se brinde la atención médica expedita y oportuna.

Por lo anterior, las especialidades médicas que utilizan en mayor medida imágenes, audio y video, fueron las primeras en aportar experiencias a la Telemedicina, de esta forma surge Telerradiología, Telecardiología, Teledermatología y apoyo psicológico. Posteriormente otras especialidades se han sumado a la lista. Incluso el apoyo en la atención de pacientes quirúrgicos, se genera ya sea a través del uso de robot quirúrgico o simplemente como *teleasistencia quirúrgica* por videoconferencia, dentro del quirófano.

Sin embargo, los estándares para la transmisión, compresión de datos y cifrado del expediente médico, fueron dando lugar a los estándares internacionales DICOM® y HL7®, por mencionar algunos. En nuestro país, la Norma Oficial Mexicana 024,<sup>18</sup> abonó mucho al tema del expediente médico electrónico. Desde luego, este camino se logró gracias al trabajo de varios grupos generados en Cenetec®, Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE), de la asesoría de la Academia Nacional de Medicina, la Academia Mexicana de Cirugía, hospitales, institutos de salud y diversas universidades.

Desde el 2004, Cenetec® ha hecho un gran trabajo llevando a cabo sesiones de capacitación entre responsables de Telemedicina en cada estado del país. Evaluando tecnologías en salud, generando Guías de práctica clínica y estandarizando los elementos mínimos que se deben contemplar para poder generar teleconsultas médicas en instalaciones adecuadas, diseñadas *ex profeso*. En cuanto al equipamiento ya se tiene un listado de equipo básico y sus lineamientos informáticos.

Del mismo modo, en sus escasos 11 años de vida, da cuenta de exitosos seminarios y congresos anuales. Con ello, el papel de México se ha fortalecido al tener ya alianzas estratégicas con organismos internacionales.

Por otro lado, iniciativas personales han generado la Asociación Mexicana de Telemedicina y Telecirugía, la Asociación Mexicana de Telesalud, Asociación Mexicana de Informática Médica y recientemente la Sociedad Mexicana de Medicina del Espacio y Microgravedad (SoMMEM), situación que refleja la efervescencia y el impulso que desde diferentes iniciativas quieren apuntalar al tema

Telemedicina. Sin duda, es el momento de articular y sumar esfuerzos y voluntades para el bien común.

En diversos proyectos de Telemedicina, además de la práctica médica asistencial, es natural que se desarrollen otras áreas estratégicas como sería: Teleadministración del proyecto, Teleeducación, o Apoyo en situaciones de desastre. A este respecto, podemos comentar que en el área administrativa se puede supervisar y asesorar todas las actividades bajo escenarios ya muy estandarizados. En el tema de desastres, el seguimiento de protocolos bajo estándares de instituciones internacionales ya está muy elaborado, el *triage* de pacientes sigue siendo el mismo. Aquí queda la supervisión por videoconferencia, lo cual es sencillo.

Los mayores cambios se dan en los últimos 20 años en el área educativa. Los primeros proyectos de Telemedicina y todavía hasta 2005 quizá, la plataforma principal era la videoconferencia interactiva, en tiempo real y el envío-recepción de presentaciones o tareas como archivos adjuntos en correo electrónico. Hoy, el escenario es diferente.

La teleeducación ha pasado por varias generaciones. La primera desde 1990 a 1994 aproximadamente, donde los contenidos quedaban a disposición en un sitio web. Segunda generación: a partir de 1998, cuando surgen los primeros sistemas de gestión del aprendizaje o los llamados LMS. Para el 2003, se desarrollan los llamados MLE o administración de entornos de aprendizaje en el cual se da el tratamiento ya para enseñanza hacia personas adultas. Es en 2006 que se desarrollan los llamados Entornos Personales de Aprendizaje o PLE. En 2009, la evolución de las redes sociales y las facilidades tecnológicas de colaboración o videoconferencia desde *smartphones* dan por consecuencia los CWE o Ambientes de Trabajo Colaborativo. Finalmente del 2012 a la fecha (sexta generación), los Entornos Adaptativos de Aprendizaje o ALE, son las plataformas que mediante aplicaciones o microsítios permiten desarrollar el aprendizaje del personal. Aquí el aprendizaje está centrado en el estudiante, se retroalimenta en forma personal, y puede ser básicamente de forma informal y permanente. Es percibido como un entorno dinámico, flexible, al ritmo del estudiante en el cual puede colaborar o hacer aportaciones de manera cooperativa. Finalmente es un ambiente de aprendizaje analítico/conectivo. Hoy por hoy, se utiliza un entorno de Internet tipo Web 3.0. Para los entregables, ya hay herramientas que facilitan el trabajo a través de *ePortafolios*.

El uso de redes sociales de tipo profesional es indispensable para la participación activa en estos entornos. En muchos de ellos, el enfoque es hacia las llamadas competencias. Los resultados de aprendizaje se difunden en microsítios de redes sociales públicas o bien especializadas. El tema de las fuentes de información podría discutirse a profundidad, pues en estos modelos, son válidas las aportaciones no sólo de fuentes secundarias arbitradas, sino también de fuentes primarias. Finalmente, una gran facilidad es el hecho de que los microsítios están desarrollados a través de aplicaciones bajo un entorno 100% móvil. Algunos ejemplos de ellos son: Udemy®, Coursera®, Moodle®, Floqq®, Educatina®, Coursistant®, iTunesU®, por mencionar las de uso más común.

## Internet de las cosas

Hacia 1999, investigadores del Massachusetts Institute of Technology® (MIT) trabajaban en protocolos de identificación de radiofrecuencias en red y diversos tipos de sensores. Estos trabajos iniciales redundaron en saber cómo conectar diversos objetos a Internet, para la recepción, transmisión y visualización de datos/información. Las ideas básicas del porqué y para qué conectar objetos a Internet, ha hecho que Internet evolucione, al grado de desarrollar y permitir que “*entornos ambientales conectados*” interactúen con las “*personas conectadas*” y generen aún más datos/información. Las cifras contundentes muestran que para el 2003, se conocía que habiendo 6.3 mil millones

de personas en el planeta, habría 500 millones de dispositivos conectados a Internet, lo cual daba una proporción de 0.08 dispositivos por persona, asumiendo que todas las personas se conectan por igual a Internet.<sup>19</sup> El cambio se da cuando los *smartphones* en 2007 y las *tablets* en 2009 hicieron su aparición. Es por ello, que en el 2010, había ya 6.8 mil millones de personas con 12.5 mil millones de dispositivos para una proporción de 1.84 por persona. Finalmente la proporción para el 2020 es de 6.58 dispositivos por persona, asumiendo que todos en el planeta están conectados a Internet.

## ¿Cuántas personas están “conectadas” en México?

Por un lado, el sitio oficial [www.mexicoconectado.gob.mx](http://www.mexicoconectado.gob.mx)<sup>20</sup> reporta que de acuerdo con la Reforma de Telecomunicaciones se ha dotado de conectividad y acceso a Internet a la ciudadanía, a través del programa México Conectado, con ello existen 100 mil sitios públicos que ya cuentan con Internet gratuito.

En lo referente a conexión a Internet de pago, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía® (INEGI) informa con base al documento “Estadísticas a propósito del Día Mundial del Internet 2015”<sup>21</sup> en su sitio [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx) que 44.4 % de la población en México de 6 o más años de edad, es usuaria de Internet, con una tasa de crecimiento de 12.5 % anual. El 74 % de los cibernautas tiene menos de 35 años, 34 % de los hogares tiene conexión a Internet. El grupo etario mayoritario de 12 a 17 años es usuario de Internet en un 80 %. Se sabe que el mayor uso en un 67.4 % es búsqueda de información de diversos tipos, seguida por un uso en 39.6 % de redes sociales. Finalmente se menciona en el documento que de acuerdo con cifras de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico® (OCDE), los hogares a nivel mundial tienen acceso a Internet en un 75.8 %, estando México en el lugar 33. Hay rezago, desde luego, que debe subsanarse para explotar al máximo las bondades de las TIC, no sólo en conectividad, sino en contenidos de alto valor para la población, siendo la salud tema prioritario.

Regresando al tema, es todo un reto generar la infraestructura de telecomunicaciones y hacer llegar con acciones de salud articuladas, los dispositivos que la población estará requiriendo, sobre todo con el crecimiento del grupo etario mayor a 50 años.

Si cada dispositivo de uso genérico puede conectarse al transporte, servicios municipales, árboles, plantas, pavimento, etc.; en otras palabras: educación, medioambiente, empresa, gobierno, energía, se crea el entorno para conocer en cada momento, cómo se comunica todo, miles de millones de datos por segundo, lo cual lleva a otros desarrollos informáticos: *Big data*®.

Desde luego, la infraestructura para soportar tal carga de dispositivos conectados tuvo un problema latente, las direcciones IPv4 disponibles, pues se necesitaría de direcciones asignadas. Problema que ya está en proceso de solución.

Si hablamos de la energía a consumir por estos dispositivos, podemos mencionar tan solo que por el tema de Responsabilidad social muy actual, se debe pensar en el uso de dispositivos autosustentables en términos de energía y lo menos contaminantes posible.<sup>22</sup> Para los pacientes hoy es factible ingerir dispositivos de Internet que ingresan a su cuerpo para ayudar a los médicos a diagnosticar y determinar las causas de ciertas enfermedades.

Si bien, hacemos un zoom global al desarrollo de estas tecnologías, entonces hablaremos del desarrollo de Domótica a través de biosensores biométricos, es decir aplicaciones para el hogar, bajo sensores específicos adheridos, deglutidos o colocados en las personas y pacientes. Nicho aún no explotado en México, y vamos hacia un panorama donde cada día tendremos más pacientes geriátricos y debemos contenerlos para evitar su hospitalización y sus consecuentes gastos catastróficos en salud.

En marzo de 2015, el Centro de innovación tecnológica de BBVA® publica en la Serie *Innovation trends*, que 44 % de las personas está muy interesada en este tipo de tecnologías “usables”, en un 45 % simplemente interesadas y utilizarlas a través de su automóvil en 43 %. Menciona el reporte que para monitoreo de la salud de pacientes crónicos se puede esperar interés en un 61 % de las personas.

La OCDE al analizar esta temática menciona, que en una familia de 4 personas, para el año 2012 tenían 4 dispositivos conectados en casa, para el 2017 tendrán 17 dispositivos y para el 2022 una familia de 4 integrantes podría tener hasta 50 dispositivos conectados.

Esto, en una visión cosmogónica general, puede ir generando definiciones hacia lo que se conocerá como *Smart home* y *Smart city*. Investigadores como los del grupo Wolfram® están generando proyectos interesantes a través de la cantidad de información *-big data®-* que generarán estos dispositivos.<sup>23</sup>

Por otro lado, estudios recientes enfocan su análisis al uso de la información que se genera en estos dispositivos,<sup>24</sup> que inicialmente han despertado el interés del monitoreo de signos vitales dedicados a personas que practican deporte en forma cotidiana. Las empresas *avant garde* en ello son los fabricantes de Fitbit® (Microsoft), Jawbone®, Runtastic® y Nike®, si bien Garmin® ya entró a la competencia. Todo ello a través de pulseras biométricas. En el lado de los *smartphones* Samsung e Iphone llevan la delantera a través de diversas aplicaciones solas o en conjunto con dispositivos tipo pulsera.

La información de todos estos *gadgets* debe tener medidas de seguridad, cifrado, comunicación restringida, etc. Aquí la importancia de además contar con el consentimiento informado como lo recomienda Cenetec® a través de la colección de documentos denominada Telesalud, específicamente en “Interoperabilidad de servicios móviles y uso de monitoreo basado en biosensores”.<sup>25</sup>

Hoy, no existe reportado en el país ni en la bibliografía internacional, un programa de Telemedicina que pretenda en una primera fase otorgar servicios de Teleconsulta clínica y monitoreo de pacientes a través de *wearables*, es en esta línea que podemos asegurar que las condiciones tecnológicas ya están dadas, esperemos la proactividad en este campo en el corto plazo. Algunas universidades ya trabajan en ello.

## **Big data**

La realidad de poder generar minuto a minuto exorbitantes cantidades de datos en forma de texto, imágenes, audio, video, etc., obliga a tener la tecnología para poder procesar estos datos en información útil, para poder llegar a toma de decisiones con la oportunidad del caso. Es indudable, que para el ser humano es imposible tomar decisiones inmediatas cuando se tienen incontables variables e interacciones entre sí. Hace tiempo, se sabía ya algo del tema con la llamada *Minería de datos*, en donde a partir de cierta logística, reglas matemáticas y ayuda de *software*, se generaban en tiempo real cubos de información, gráficas, y probabilidades de eventos.

Al presente, se habla de *Big data®* cuando se tiene además de las fuentes de información interconectadas, servidores y capacidad de cómputo para procesarlos y permitir no sólo su almacenamiento, sino emisión de soluciones, asociaciones, predicciones, y otros recursos.

Desde luego, sólo centros especializados pueden hacer “big data®” con sus características de la triple “V”: velocidad, volumen, variedad en los datos y ahora se agrega una “V” más: “valor”, por su transformación en información útil. Para las empresas informáticas, esto es un

nuevo nicho de negocio en prestación de servicios personalizados a partir de fuentes diversas de información.<sup>26</sup>

## ¿Cómo integrar *Big data*® a la Medicina?

Proporcionando almacenamiento de datos, procesamiento y capacidad de generar patrones de comportamiento sofisticados. Con todo ello, si un sistema de salud, sea público o privado, proporciona al paciente un dispositivo móvil a modo de sensor con capacidad de almacenar constantes vitales, esto redundará en información muy valiosa en términos de generalizar variables en determinadas comunidades de pacientes.

Justo es aquí donde el seguimiento de pacientes con Telemedicina y los llamados “*wearables*” cobran importancia. Desde el monitoreo de pacientes, hasta el desarrollo de modelos de salud de tipo preventivo. En el área de investigación, las ciencias básicas tendrán la solución inmediata a estudios multicéntricos bajo evidencia, todo gracias al procesamiento inmediato de datos.

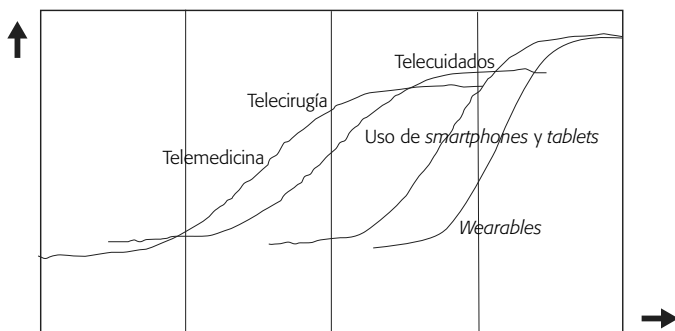
Por todo lo anterior, se habla de que el siguiente paso lógico en Medicina, será la llamada Medicina personalizada de precisión, lo cual no está alejado de la realidad.

¿Pero qué son los *wearables*?

## *Wearables*

El primer “*wearable*” lo desarrolló Steve Mann en la década de los setentas del siglo pasado, en la Universidad de Toronto. Se habla también de un reloj electrónico de la marca Casio®. Actualmente por *wearable* entendemos un dispositivo electrónico que se puede colocar sobre el paciente, llevar en la ropa, y últimamente insertar en el cuerpo del paciente, que permite registrar, visualizar e incluso enviar y recibir información en forma inalámbrica. El *wearable* permite en términos biométricos, obtener mediante diversos sensores, recabar señales: físicas, bioquímicas, eléctricas, humedad, presión, vibración, estrés y luz que pueden interpretarse como signos vitales del paciente.

En una visión global, los *wearables* se pueden utilizar en varios sectores que en términos de mercadotecnia y comercialización de productos actúan diferente, como sería: belleza, comunicación, estilo de vida, deportes, bienestar, seguridad y, por supuesto, el área de la salud.



**Figura 5.1.**  
Evolución de Telemedicina. (Elaboración propia.)

Es por demás interesante las interacciones que se pueden tener entre el usuario y el dispositivo. Acotando la disertación, en el área médica son útiles para toma de signos vitales, monitoreo de determinadas variables con ajuste de alarmas, despliegue de información médica en pantalla, implantes para seguimiento de enfermedades crónico-degenerativas o bien pacientes en situación de padecer cáncer, seguimiento de movimientos, localización geoespacial en caso de pacientes extraviados, por ejemplo con enfermedad de Alzheimer.

Como toda área tecnológica, está supeditada a un natural ciclo de vida y es aquí donde las tendencias hacia el uso de *wearables* tomará auge, según las previsiones (Figura 5.1).

¿Qué tan grande podría ser este mercado? Según el corporativo canadiense Vandrico<sup>®</sup>,<sup>27</sup> productor y distribuidor más grande del mundo actual de *wearables*, existen en el mercado 433 diferentes tipos de éstos, los cuales están categorizados en: entretenimiento, deportes, juegos, industriales, estilo de vida, mascotas y salud. En un 70 % los *wearables* del área médica están revisados de primera vez ya por la Federal and Drug Administration (FDA) o por su contraparte europea, a reserva de futuros estudios clínicos que aseguren su validez con fines médicos.

Los desarrollos a la fecha, según la región corporal son los mostrados en el Cuadro 5.1.

Hasta el momento, los más económicos son los que se utilizan en tórax, con un precio promedio de 92 USD y los más caros, los utilizados en ojos o piernas con un precio de hasta 1 944 dólares. Sin embargo, no hay que perder de vista que un dispositivo no sirve para nada, si no está conectado logísticamente con un médico y todo un sistema de salud. Hoy en día, es factible ver a personas en uso de ellos, sobre todo los utilizados para “ejercicio” y colocados en la muñeca o antebrazo, las personas observan el registro de sus constantes vitales, pero no interactúan con información y en no pocos casos, desconocen el significado de sus registros.

Por tal motivo, ahora el uso de *wearables* es la pauta que marca la evolución de la Telemedicina, llevar el registro y seguimiento de las constantes vitales del paciente, en el lapso entre dos teleconsultas médicas. Motivo ya, de protocolos innovadores de investigación.

Una variable que sabemos existe, pero que en la práctica requiere de mayores discusiones operativas, es el hecho de que debido a la *Ley de protección de datos personales*, emitida en el *Diario*

**Cuadro 5.1.**  
*Wearables* desarrollados para uso médico

Región	Desarrollos	Porcentaje
Cabeza	79	18.2
Cuello	14	3.2
Tórax	19	4.3
Abdomen	10	2.3
Torso	25	5.7
Piernas	12	2.7
Pies	12	2.7
Hombros	3	0.7
Brazo	12	2.7
Muñeca	203	46.8
Mano	7	1.6



*Oficial de la Federación* en 2010,<sup>28</sup> se debe procurar seguridad y cifrado de los datos de cualquier paciente, incluidos los datos obtenidos a través de los *wearables*, con igual importancia, es decir, tener el consentimiento informado para tal fin con la firma del paciente.

Si se habla en términos económicos, tan sólo para el 2013, el mercado de los *wearables* en Norteamérica estaba cuantificado en \$1.1 billones de dólares, para el 2014 había aumentado a 3.2 billones de dólares. Las tendencias marcan que para el 2019, el mercado será de \$18.8 billones.<sup>29</sup>

El reporte 2014 del Health Research Institute and Consumer Intelligence®<sup>30</sup> muestra cifras interesantes: los *wearables* de mayor uso serán los *smartphones* y las *bandas* utilizadas en la muñeca. Se reporta que en la población entrevistada, un 56 % considera que la gente mejorará sus signos vitales registrados y con ello disminuir riesgos en su salud. Al mismo tiempo, opinan que en un 46 % ayudará a abatir la obesidad y en 42 % mejorará las capacidades en cuanto a su desempeño al momento de hacer ejercicio. Se desea en forma general, que en un 75 % estos dispositivos ayuden a recolectar datos que contribuyan a mejorar la salud.

## Hacia la Medicina digital

Si al inicio del capítulo se observaba que la Telemedicina se desarrollaba gracias a las comunicaciones del teléfono, telégrafo, televisión interactiva y la videoconferencia, en pleno siglo XXI el paradigma es otro. La comunicación interactiva entre computadoras, dispositivos móviles y *wearables* genera múltiples vías alternativas de colaboración y de flujo de datos e información.

Los nuevos servicios médicos harán uso y acopio de información procesada por fuentes de información que antes se podrían considerar imposibles. Siendo ortodoxos o clásicos, hasta hace unos 10 años, la información de la historia clínica del paciente o bien su expediente médico era todo. Hoy es factible almacenar esta información en un expediente médico electrónico, que cumple ya la Norma Oficial Mexicana, con posibilidad de visualización y modificación en forma remota. Los dispositivos, *gadgets* o *wearables* como fuente de percepción de datos continua, suman variables al expediente médico, muchas veces sin percepción del propio profesional de la salud.

Qué decir de comunidades electrónicas de pacientes y su aprendizaje colaborativo, es decir estamos en un paradigma donde la voz de los llamados *stakeholders* es muy importante, pues es obvio su empoderamiento gracias al uso de redes sociales. La concientización del paciente en su enfermedad y tratamiento recibe gran influencia de actores no médicos pero que Internet ha puesto en la balanza.<sup>31</sup>

Aplicaciones médicas, para fines de ejercicio o dieta, abundan para su instalación gratuita o de muy bajo costo en dispositivos tipo *smartphones* o *tablets*. Sin embargo, de las 20 000 o más aplicaciones, se deben contemplar aquellas en las que la FDA<sup>32</sup> ya fijó alguna postura para su utilización. Esta información con la que los pacientes conviven día a día en sus dispositivos móviles, balancea la información que comunica y comparte el médico, cuando es visitado en su consultorio cada mes o cada tres meses. De aquí la importancia que el profesional de la salud juegue un rol de mayor autoridad, en términos de cercanía y acompañamiento del paciente.

La contratación de empresas dedicadas a *Big data*® estarán en pleno desarrollo y si existen proyectos estratégicos de monitoreo continuo, como apego al tratamiento farmacológico, etc., mucho se podría avanzar en escenarios de medicina preventiva personalizada y esto, también es Telemedicina.

Al presente, las barreras que menciona Healthcare Intelligence Network® (HIN), así como el Reporte 2012 de la OMS para el desarrollo de la Telesalud, siguen siendo las mismas que

se mencionan desde hace más de 15 años: costos, tema legal, retorno de la inversión, cultura, desarrollo de tecnologías de la información, infraestructura, política, privacidad de datos. Por ello, desde organismos como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe® (CEPAL)<sup>33</sup> y el Banco Interamericano de Desarrollo® (BID) se generan protocolos regionales para el desarrollo y apoyo a la Telesalud desde el 2010.

*La telemedicina no es Medicina a distancia, debe ser conceptualmente: Medicina sin distancia, con el monitoreo continuo...*

## Telemedicina aeroespacial

La carrera espacial desde 1960 a la fecha, ha traído en paralelo infinidad de desarrollos y patentes hacia el área médica, cuidados de la salud y la Telemedicina, públicamente en la herramienta “Google patents”, se pueden encontrar 9 738 patentes sobre el tema. Muchas de ellas ya en uso comercial como productos terrestres.

Si se habla de Medicina aeroespacial, los primeros experimentos desde 1930 hablan de esfuerzos por el aprendizaje de fisiología en condiciones de ingravidez. En 1949 se crea en Estados Unidos el primer departamento de Medicina aeroespacial, a la cabeza del doctor Srughold.

Hoy, mucho se ha avanzado en el conocimiento del hombre en condiciones de ingravidez, artículos muy serios se han escrito sobre fisiología respiratoria, alimentación y nutrición, higiene personal, condiciones extremas de temperatura, aceleraciones y ausencia de peso. Se ha estudiado efectos vestibulares, cardiopulmonares, control de líquidos corporales, cambios hematológicos e inmunológicos, modificaciones osteomusculares, exposición a radiaciones. Incluso se han llevado a cabo modelos de cirugía en ingravidez.

La Estación Espacial Internacional®, desde el año 2000 ha permitido estos avances, al llevar a cabo experimentos en sus tripulaciones. Sin embargo, una tarea pendiente que no debemos olvidar es el hecho que en el 2011, Dennis Tito fue el primer turista espacial; a la fecha al menos cinco personas más han repetido el viaje espacial. Por otro lado, ya existen al menos en el ámbito internacional, 20 empresas dedicadas a desarrollos para el turismo espacial. En otras palabras, debemos estar iniciando ya la capacitación en las escuelas de Medicina, para la formación de profesionales de la salud en materia de Telemedicina aeroespacial y terrestre que cuidarán de estos potenciales pacientes bajo condiciones fisiológicas diferentes a las terrestres.

Si bien en México ya existen diversos proyectos de Telemedicina, por instituciones públicas y privadas, y son 100 % operativas, las diversas universidades e institutos de investigación que desde el 2000 generaron proyectos, deben hoy jugar un papel protagónico en este tema. Básico será que asuman una visión interdisciplinaria y transdisciplinaria. Esfuerzos como los de la Universidad Nacional Autónoma de México®, en aquel Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Espacial® (PUIDE) ya terminado, y del actual Centro de Desarrollo Aeroespacial® del Instituto Politécnico Nacional y otras más, deben multiplicarse. A este respecto, muy productivo y loable que la Agencia Espacial Mexicana® a través de su área de Telesalud, recabe las experiencias pasadas y articule los esfuerzos que se realizan en México por diversos actores.

## Tendencias

- 2019. Sustitución de *wearables* por teléfono celular como vía de pagos y transacciones
- 2020. Los servicios de toda persona serán a través del resguardo de archivos en la nube
- 2024. Se transformará la adquisición de seguros médicos a partir del escaneo del fondo de ojo
- 2025. Reconocimiento del pensamiento vía informática

## Conclusiones

Las disciplinas, tecnologías y herramientas que acompañan a la Telemedicina en pleno siglo XXI, generan nuevos paradigmas en la operación cotidiana al momento de otorgar consultas médicas a distancia. El médico ya no juega el papel principal, ahora es un escenario multi-e interdisciplinario.

El cambio de la pirámide poblacional hacia una población geriátrica, obliga a desarrollar modelos de Medicina preventiva, de mayor impacto social, menor costo y con un gran sentido de responsabilidad social. Más amigable al medio ambiente.

Es el momento de sumar voluntades hacia escenarios creativos. Es tiempo de voltear hacia la investigación y desarrollo en materia de Medicina espacial, entendida como ciencia productora de alternativas hacia la Telemedicina terrestre en beneficio de nuestra población.

Será recomendable estar a la búsqueda permanente de recursos económicos, en cada proyecto generar protocolos de investigación en materia de revisión de costo-beneficio de las acciones emprendidas, lo cual requeriría profesionalización de todos los involucrados en cada proyecto de Telemedicina.

Buscar realizar *spin off* del proyecto inicial. Capacitar y fortalecer a proveedores para lograr una cadena de valor estable, esto implica crear desarrollo de alianzas estratégicas.

Tener siempre una visión y una cultura de mejora continua y finalmente prever una partida para investigación, desarrollo e innovación.

# Referencias

1. O'Keefe M. The mass media as sources of medical information for doctors. *Journalism Quarterly* [serial on the Internet]. (1970)4795-100.
2. Willemain T. Approximate analysis of a hierarchical queuing network. *Operations Research* [serial on the Internet]. (1974, May) [Consultado: 11 abril 2016]; 22(3):522.
3. Bird KT. Cardiopulmonary frontiers: Quality health care via interactive television. *Chest*. 1972;61:204-5.
4. Park B. An introduction to telemedicine; interactive television for delivery of health services. 1974 June. *Alternate Media Center, New York University, New York*. 265 P. Edrs: Ed 110 028; Sponsored By Rockefeller Foundation, New York [serial on the Internet]. (1974) [Consultado: 11 abril 2016].
5. Park B, Bashshur R. Some implications of Telemedicine. *Journal of Communication* [serial on the Internet]. (1975); 25161-170.
6. Higgins C, Dunn E. Telemedicine in northwestern Ontario. *Telemedicine In Northwestern Ontario* [serial on the Internet]. 1984.
7. Greenberger M, Puffer J. Telemedicine: Toward better health care for the elderly. *Journal of Communication* [serial on the Internet]. 1989;39(3):137-44.
8. Murakami H. Medical data transmission using mobile satellite communication. *Electronics and Communication in Japan*. 1990;73:10.
9. Allen A, Hayes J. Patient satisfaction with Telemedicine in a rural clinic. *American Journal of Public Health* [serial on the Internet]. 1994;84(10):1693.
10. Houtchens BA, Clemmer TP, Holloway HC, et al. Telemedicine and international disaster response: Medical Consultation to Armenia and Russia Via a Telemedicine Spacebridge. *Prehospital and Disaster Medicine*. 1993;8:57-66.
11. Moahi K. Health information networks for telehealth in Africa - challenges and prospects: a review of the literature. *Libri: International Journal of Libraries & Information Services* [serial on the Internet]. 1999;49(1):43-50.
12. Gagnon M, Duplantie J, Fortin J, Landry R. Exploring the effects of telehealth on medical human resources supply: a qualitative case study in remote regions. *BMC Health Services Research*. 2007;7:6-9.
13. Jaana M, Paré G. Home telemonitoring of patients with diabetes: a systematic assessment of observed effects. *Journal of Evaluation in Clinical Practice*. 2007;3(2):242-53.
14. Brownsell S, Bradley D, Blackburn S, Cardinaux F, Hawley M. A systematic review of lifestyle monitoring technologies. *Journal of Telemedicine & Telecare*. 2011;17(4):185-9.
15. WHO | Global Observatory for eHealth series - Volume 2, s.d.) (WHO | Message from the Health Metrics Network Acting Executive Secretary, s.d.).
16. Organización Mundial de la Salud. Bases metodológicas para evaluar la viabilidad y el impacto de proyectos de Telemedicina <http://apps.who.int/medicinedocs/es/m/abstract/Js16578s/> 2001. Consultado: 13 abril 2016.
17. Hardon. Planeación estratégica. *HIS Strategic Planning Process Guidance\_2009\_March\_3.pdf*, s.d.) 2006. Consultado: 1 mayo 2016.
18. Expediente médico electrónico. NOM-024-SSA3-2010. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4151/salud/salud.htm>. Consultado: 5 abril 2016.
19. PR N. Health self-monitoring: Technologies and global markets. *PR Newswire US 2015*, June 22.
20. Las telecomunicaciones impulsan el crecimiento de México. México conectado. [www.mexicoconectado.gob.mx](http://www.mexicoconectado.gob.mx) Consultado: 3 mayo 2016.
21. Estadísticas a propósito del Día Mundial del Internet 2015. INEGI. <http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2015/internet0.pdf>. Consultado: 2 abril 2016.
22. "First Practical Nanogenerator Produces Electricity with Pinch of the Fingers", *PhysOrg.com*, 29 de marzo de 2011, <http://www.physorg.com/news/2011-03-nanogenerator-electricity-fingers.html>
23. <http://blog.stephenwolfram.com/2015/03/the-wolfram-data-drop-is-live/> Consultado: 2 mayo 2016.
24. Garcia M. Wearables: qué son, cómo funcionan y que peligros entrañan para nuestra privacidad. *Centro de Estudios de Consumo. Universidad de Castilla-La Mancha* 2015.
25. Cenetec, SSA. [www.cenetec.salud.gob.mx](http://www.cenetec.salud.gob.mx) Consultado: 12 abril 2016.
26. Bigdata. *Healthcare Analytics Forum*, New York, 2015.
27. Vandrico [www.vandrico.com](http://www.vandrico.com) Consultado: 18 abril 2016.
28. Ley de protección de datos personales [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5150631&fecha=05/07/2010](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5150631&fecha=05/07/2010) Consultado: 4 mayo 2016.
29. Lupton D. Quantifying the body: monitoring and measuring health in the age of mHealth technologies. *Critical Public Health*. 2013;23(4):393-403.
30. *Healthcare Performance Benchmarks: Telehealth & Telemedicine*, august 2014.
31. Organización Panamericana de la Salud (2007), *Agenda de Salud para las Américas 2008-2017*, Washington, D. C. [en línea], [http://new.paho.org/col/index.php?option=com\\_content&task=view&id=203&Itemid=259](http://new.paho.org/col/index.php?option=com_content&task=view&id=203&Itemid=259) Consultado: 19 abril 2016.
32. Regulación sobre uso de aplicaciones médicas <http://www.fda.gov/downloads/medicaldevices/deviceregulationandguidance/guidancedocuments/ucm313368.pdf> Consultado: 28 abril 2016.
33. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2010), *Tercera Conferencia Ministerial sobre la Sociedad de la Información de América Latina y el Caribe*, Lima-Santiago de Chile [en línea], <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/5/41825/di-salud-electrica-LAC.pdf>. Consultado: 7 mayo 2016.



# 6. Perfil del hombre cósmico

Ramiro Iglesias Leal

## ■ Introducción

Sin duda el acontecimiento científico más importante del siglo xx fue constatar que el ser humano es capaz de sobrevivir fuera del planeta Tierra. Si bien el espacio ultraterrestre es incompatible con la vida, los sistemas de soporte vital (trajes, naves y estaciones espaciales) permiten la sobrevivencia humana en el espacio abierto por tiempo prolongado, como quedó demostrado por cosmonautas rusos en misiones de más de un año de duración; incluso, posarse en otro cuerpo celeste, como fue el caso de los 12 astronautas de la NASA que descendieron en la Luna y regresaron a la Tierra sin problemas de importancia.

Cuando observamos a los astronautas que regresan de un viaje espacial de semanas o meses de duración, parecen seres distintos a los que vimos partir. En efecto, su rostro se edematiza, lo que les da un aspecto de raza mongoloide; sus extremidades pélvicas se adelgazan de forma notable (a lo cual festivamente se les denomina “piernas de pájaro”); su estatura se incrementa de 6 a 8 cm; difícilmente pueden mantener el ortostatismo y la marcha se vuelve imposible.

Estos cambios significan que las condiciones del espacio exterior transforman el cuerpo humano, inducen modificaciones antropométricas comparables en importancia a las que distinguen entre sí a los diferentes eslabones de la cadena evolutiva de la raza humana, es decir, los rasgos que hacen diferentes en orden sucesivo a los antecesores del hombre moderno: *Australopithecus afarensis* (3.5 millones de años), *Australopithecus africanus* (2.5 m.a.), *Homo habilis* (2 m.a.), *Homo erectus* (1 m.a.), *Homo sapiens arcaico* (300 000 años), *Homo sapiens neanderthalensis* u *Hombre de Neanderthal* (100 000 años); *Homo sapiens sapiens* u *Hombre de Cromagnon* (30 000 años).

Las condiciones del espacio exterior “remodelan” el cuerpo humano; en este proceso interviene particularmente la ausencia de gravedad o microgravedad; los otros factores presentes en el ámbito espacial como son la ausencia de atmósfera, la radiación cósmica, las temperaturas extremas, la ruptura del ciclo día/noche, la presencia de micrometeoros, los escenarios naturales fuera de la Tierra, etcétera, no participan significativamente en los cambios anatómicos y fisiológicos que los astronautas experimentan en el espacio ultraterrestre.

Los seres humanos que se gesten, se desarrollen y evolucionen en los asentamientos espaciales del futuro, sobre todo en aquellos que tendrán una fuerza gravitacional menor que la de la Tierra o en ausencia de gravedad, adquirirán características antropométricas diferentes al común de los habitantes de nuestro planeta. Este hecho dará origen a una nueva especie del *Homo sapiens*: el **Homo cósmicus**, y a una nueva civilización.

El traslado de parte de la humanidad a otras latitudes cósmicas y el surgimiento de una nueva variedad del *Homo sapiens*, representará un hecho de enorme significación en la evolución de la vida, esto será comparable al momento en que parte de los seres acuáticos incursionaron en los continentes y se volvieron terrestres, o al momento en el que a partir de un huevo de dinosaurio surgió la primera ave.

## Por qué ir al espacio

Son muchas las razones que justifican la migración humana hacia otros cuerpos celestes. Algunas de ellas son las siguientes (Figura 6.1).

**La Tierra se ha vuelto un pequeño planeta.** Cuando se inició la exploración espacial la Tierra tenía una población apenas superior a los tres mil millones de habitantes, actualmente somos más de siete mil. De acuerdo con la opinión de expertos, si la población sigue creciendo al ritmo actual, en una o dos generaciones más se llegará a diez o doce mil millones de habitantes, cifra que parece ser el límite que nuestro planeta puede sustentar.

**La Tierra es un lugar peligroso para vivir.** Se calcula que en el transcurso de la historia los fenómenos naturales (ciclones, tornados, terremotos, maremotos, inundaciones, explosiones volcánicas, desgajamiento de cerros, descargas eléctricas, etcétera) han cobrado tantas o más vidas que todas las guerras que la humanidad ha sufrido. Los estándares de confort y seguridad que están previstos para los futuros asentamientos espaciales harán de estos hábitats los lugares más seguros para vivir. La Tierra está expuesta al impacto de meteoroides, asteroides y cometas que eventualmente pueden producir una catástrofe planetaria. Habrá que añadir que en la actualidad hay acumulado en bombas atómicas un poder capaz de destruir varias veces nuestro planeta.



**Figura 6.1.**

“Lo que nos convierte en la especie más inteligente de la Tierra es saber que debemos abandonarla para sobrevivir”. (Fuente: OMNI, julio de 1990.)

**La Tierra es un planeta enfermo.** El deterioro del medio ambiente provocado por la actividad humana ha llegado a tal punto que se resienten ya sus efectos devastadores como el calentamiento global, la mayor intensidad de los fenómenos atmosféricos, la desaparición del ozono en la estratosfera del Polo Sur, el descongelamiento del hielo polar, etcétera. El daño causado al ambiente es tal que teóricamente se necesitaría dejar de habitar el planeta Tierra durante 50 años para que éste recupere su pureza original.

**Aprovechamiento de recursos naturales extraterrestres.** El espacio está colmado de riquezas. Sólo para citar algunos ejemplos mencionaremos que la luz y el calor solar representan una fuente de energía abundante, limpia y económica; el vacío y la ausencia de gravedad son factores susceptibles de ser aprovechados en la industria espacial; en la superficie de la Luna se pueden extraer un millón de toneladas de helio 3, el cual combinado con el deuterio en reacción de fusión nuclear, proporcionaría a la humanidad la energía suficiente para los próximos ocho siglos; las atmósferas de los planetas exteriores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) contienen cantidades infinitas de metano y otros gases aprovechables; la luna Io de Júpiter tiene una cubierta de azufre de varios kilómetros de espesor; no se descarta la posibilidad de que algunos meteoroides y asteroides puedan contener cantidades importantes de oro, platino y diamante.

**Beneficios colaterales de la exploración espacial.** Los programas de investigación espacial han traído como consecuencia un espectacular avance en todos los órdenes de la ciencia y la tecnología. Sólo el programa Apolo (vuelos a la Luna) aportó más beneficios tecnológicos que los producidos por todas las guerras que la humanidad ha sufrido en su historia, a un costo infinitamente menor en dinero y en vidas. La ciencia y la tecnología espacial están proporcionando instrumentos necesarios para la solución de problemas básicos de la humanidad (de educación, salud, alimentación, comunicaciones, predicción meteorológica, habitación, etcétera). Y lo sorprendente es que a la investigación espacial sólo se le asigna un presupuesto equivalente a 2 % del que se otorga a las fuerzas armadas.

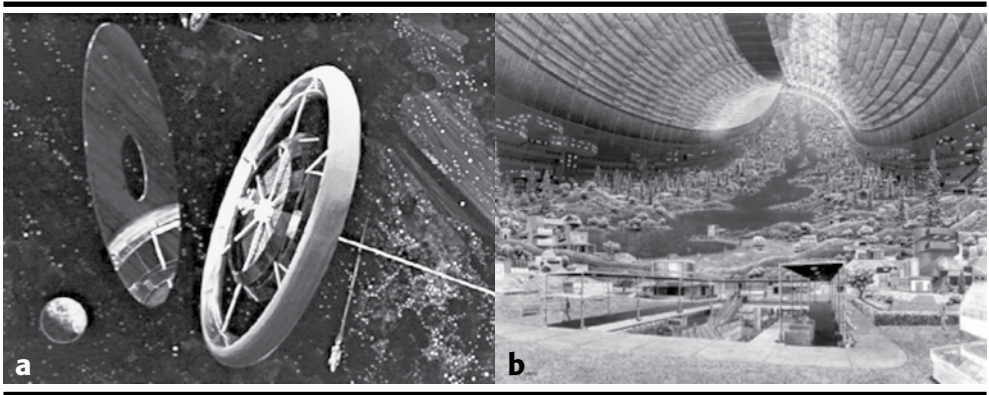
## Asentamientos espaciales

Son varios los posibles lugares de destino de la parte de la humanidad que emigrará al espacio exterior. Hasta ahora se han manejado tres sitios diferentes, y son los siguientes.

**La Luna.** Nuestro satélite resulta un lugar particularmente atractivo para ser poblado en el futuro próximo, sobre todo con fines de aprovechamiento de sus inmensos recursos naturales; por eso al referirnos al futuro de este cuerpo celeste, hemos acuñado la frase “La Luna, primer continente cósmico”. Sin entrar en detalle sobre los diferentes proyectos que se tienen previstos para desarrollar en la Luna, mencionaremos los siguientes: turismo, minería, obtención de combustibles, recolección de Helio 3, observación astronómica, instalación de estaciones de energía solar, agricultura intensiva y puerto espacial.

**Marte.** Este planeta tiene numerosas similitudes con la Tierra y también grandes diferencias, por esta razón, antes de que termine el presente siglo, Marte será sometido a un proceso de “terraformación”, el cual consiste en modificar su atmósfera descongelando el hielo de sus polos y sembrando especies del reino vegetal para oxigenarla y darle una presión adecuada para el desarrollo de la vida como la conocemos en la Tierra. Antes de este colosal proyecto planetario Marte empezará a poblarse construyendo grandes sistemas ecológicos sellados para dar asiento a ciudades, campos agrícolas y parques industriales.





**Figura 6.2.**

Aspectos exterior e interior de ciudad espacial en forma de rueda o bocel. Este diseño fue consensuado por varios científicos que se reunieron en 1975 durante 10 semanas, patrocinados por la Universidad de Stanford y el Centro de Investigaciones Ames de la NASA, en California. (Fuente: NASA.)

**Ciudades espaciales.** El físico, matemático y astrónomo Joseph-Louis de Lagrange, en el siglo XVIII predijo que en ciertos puntos alrededor de la Luna la fuerza gravitacional de la Tierra, el Sol, los planetas y la propia Luna se nulifica; dos de estos puntos denominados en su honor L4 y L5 se encuentran en la órbita lunar a 386 000 km adelante y 386 000 km atrás del satélite, respectivamente. En estos dos extensos “territorios” cósmicos se ubicarán las primeras ciudades espaciales, más tarde se construirán en otros lugares del sistema solar, principalmente en la cercanía de planetas y asteroides.

Hace varios años la Universidad de Stanford y la NASA organizaron una reunión en la que convocaron a varias decenas de científicos del mundo entero, durante diez semanas, para estudiar y definir el tipo más conveniente de ciudad espacial. Los estudios concluyeron que existen tres formas geométricas posibles de ciudad espacial: cilíndrica, esférica y en bocel (rueda de bicicleta), pero la última configuración fue la más aceptada porque técnicamente es más factible imprimirle un giro para crear gravedad artificial y ubicar una zona residencial, otra agrícola-ganadera y una zona industrial próxima y separada de la estructura principal (Figura 6.2 a y b).

No es posible en este capítulo cubrir la descripción completa de este tipo de habitats cósmicos, simplemente mencionaremos las características generales de la atmósfera interior. La temperatura se mantendrá en límites confortables, es decir, entre 18 y 22 °C; la luz solar tendrá una intensidad regulada y se creará el ciclo día/noche terrestre; la humedad también será controlada en los límites fisiológicos apropiados (entre 40 y 70 % de saturación); se crearán también las cuatro estaciones del año; se reproducirán las condiciones atmosféricas como la presencia de nubes, vientos, lluvias y neblinas; incluso se estima que podrá haber climas diversos según se trate de población de origen nórdico, mediterráneo, tropical, etc. Estos asentamientos espaciales serán verdaderas “Arcas de Noé cósmicas” porque se llevarán plantas, árboles y animales útiles para la supervivencia humana.

# Perfil del hombre cósmico

En este apartado se analizan las peculiaridades de la antropometría (medidas y dimensiones de las diferentes partes del cuerpo humano), anatomía, fisiología, patología y psicología que caracterizará a los seres humanos que nazcan y evolucionen fuera del planeta Tierra, particularmente de aquellos que habiten las ciudades espaciales en ausencia de gravedad.

Esta hipótesis se sustenta en el conocimiento científico adquirido en cinco decenios de investigación espacial, particularmente en las tripulaciones que han realizado misiones de larga duración. Esta experiencia nos ofrece una clara visión sobre el perfil del *Homo sapiens* que evolucionará en un ámbito distinto al que ha sido el escenario de los diferentes estadios del linaje humano.

## Perfil anatomofisiológico

Los rasgos anatómicos y fisiológicos que caracterizarán al *Homo cósmicus* son los siguientes.

*Redistribución de líquidos.* En microgravedad se produce una migración importante de líquidos hacia las partes superiores del cuerpo; esto trae como consecuencia que la cantidad de líquido por unidad de tejido sea menor, y que los miembros inferiores pierdan volumen, se adelgacen importante-mente, lo que ha dado en llamarse “piernas de pájaro”. Otra de las consecuencias de esta mayor concentración de líquidos en las porciones superiores del cuerpo es que el rostro se edematice, lo cual le da a los astronautas un aspecto de raza mongoloide. Además, esta transferencia de líquidos provoca que la circulación central se congestione y el tórax aloje unos 800 mL más de sangre (Figuras 6.3 y 6.4).

*Sistema cardiovascular.* En esta área se opera una gran cantidad de cambios: la presión arterial es homogénea en toda la extensión del cuerpo, no existen las diferencias regionales que se observan en tierra, en donde la fuerza gravitacional provoca que un individuo en ortostatismo tenga una presión arterial media de 70 mm Hg en el cerebro y 200 mm Hg en los pies; y que la presión venosa se estabilice entre 3 y 5 mm Hg en todos los territorios del organismo humano, en vez de -10 mm Hg en las venas superiores del cerebro y 90 mm Hg en las venas dorsales de los pies.

El corazón se vuelve más pequeño, disminuye su volumen 15 a 20 %; esto se debe a que, según algunos estudios, en ausencia de gravedad se opera un cierto grado de atrofia muscular, pero lo que ocasiona realmente la disminución de su tamaño es que, como se verá más adelante, maneja un menor volumen sanguíneo.



**Figura 6.3.** Redistribución de líquidos en microgravedad. (Fuente: NASA.)



**Figura 6.4.** Rostro edematizado en gravedad cero. (Fuente: NASA.)

Existen además dos datos clínicos muy evidentes: las venas de la cara, el cuello y los antebrazos aparecen siempre dilatadas, y los pulsos arteriales de las extremidades inferiores, disminuidos. Por último, en una investigación realizada recientemente en la Estación Espacial Internacional se ha demostrado que durante la permanencia en el espacio se produce un engrosamiento que va de 10 a 15% de las capas íntima y media de las arterias carótidas y femorales; este incremento de la pared de las arterias mencionadas desaparece cuatro días después del regreso a la Tierra.

*Aparato respiratorio.* En ausencia de gravedad el tórax experimenta una especie de remodelación: el diafragma se eleva 5 o 6 cm, lo que conduce a que el tórax se vuelva más corto, se amplíen los espacios intercostales y aumente el diámetro anteroposterior. La presión arterial pulmonar y la presión venosa tienen valores homogéneos en las diferentes porciones del pulmón. Lo mismo puede decirse de la circulación y ventilación pulmonar, pues desaparecen las diferencias regionales que se observan en tierra. Los cambios que se mencionan dan como resultado que se amplíe el área alveolar y que el intercambio gaseoso a nivel pulmonar se vuelva más eficiente.

*Aparato digestivo.* Antes del primer vuelo espacial tripulado existía la duda de que la deglución de los líquidos presentaría algunas dificultades, pero ha quedado demostrado que dicho problema no existe, y que el proceso de la digestión, el tránsito intestinal y la defecación se realizan sin alteraciones de importancia. Sin embargo, debemos admitir que durante las primeras 48 o 72 horas de un vuelo espacial se presentan importantes alteraciones en el aparato digestivo como parte del *Síndrome de adaptación espacial* que experimenta la mayor parte de los astronautas, el cual se manifiesta por incomodidad gástrica, náusea, anorexia, palidez, sudoración, ausencia casi total de los ruidos intestinales y vómito en proyectil que termina con el cuadro y no vuelve a presentarse en el resto de la misión.

*Sistema muscular.* El ser humano que evoluciona en ausencia de gravedad, poseerá una musculatura menos poderosa que la que se tiene en tierra; se afectarán principalmente los músculos "antigravitacionales", es decir, los músculos paravertebrales, los de la pelvis y los de las extremidades inferiores, que son los que nos permiten mantener la posición sedente, el ortostatismo y la marcha.

Las estructuras que poseen músculo liso no experimentarán ninguna modificación. La atrofia muscular es más evidente en las extremidades inferiores, el volumen de estas porciones llega a disminuir hasta 30 o 35%, en lo cual contribuye la movilización de los líquidos hacia las partes superiores del cuerpo (Figura 6.5).

*Sistema óseo.* Esta es la parte del organismo que sufre con mayor intensidad los efectos de la gravedad cero. En los vuelos espaciales se observa que el calcio se moviliza de los huesos hacia la sangre y de ahí al exterior a través de la orina; se pierde mensualmente en promedio de 1 a 1.5% del calcio de los huesos, con mayor intensidad en los huesos de la columna, la pelvis y las extremidades inferiores, que son los que resisten el peso del cuerpo. Este proceso no se detiene aun en los vuelos de más de un año de duración. El problema de la descalcificación del esqueleto durante la estancia en el espacio no se ha resuelto hasta ahora, pero se trabaja intensamente para modificar el metabolismo del calcio en ausencia de gravedad. En todo caso, se estima que este proceso se detendrá espontáneamente después de 2 o 2 ½ años de permanencia en el espacio (esto ocurre en enfermos cuadripléjicos que sufren una descalcificación similar a la que experimentan los astronautas).

Por lo que respecta a la columna vertebral, en el hombre cósmico perderá sus curvaturas, porque no soportará ningún peso, será de mayor longitud porque los discos intervertebrales se vuelven más anchos en microgravedad; esto contribuirá a incrementar la estatura en la raza cósmica.



**Figura 6.5.**  
Astronauta en gravedad cero con pérdida de volumen muscular en miembros inferiores.  
(Fuente: NASA.)

*Sistema del equilibrio.* En tierra las estructuras que nos permiten mantener el equilibrio son el sistema vestibular y los órganos propioceptivos, que son estimulados por la fuerza gravitacional. En el estado de ingravidez la función vestibular desaparece y en cierta medida la respuesta de los órganos propioceptivos; podría decirse que los sensores biológicos que son estimulados por la fuerza gravitacional terrestre “olvidan su función” en el espacio extraterrestre. Por lo tanto, la orientación en el ámbito espacial queda a cargo exclusivamente de la visión. La evolución del ser humano en ausencia de gravedad desarrollará sin duda otras formas de equilibrio y orientación.

*Sistema hemático.* En los astronautas que han realizado misiones espaciales de semanas o meses de duración se observan cambios en el sistema sanguíneo consistente en disminución de aproximadamente un litro en el volumen total de sangre; aumento de unos 800 mL en el volumen de sangre dentro del tórax; mayor contenido de este elemento por unidad de tejido en las partes superiores del cuerpo y disminución apreciable de *linfocitos T*. Esto condiciona un estado de anemia relativa, la cual no tiene ninguna significación clínica, porque obedece a un proceso de adaptación a la ausencia de gravedad. De manera que el Hombre cósmico tendrá una menor cantidad de sangre y una distribución distinta de la misma.

*Sistema endocrino.* Durante los primeros días de un vuelo espacial, los tripulantes exhiben una gran cantidad de cambios hormonales que obedecen en su mayor parte a situaciones de estrés, pero en el transcurso de unos días todo vuelve a la normalidad. Hay dos hormonas que cambian permanentemente: la testosterona que disminuye en forma apreciable (y con ello la cantidad de espermatozoides) y la hormona del crecimiento que aumenta en forma considerable. En el primer caso la naturaleza parece estar anunciando que los habitantes de las futuras ciudades espaciales tendrán una menor capacidad reproductiva, y en el segundo caso sugiere que la estatura del hombre cósmico se incrementará en un nivel que aún desconocemos.

*Sistema inmunitario.* Una observación constante en medicina espacial es que las bacterias en microgravedad aumentan su patogenicidad; se reproducen con mayor rapidez; se distribuyen en zonas del organismo que no son su sitio habitual (*Escherichia coli*, germen habitual del intestino grueso, se le ha aislado en la faringe, vías respiratorias y otros lugares); se vuelven resistentes a los antibióticos y el sistema inmunitario se deprime, los *linfocitos T* disminuyen en número y

eficiencia. Estimamos que las infecciones bacterianas serán un problema de mayor significación en los habitantes de las ciudades espaciales en microgravedad.

*Órganos de los sentidos.* La visión sufre algunos cambios durante las misiones espaciales prolongadas; en los primeros días del viaje la visión cercana y la visión lejana disminuyen, la presión intraocular aumenta considerablemente durante los primeros días, pero poco tiempo después de iniciado el vuelo se normaliza y la visión lejana mejora sustancialmente, no así la visión cercana que en algunos astronautas permanece disminuida. A la fecha no se han hecho los estudios suficientes para determinar con precisión en qué medida la microgravedad altera la anatomía y fisiología del ojo. El gusto y el olfato se alteran levemente porque las mucosas nasal y bucal permanecen crónicamente congestionadas. La audición no sufre ninguna alteración. El tacto se vuelve menos preciso al dejar de percibir el peso de los objetos y la presión sobre la piel.

*Estatura.* Hemos mencionado ya que los astronautas regresan del espacio 6 a 8 cm más altos; esto se atribuye exclusivamente a la pérdida parcial de las curvaturas de la columna vertebral y al aumento en el grosor de los discos intervertebrales. Cuando la fuerza gravitacional deje de actuar de modo permanente y los huesos largos resistan menos peso, tendrán mayor longitud.\* El aumento de la hormona del crecimiento será un factor que contribuirá de manera importante al incremento de la estatura del hombre cósmico (Figura 6.6).



**Figura 6.6.**  
En microgravedad se incrementa la estatura. (Fuente: NASA.)

\* Como contraprueba de lo anterior podemos citar el experimento del doctor Charles C. Wunder de la Universidad de Iowa, quien en 1960 colocó en centrifuga de laboratorio ratones recién nacidos a los que se les sometió a tres o cuatro fuerzas G durante varias semanas. Se observó que los roedores que se colocaron en la centrifuga adquirieron una talla mucho menor y con un sistema músculo esquelético más poderoso que los del lote testigo.

*Desarrollo cerebral.* En el cerebro se operarán los cambios más impresionantes; se estima que crecerá de forma importante porque en ausencia de gravedad aumenta el flujo sanguíneo al cerebro y con ello el aporte de oxígeno y nutrientes; además, la información que desde la infancia se reciba, será más intensa y elaborada. Actualmente el peso de la cabeza de un sujeto normal es el equivalente a un octavo del peso total del cuerpo, pero se prevé que en el espacio esa proporción cambie en unas cuantas generaciones y alcance la proporción de un quinto del peso total. Lo anterior traerá como consecuencia un incremento considerable de la masa cerebral y del coeficiente intelectual del Hombre cósmico.

*Cambios psicológicos.* Los astronautas que han contemplado la Tierra desde grandes distancias adquieren una visión distinta de la vida, del mundo, del universo. Para aquellos que la han observado desde la Luna les parece un pequeño globo de unos 70 a 80 cm de diámetro en el que se destaca el color azul de los mares, el blanco de las nubes y el bronceado de los continentes. Al decir de algunos de ellos no se distinguen fronteras geográficas ni diferencias raciales, sociales, políticas, religiosas, etcétera; se antoja comparar la Tierra desde esas distancias a una pequeña nave en la que viajamos juntos miles de millones de seres humanos e innumerables especies del reino animal y vegetal. La ven como una joya del firmamento en la que ha florecido la vida en sus diferentes manifestaciones.

Los astronautas regresan animados de sentimientos de solidaridad internacional, de simpatía por todos los pueblos y de preocupación por el destino de la humanidad y del planeta Tierra. En suma, los seres humanos que han viajado al espacio adquieren la convicción de ser ciudadanos del mundo, y que la Tierra es un solo hogar para toda la humanidad.

En virtud de estos cambios, inferimos que el hombre cósmico se colocará muy por encima del chauvinismo que aún se observa en algunas regiones del mundo y adquirirán una dimensión verdaderamente universal.

*Proceso de envejecimiento en el espacio.* En ausencia de gravedad desaparecerán ciertos rasgos anatómicos que caracterizan a la vejez: las arrugas, especialmente las de la cara y el cuello se atenuarán; los procesos articulares degenerativos; no colgará la papada de los obesos, ni las glándulas mamarias de las ancianas, ni el vientre de los que han perdido varios kilos de peso. La vida del anciano, liberado de su propio peso y del riesgo de las caídas que le ocasionan frecuentemente traumatismos y fracturas, será menos incapacitante, más fácil, más libre.

Se estima que el proceso de envejecimiento se retrasará en el espacio; que las diferencias entre un viejo y un joven se harán menos aparentes durante muchos años; que los adelantos de la medicina del futuro, unidos a las nuevas condiciones ambientales, harán posible un incremento de la esperanza de vida de hasta 150 años. Algunos gerontólogos, entre ellos el doctor Richard Cutler del Centro de Investigaciones Gerontológicas de Baltimore, estiman que en un futuro no distante la longevidad humana se prolongará hasta los 200 años o más. Antes habrá que descifrar minuciosamente los mecanismos biológicos que intervienen para modelar las sucesivas etapas de la vida (Figura 6.7).

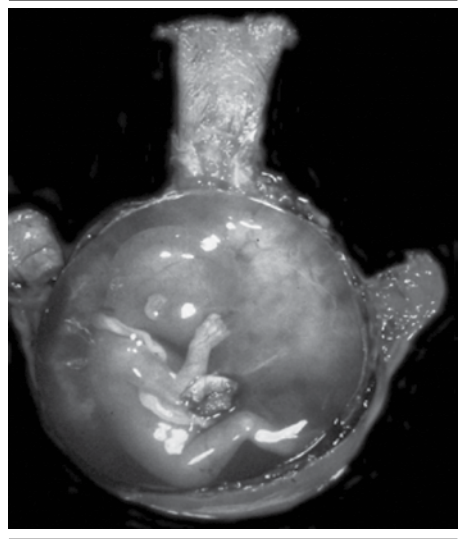
Las plantas y animales están programados para vivir un lapso determinado de acuerdo con la especie, pero no pasará mucho tiempo sin que ese destino inexorable pueda ser modificado; ya se han identificado genes con la función específica de hacer envejecer a las células; la modificación de la estructura de esos genes traerá como consecuencia la posibilidad de programar la vida. No parece imposible que para el momento histórico en que se inicien los asentamientos espaciales, la ingeniería genética empiece a dar los primeros frutos en este fascinante campo de la ciencia.

*Reproducción humana en gravedad cero.* La experiencia en este campo es limitada, no se ha reportado hasta ahora la práctica del acto sexual en el espacio, ni cambios genéticos o conductuales en torno al sexo; sólo se ha informado que la testosterona, el número de espermatozoides y la





**Figura 6.7.**  
Proceso de envejecimiento en el espacio.  
(Fuente: revista *Muy Interesante*.)



**Figura 6.8.**  
Fotografía de matriz ocupada. Pieza de autopsia de madre que murió de cáncer. (Fuente: Hospital de Cardiología CMN Siglo XXI, IMSS.)

movilidad de éstos disminuyen importantemente. Tampoco existe información disponible sobre la fisiología de la reproducción en la mujer. Sin embargo, estimamos que la microgravedad no influirá en el tránsito del óvulo hacia la matriz, a través de la trompa de Falopio, porque este movimiento se debe al impulso de cilios que tapizan el interior de este conducto. Por otra parte, el traslado del espermatozoide desde el cuello de la matriz hasta la parte media de la trompa de Falopio (donde tiene lugar el encuentro de ambas células reproductoras), se realiza por el movimiento propio del espermatozoide y por un mecanismo de succión natural del aparato genital femenino.

El desarrollo posterior del embrión dentro de la matriz no tiene nada que ver con la fuerza de gravedad, al contrario, nada hay más parecido a *una nave espacial tripulada que una matriz ocupada* (Figura 6.8).

El inicio del parto tampoco guarda relación con la atracción gravitacional, se inicia por cambios hormonales (aumento de estrógenos y disminución de la progesterona) y, sobre todo, por cierto grado de distensión de la musculatura uterina.

El niño recién nacido en el espacio será idéntico al recién nacido en la Tierra, las diferencias empiezan a perfilarse cuando el “*niño terrestre*” se sienta o empieza a caminar y, por efecto de la gravedad, su columna adquiere las curvaturas que le caracterizan.

## Patología humana en el espacio

Los seres humanos que habiten las ciudades espaciales en ausencia de gravedad y en cierta medida aquellos que se ubiquen en cuerpos celestes más pequeños que la Tierra, experimentarán cambios importantes en su patología. Ante la limitación de amplitud de estas notas,

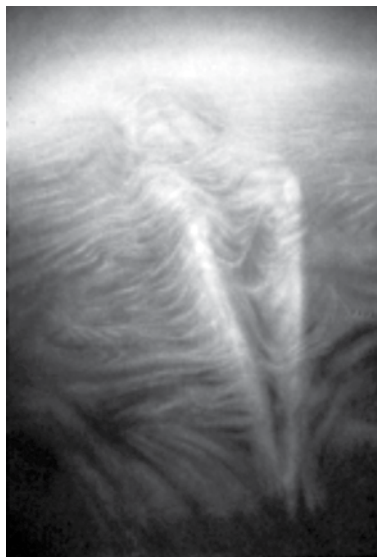
sólo enumeraremos algunos procesos patológicos que desaparecerán y otros que se agravarán en microgravedad.

No se conocerán las várices en miembros inferiores, úlceras varicosas y de compresión, hipotensión ortostática y síncope, ptosis viscerales, efectos de caídas, procesos de columna vertebral y articulaciones en miembros inferiores atribuibles al peso del cuerpo. Mención especial merece el hecho de que habrá una importante limitación de la invalidez; muchos minusválidos dejarán de serlo en el espacio; serán libres para movilizarse, para trasladarse sin ayuda alguna de un sitio a otro, para escapar de su condición de seres aprisionados por la atracción gravitacional; desaparecerán los bastones, las muletas, las sillas de ruedas, los colchones de agua y los cambios frecuentes de posición en enfermos inconscientes.

En cambio, serán más frecuentes la litiasis renal debido a la mayor eliminación de calcio a través de la orina; las infecciones bacterianas porque está probado que estos gérmenes aumentan su patogenicidad, crean resistencia a los antibióticos y el sistema inmune se deteriora; los procesos condicionados por radiación cósmica, especialmente el cáncer de piel.

Las causas más frecuentes de muerte en el hombre cósmico serán el proceso mismo de envejecimiento, el incremento de la patología que se ha mencionado en el párrafo anterior y los accidentes.

El manejo de los restos mortales podrán ser de diferente manera: la cremación y dispersión de las cenizas en el espacio; la desecación o “momificación” del cadáver, lo cual se logrará simplemente exponiéndolo al vacío absoluto en el exterior de la nave, con lo que los líquidos del cuerpo se evaporarían en unas horas o días; la congelación permanente, procedimiento que se simplificará porque en la parte sombreada de una nave espacial, la temperatura desciende a cerca del cero absoluto. En cualquier caso, los restos mortales podrán enviarse a la Tierra, si esa fuera la decisión previa, para un sepelio tradicional (Figura 6.9).



---

**Figura 6.9.**  
Muerte en el espacio. (Fuente: desconocida.)





**Figura 6.10.**

Esta estatuilla (de autor desconocido) es la representación más cercana de una pareja de la futura raza cósmica. Su perfil antropométrico se ajusta bien a la descripción que se hace en este capítulo. (Fuente: archivo personal Dr. Iglesias.)

## Perfil antropométrico del hombre cósmico

Como se ha expresado en párrafos anteriores, el ámbito espacial, principalmente la ausencia de gravedad, “remodelará” al ser humano que evolucione en los asentamientos espaciales del futuro. Los rasgos principales de su perfil antropométrico serán los siguientes: *elevada estatura*, por el mayor crecimiento de los huesos de las extremidades inferiores y la elongación de la columna vertebral; *rostro mongoloide*, por la mayor acumulación de líquidos en la mitad superior del cuerpo; *dilatación venosa*, en la cara y el cuello por aumento del volumen de sangre y presión en estas zonas; *tórax corto y ancho*, por elevación del diafragma y aumento de su diámetro anteroposterior; *abdomen plano*, porque las vísceras abdominales se elevan y se acomodan debajo del diafragma; *torso largo*, por aumento de longitud de la columna vertebral condicionada por pérdida de sus curvaturas e incremento del grosor de los discos intervertebrales; *extremidades pélvicas largas y delgadas*, por el mayor crecimiento de sus huesos, la atrofia de los músculos antigravitacionales y el desplazamiento de líquidos a las partes superiores del cuerpo (Figura 6.10).

# Referencias

- American Institute of Aeronautics (ed). Life sciences and space medicine conference '95. Washington, D.C.: The Aerospace Center; 1995.
- Atkov O, Fomina GA, Kalinchenko VV. Echocardiographic assessment of the cardiac functional state in long-term space flights. En: The proceeding of the IX World Congress of Cardiology, Moscow, 1982.
- Atmore A, Avery PW, Blakemore H, et al. Historia del hombre. México: Selecciones del Reader's Digest; 1974.
- Belousov W, Bullen KE, Cameron AG, et al. El redescubrimiento de la Tierra. México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; 1982.
- Berger M. If you lived on Mars. New York: E.P. Dutton; 1989.
- Bonting SL. Advance in space biology and medicine. Stamford, Connecticut: Jai Press Inn; 1999.
- Bungo MW, Bagain TM, Bowman MA, Levitan BM (ed). Results of life sciences DSOs conducted aboard the space shuttle. Houston: Space Biomedical Institute, NASA-JSC; 1987.
- Churchill SE. Fundamentals of space life sciences. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company; 1997.
- Clark RW. Hazañas científicas. México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; 1980.
- Darwin C. El origen del hombre. México: Editorial Diana; 1979.
- DeHart RL, Davis-JR. Fundamentals of aerospace medicine. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2002.
- Dyson MJ. Home on the moon. Washington, DC: National Geographic Society; 2003.
- Golden F. Colonias en el espacio. México: Editorial Diana; 1981.
- Guyton AC, Hall JE. Textbook of medical physiology. Philadelphia: W.B. Saunders Company; 1996.
- Harding R. Survival in space. London and New York: Routledge; 1989.
- Hardy DA, Moore P. 50 years in space. London: AAPPL; 2006.
- Iglesias R. La ruta hacia el hombre cósmico. México: Editorial Limusa; 2009.
- Iglesias R. Cardiología aeroespacial. México: Editorial Limusa; 2012.
- Johanson DC, Edey MA. El primer antepasado del hombre. Barcelona: Editorial Planeta; 1982.
- Johnson RD (ed). Space settlements-A design study. Washington DC: Scientific and Technical Information Officer-NASA SP-413; 1997.
- Johnston RS, Dietlein LF, Berry CA (ed). Biomedical results of Apollo. Washington DC: Government Printing Officer (NASA SP-369); 1975.
- Johnston RS, Dietlein LF (ed). Biomedical results from skylab. Washington DC: US Government Printing Officer (NASA SP-377); 1997.
- Leach CS, Grigoriev AL, Natochin YV. Fluid and electrolyte regulation in spaceflight. San Diego, California: American Astronautical Society; 1998.
- Leakey RE. Orígenes del hombre. México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; 1982.
- NASA-Life and Biomedical Sciences Applications Division. Life sciences accomplishments '94. Washington DC; NASA; 1987.
- NASA-Scientific and Technical Information Division. Technology 2000. Washington DC: NASA Conference Publication 3109, Vol. 1, 1991.
- Neri R. El planeta azul-Misión 61-B. México: Edamex, 1987.
- Nicogossian AE, Lench CS, Pool SL (ed). Space physiology and medicine (3rd ed). Philadelphia: Lea and Febiger; 1994.
- Oser H, Battrick B. Life science research in space. Paris: ESA Publications Division (ESA SP-1105), 1989.
- Pogue WR. How do you go to the bathroom in space? New York: Tom Doherty Associates, LLC; 1999.
- Sagan C. El cerebro de Broca. Barcelona: Ediciones Grijalbo; 1981.
- Sagan C. Murmullos de la Tierra. Barcelona: Editorial Planeta; 1988.
- Sagan C. Pale blue dot. New York: Random House; 1994.
- Sagan C. The cosmic connection. New York: Anchor Press; 1973.
- Sagan C. The dragons of eden. New York: Random House; 1997.
- Shipman HL. Humans in space. New York and London: Plenum Press; 1989.
- Vogt GL, Wargo MJ. Microgravity-A teacher's guide with activities. Washington DC: NASA Microgravity Science and Applications Division; 1992.
- Wolfe T. The right stuff. London: Jonathan Cape; 1980.
- Zubrin R. The case for Mars. New York: Touchstone; 1997.



# 7. Astrobiología y medicina espacial

Sandra Ignacia Ramírez Jiménez

## ■ La Astrobiología

La Astrobiología es un área del conocimiento multidisciplinaria que se ocupa del estudio de la vida como un fenómeno planetario. Tradicionalmente se define como el área del conocimiento enfocada en el estudio del origen, la evolución, la distribución y el destino de la vida en el Universo. Para ser más precisos, podría decirse que la Astrobiología se dedica a estudiar las condiciones que permitieron el surgimiento de la vida en la Tierra, determinar si condiciones similares existen o existieron en otros objetos planetarios del sistema solar, o de otros sistemas planetarios y buscar todos los posibles nichos en los que se manifieste la vida actualmente.<sup>1</sup>

Para el cumplimiento de sus objetivos centrales, la Astrobiología estudia aspectos diversos de los seres vivos que se conocen en la Tierra. Es relevante puntualizar que hasta hoy en día, nuestro planeta es el único objeto del Universo conocido en el que puede establecerse científicamente que existe vida. Si bien los seres vivos terrestres son muy variados en cuanto a tamaños, formas, colores y actividades, reconocemos que constituyen en conjunto, un único ejemplo y que además comparten varios aspectos comunes como una estructura molecular basada en el elemento carbono, la ocurrencia de reacciones químicas complejas, la presencia de estructuras delimitadas por membranas, un metabolismo biosintético alimentado por fuentes externas de energía y de nutrientes, mecanismos de autorreplicación así como de almacenamiento y transferencia de información genética, y el desarrollo de mecanismos de adaptación progresiva que condujeron a la evolución darwiniana.

Así, a la Astrobiología le interesa conocer, por ejemplo, los límites de actividad biológica de los seres vivos, su capacidad para resistir entornos extremos y su capacidad para poder colonizar otros mundos. En este sentido, son relevantes los estudios realizados con algunos organismos terrestres que han logrado permanecer viables después de haber sido expuestos a las condiciones del espacio exterior, por periodos prolongados. Durante los experimentos realizados en el proyecto BIOPAN en 2007 a cargo de la Agencia Espacial Europea (ESA por *European Space Agency*) se expusieron semillas de las plantas *Arabidopsis thaliana* y *Nicotiana tabacum* a la radiación solar, la radiación cósmica, las condiciones de vacío y de microgravedad durante 18 meses,<sup>2</sup> que posteriormente lograron germinar cuando fueron cultivadas en tierra. Una cepa de la bacteria *Bacillus subtilis* sobrevivió durante 559 días en un vuelo de órbita baja alrededor de la Tierra, proyecto que buscaba simular las condiciones de radiación que se podrían recibir en la superficie del planeta Marte.<sup>3</sup> Estos resultados demuestran que la vida terrestre está en condiciones de sobrevivir al espacio exterior. Pero, ¿es válido pensar que así como estas plantas y microorganismos lograron utilizar estrategias de adaptación que les permitieron sobrevivir al

espacio exterior, también lo podríamos hacer los seres humanos? Me parece que la respuesta es negativa. Los seres humanos somos mucho más frágiles que muchos microorganismos, plantas y animales, requerimos además un entorno que nos proporcione cobijo, alimentos, agua y algunos otros factores básicos. Y si la intención es que los humanos podamos explorar otros mundos diferentes al nuestro, la hazaña requiere de muchos esfuerzos colectivos.

En la década de los 60 el plan fue llevar al hombre a la Luna. Hoy en día, el plan es llevar al hombre a Marte. De acuerdo con Scott Hubbard, profesor de la Universidad de Stanford e integrante del gabinete de asesores de la compañía *SpaceX*, para tener una misión tripulada a Marte es necesario contar con *i*) mejores desarrollos de ingeniería en sistemas de propulsión y sistemas de soporte de vida; *ii*) una misión que esté al alcance del presupuesto de las agencias espaciales, y *iii*) un mejor entendimiento que los efectos de la microgravedad y la radiación pueden tener sobre el cuerpo humano, para estar en posibilidades de mitigarlos.<sup>4</sup> Hubbard reconoce que el último decenio ha sido testigo de avances notables en estos aspectos y que es posible pensar que los seres humanos podrán alcanzar Marte en el 2030. Este capítulo tiene la intención de presentar, desde una perspectiva astrobiológica, un condensado del binomio seres vivos-espacio exterior para contribuir a que este plan sea una realidad.

## El espacio exterior

Se define como espacio exterior al espacio existente entre los objetos planetarios, el cual contiene una densidad tan baja de partículas que en términos generales se le considera un espacio vacío. Aunque es realidad se trata de una dimensión en la que predominan moléculas de hidrógeno ( $H_2$ ) y átomos de helio (He), diversos tipos de radiación electromagnética, de partículas energéticas como neutrinos y rayos cósmicos, así como polvo cósmico. La temperatura promedio del espacio exterior es del orden de 2.7 grados Kelvin (K), es decir de aproximadamente  $-270$  °C. En las regiones libres la densidad promedio corresponde a un átomo de hidrógeno por cada metro cúbico ( $m^3$ ), lo cual contrasta con las regiones de alta densidad como las nubes moleculares cuya densidad puede ser del orden de 100 partículas por centímetro cúbico ( $cm^3$ ). Se considera como el ambiente con la mejor aproximación a un vacío perfecto, en el que puede considerarse la ausencia de fricción, lo que permite a las estrellas, planetas y satélites definir libremente sus órbitas más estables. El Cuadro 7.1 contiene información de los parámetros correspondientes a la atmósfera terrestre a nivel de superficie y de aquellos correspondientes al espacio exterior.

Aun cuando una atmósfera no tiene límites o fronteras visibles, es posible reconocer un grado de estratificación debido a los cambios que presenta algún parámetro físico como la temperatura, la presión o la densidad, al variar la altura. En la atmósfera terrestre la presión atmosférica promedio en la superficie es del orden de  $1 \times 10^5$  pascales (Pa) pero disminuye drásticamente hasta  $3.2 \times 10^{-2}$  Pa al llegar a una altura de 100 kilómetros. La temperatura disminuye de 278 K—su valor promedio en la superficie—, a 210 K en la tropopausa a unos 11 km de altura, para aumentar a 273 K en la estratopausa localizada a 50 km de altura. El valor mínimo de temperatura se alcanza en la atmósfera terrestre entre los 80 y 85 km de altura y corresponde a un valor de 190 K. La densidad atmosférica disminuye gradualmente al aumentar la altura, pasando de  $1 \times 10^{-3}$  gramos por centímetro cúbico ( $g/cm^3$ ) en la superficie a  $1 \times 10^{-12}$   $g/cm^3$  a 150 km de altitud.<sup>5</sup>

De modo que para determinar el inicio del espacio exterior se recurre a la línea Kármán, ubicada a una altura de 100 km desde el nivel medio del mar en la superficie terrestre. A esta línea se le considera como la frontera entre la atmósfera terrestre y el espacio exterior, de acuer-

## Cuadro 7.1.

### Comparación de las condiciones de la atmósfera terrestre y las del espacio exterior

	<b>Atmósfera terrestre</b>	<b>Espacio exterior</b>
Constituyentes principales	N <sub>2</sub> (78%) O <sub>2</sub> (21%) Ar (0,9%) CO <sub>2</sub> (0,04%) Vapor de agua	H <sub>2</sub> (mayoritario) He
Presión (Pa)	1.01 × 10 <sup>5</sup>	1 × 10 <sup>-4</sup> - 3 × 10 <sup>-15</sup>
Masa (kg)	5.15 × 10 <sup>18</sup>	No determinada
Temperatura promedio (K)	287	2.7
Densidad (partícula/m <sup>3</sup> )	10 <sup>25</sup> , a nivel del mar	1 átomo de H

do con la definición adoptada por la Federación Aeronáutica Internacional (FAI, por *Fédération Aéronautique Internationale*) a propuesta del ingeniero y físico húngaro-americano Theodore von Kármán a mediados de la década de 1950, quien fue el primero en calcular que a una altura de 100 km la atmósfera se adelgazaba tanto que hacía difícil que un vehículo pudiera mantenerse en vuelo estable.<sup>6</sup> Se considera además de una frontera física, una frontera jurídica ya que debajo de esta altura el espacio le corresponde a cada territorio soberano, pero más allá de ella se encuentra el espacio libre de acuerdo con lo establecido en el marco del Derecho Espacial a través del Tratado del Espacio Exterior propuesto por las Naciones Unidas en 1967.<sup>7</sup> En septiembre de 2015 este Tratado contaba con la ratificación de 104 países, entre ellos México, y había sido firmado por otros 24 países que aún deben ratificarlo.

La línea de Kármán permite además hacer la diferenciación entre el campo de la Aeronáutica y el de la Astronáutica. La primera queda entonces entendida como la disciplina dedicada al estudio, diseño y construcción de naves que puedan desarrollar alguna actividad entre la superficie terrestre y los primeros 100 km de altura; mientras que la segunda corresponde con la teoría y práctica de la navegación más allá de este límite e incluye campos como la astrodinámica, los sistemas de propulsión y el diseño de naves espaciales, el control de satélites o cohetes y el estudio del clima espacial, necesarios todos para la construcción de vehículos espaciales, su lanzamiento y su mantenimiento en el espacio.

Más allá de una atmósfera protectora y de la presencia de un campo magnético, las partículas energéticas que existen en el espacio exterior no encuentran obstáculo alguno. Estas partículas tienen energías que van desde los 10<sup>6</sup> electronvolts (eV) hasta 10<sup>20</sup> eV. Los rayos cósmicos, una mezcla de protones (H<sup>+</sup>), núcleos de helio (He<sup>+2</sup>) y de otros elementos pesados pueden llegar a tener valores de energía de hasta 10<sup>9</sup> eV, suficiente para provocar daños a los componentes electrónicos de las naves espaciales y para representar un serio riesgo a la salud de los viajeros espaciales.<sup>5</sup> En palabras del astronauta Don Petit, el espacio tiene “un olor metálico y a quemado” que se adhiere a los trajes espaciales y a los equipos, que es similar al olor generado por las antorchas de arco que se utilizan en actividades de soldaduras metálicas. Este hecho puede explicarse precisamente por la interacción de las partículas energéticas con los materiales utilizados en la manufactura de los componentes que emplean los astronautas, aun durante breves intervalos de tiempo.

La exploración humana del espacio exterior está asociada a condiciones adversas que es necesario conocer para proponer alguna manera de sobrepasarlas y poder garantizar condiciones

seguras de viaje a los astronautas y cosmonautas. Las condiciones de vacío, baja temperatura, radiación y microgravedad afectan de manera negativa al cuerpo humano. Además de los temas de salud, el costo económico de una misión de exploración espacial tripulada es muy alto.

## La Medicina espacial

La medicina espacial se instaura como una rama de la medicina astronáutica o medicina aeroespacial a raíz de los primeros intentos de realizar exitosamente un vuelo en el espacio exterior con tripulantes humanos a bordo. Es considerada un tipo de medicina preventiva enfocada en los viajeros espaciales, entiéndase astronautas o cosmonautas, orientada a comprender y prevenir las respuestas fisiológicas del organismo humano provocadas por situaciones de estrés biológico o físico que pueden encontrarse en los ambientes aeroespaciales.

La Fuerza Aérea estadounidense define a un astronauta como la persona que ha volado al menos a una altura de 80 km, sobre el nivel medio del mar. Esta altura corresponde a la frontera entre la mesosfera y la termosfera terrestres. La Agencia Espacial de la Federación Rusa utiliza el término cosmonauta para referirse a todas aquellas personas que realizan una actividad profesional fuera de la atmósfera terrestre, o que simplemente viajan más allá de nuestra atmósfera. En este capítulo se utilizarán los términos genéricos viajero espacial o astronauta, con excepción de cuando se haga alusión específica a personajes rusos, casos en los que se utilizará entonces el término cosmonauta.

Entre los objetivos principales de la medicina espacial se incluye el estudio de la salud de los astronautas, la evaluación de qué tan bien y por cuánto tiempo pueden sobrevivir a las condiciones extremas que les representa el espacio exterior y qué tan rápido pueden readaptarse a las condiciones de la Tierra a su regreso del espacio. Además busca desarrollar alternativas de prevención y de alivio para los padecimientos asociados con el tiempo que los viajeros espaciales tienen que permanecer en el espacio. El avance en las investigaciones multidisciplinarias de áreas como la ingeniería, las ciencias físicas y las ciencias biológicas orientadas en la búsqueda de cómo lograr que los seres humanos puedan sobrevivir y trabajar por periodos prolongados en el espacio han permitido mejoras sustanciales en el diseño y construcción de naves espaciales y de trajes para los astronautas.

Requerimientos inmediatos y básicos como contar con un medio presurizado con una temperatura adecuada, aire que pueda respirarse, agua potable y una manera de tratar a los productos de desecho del cuerpo humano, constituyen lo que se denomina un sistema de soporte de vida. Deben tenerse también presentes otras consideraciones ambientales como la cantidad de radiación que se recibe, el potencial contacto con un micrometeorito, la gravedad a la que se está sujeto, el ruido, las vibraciones y la cantidad de luz con que se cuenta, ya que todas ellas tendrán un impacto en la fisiología del cuerpo humano cuando se encuentre en el espacio.

Los requerimientos metabólicos del integrante típico de una tripulación espacial incluyen 0.84 kilogramos (kg) de oxígeno, 0.62 kg de alimentos y 3.52 kg de agua, los cuales una vez utilizados en los distintos procesos fisiológicos del cuerpo humano producen 0.11 kg de desechos sólidos, 3.87 kg de desechos líquidos y 1.0 kg de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Estos valores pueden variar dependiendo de la masa corporal del individuo, así como de las actividades que desarrolle durante la misión.<sup>8</sup>

Las naves espaciales estadounidenses de la década de los 60 como las utilizadas por los proyectos Mercury, Gemini y Apolo contenían atmósferas constituidas 100 % por oxígeno molecular (O<sub>2</sub>), por lo que sólo eran adecuadas para misiones de corta duración y eran de uso único.

Esta situación cambió en la década de los 80 cuando la NASA (National Aeronautics and Space Administration) diseñó y construyó los transbordadores espaciales, es decir sistemas de transporte hacia el espacio que pudieran ser reutilizables y en los cuales pudiera mantenerse una atmósfera semejante a la de la Tierra, una mezcla de 22 % de O<sub>2</sub> y 78 % de N<sub>2</sub>, limpia, presurizada y segura para la tripulación. Las cosmonaves rusas Soyuz contenían también mezclas gaseosas que simulaban la composición de la atmósfera terrestre y que se mantenían a una presión de 101 kPa. Las estaciones Mir y Salyut tienen condiciones similares.

Actualmente empresas como Lockheed Martin o Paragon desarrollan módulos que puedan ser tripulados y que permitan ampliar las fronteras espaciales exploradas por los humanos. Por ejemplo el módulo Orion MPCV (*Orion Multi-Purpose Crew Vehicle*) de Lockheed Martin pretende alojar a cuatro astronautas que puedan explorar algún asteroide o que puedan llegar al planeta Marte proporcionándoles además la posibilidad de depositar o traer consigo a otros tripulantes o algunos materiales de facilidades como la Estación Espacial Internacional.<sup>9</sup> Por otro lado, el Corporativo Paragon está trabajando en sistemas de soporte de vida modulares, es decir sistemas altamente integrados y confiables que permitan eliminar contaminantes, humedad o CO<sub>2</sub> de la atmósfera de una misión en curso.

Por otro lado, los sistemas de actividad extravehicular (EVA por *Extravehicular Activity*), conocidos tradicionalmente como trajes espaciales, incluyen sistemas de soporte de vida primarios que les permiten a los astronautas o cosmonautas realizar actividades fuera del ambiente de cobijo que representa la nave espacial. Los trajes espaciales pueden estar o no unidos a la nave.

El factor que afecta en mayor medida al cuerpo humano en el espacio es la falta de gravedad o la condición de microgravedad, ya que le impacta de tres formas:

- por pérdida de la propiocepción, es decir de la capacidad relativa de sentir la posición relativa de partes corporales contiguas y que ayuda para regular la dirección y el rango de los movimientos
- por cambios en la distribución de los líquidos corporales
- por el deterioro del sistema musculoesquelético

La concentración mínima necesaria de oxígeno (O<sub>2</sub>) que requiere un adulto es de 16 kPa. Si ésta disminuye el astronauta pierde la conciencia y puede morir de hipoxia. Si la presión continúa bajando y llega a 6.3 kPa, la sangre y otros líquidos corporales comienzan a vaporizarse, condición conocida como ebullismo. Las burbujas generadas pueden aumentar el tamaño del organismo y disminuir la velocidad de la circulación sanguínea. Por estas razones el uso de un traje espacial presurizado o de ropa elástica que comprima, son de vital importancia para los astronautas.

Los viajeros espaciales, una vez que se encuentran fuera de la protección otorgada por la atmósfera y la magnetosfera terrestres, quedan expuestos a considerables niveles de radiación. Esta radiación atraviesa la piel y los músculos y puede causar daño a las células de la médula ósea, encargadas de mantener en buenas condiciones al sistema inmune. Por este motivo, se ha propuesto que los viajes espaciales de larga duración podrían ralentizar la capacidad del cuerpo humano de protegerse contra algunas enfermedades volviéndolo más vulnerable a virus o bacterias propias que en condiciones normales permanecen reprimidas.<sup>10</sup> La exposición a la radiación también puede promover la aparición temprana de catarata; dañar el tejido cerebral o acelerar la aparición de la enfermedad de Alzheimer.<sup>11</sup> Particularmente por el hecho de no contar con la protección de la magnetosfera, las misiones interplanetarias tripuladas son más vulnerables. De hecho, uno de los mayores riesgos de un viaje tripulado a Marte, lo constituye la cantidad de radiación a la que estarían expuestos los tripulantes.<sup>12</sup>



En vuelos de corta duración con trayectorias bien establecidas como en el Gemini 4 la radiación no representa un riesgo para los tripulantes ya que reciben dosis de radiación pequeñas (11 mRad/día). Pero vuelos de estancia prolongada como en los transbordadores espaciales o en la Estación Espacial Internacional requieren una vigilancia más estricta de la dosis de radiación recibida. Por ejemplo la misión Skylab 4 reportó dosis de 90 mRad/día.

Como respuesta a las condiciones de microgravedad, el cuerpo humano experimenta algunos cambios fisiológicos temporales y también algunos irreversibles. Cuando la exposición a la microgravedad es corta, se ve principalmente afectado el sistema vesicular lo que produce náusea que puede autocontrolarse, en la mayoría de los casos, vértigo, dolor de cabeza y aletargamiento. Al conjunto de estos síntomas se le conoce como el síndrome de adaptación al espacio (SAS por *Space Adaptation Syndrome*) o más comúnmente enfermedad del espacio, que se origina debido, fundamentalmente, a la adaptación que debe lograr el sistema vestibular al enfrentarse a la condición de microgravedad. La duración de estos síntomas en la mayoría de los casos no va más allá de 72 horas, tiempo que le toma al cuerpo humano acostumbrarse a su nuevo ambiente. Además los astronautas pueden tomar algunos medicamentos, sobre todo para controlar la náusea ya que vomitar dentro de un traje espacial presurizado, debe ser una situación nada deseable.

Si la exposición a la microgravedad es de larga duración se han identificado diversos efectos, algunos muy importantes como la pérdida de hueso y de masa muscular, lo cual puede afectar seriamente el desempeño de los astronautas. El sistema musculoesquelético comienza a deteriorarse debido a que en ausencia de gravedad, ya no es requerido para mantener una postura erguida. Sin una adecuada rutina de ejercicios, sustentada principalmente en equipos como caminadoras, bicicletas fijas y levantamiento de pesas, un astronauta puede perder 20 % de su masa muscular en tan sólo 10 días y hasta 1.5 % de su masa esquelética en un mes. Afortunadamente se ha encontrado que al regresar a la Tierra, la densidad de los huesos así como el tono de los músculos de los astronautas que han pasado estancias prolongadas en el espacio, se recupera con ayuda de una dieta adecuada, una rutina de ejercicio y el apoyo de algunos medicamentos.

El cuerpo humano está constituido al menos por un 60 % de agua distribuida de maneras diferentes. Entonces al encontrarse en un ambiente de microgravedad, los líquidos corporales de los astronautas se van concentrando paulatinamente en la mitad superior del cuerpo produciendo un ensanchamiento de las venas del cuello, el efecto de cara redondeada, así como congestión nasal. El organismo trata de compensar estos cambios buscando una manera de redistribuir los líquidos, lo que puede ser causa de desórdenes en el equilibrio, visión distorsionada, así como pérdida de los sentidos del gusto y del olfato. Se ha encontrado que también hay una pérdida en el volumen de sangre, que puede ser del orden de 20 %. Al haber una cantidad menor de sangre para bombear, el corazón puede también atrofiarse. Un corazón debilitado bombea la sangre con menor presión, lo que provoca que ésta transporte menos oxígeno. Cuando esta sangre llega al cerebro, por ejemplo, provocará que el astronauta se sienta mareado o débil. Afortunadamente, estos efectos son reversibles al regresar a la Tierra.

Otro de los efectos importantes que debe vigilarse en los viajeros espaciales se relaciona con los aspectos psicológicos. Aun cuando hay pocos estudios al respecto y parece ser que los astronautas y cosmonautas no reportan haber vivenciado un estrés psicológico a causa de las diferentes etapas de un viaje espacial, aspectos como la responsabilidad de desempeñarse con los más altos estándares en las actividades encomendadas durante la misión, el saber que están bajo la continua observación del público o el saber y sentir que están lejos de los amigos y familia, son algunos de los aspectos que influyen en la conducta de los astronautas.

El ritmo circadiano también se ve afectado severamente ya que los ciclos de luz y oscuridad son muy irregulares dentro de una nave espacial, además de que los niveles de ruido son altos

debido a la necesidad de mantener en funcionamiento equipo, experimentos a bordo, e instalaciones diversas. Por lo tanto la cantidad y calidad del sueño de los astronautas es pobre. Por lo tanto las investigaciones en este tema están orientadas a mejorar el tiempo de sueño ya que es claro que un individuo bien descansado es más productivo.<sup>8</sup>

Cuando los viajeros espaciales regresan a la Tierra, sus cuerpos requieren de un periodo de readaptación a su ambiente natural marcado principalmente por el regreso a un entorno en el que nuevamente opera la gravedad. Pueden presentarse algunas dificultades para mantenerse erguidos, enfocar su vista, caminar o girarse repentinamente.

En otras secciones del libro se encuentran casos que ilustran de manera más detallada y puntual algunos de estos padecimientos y la manera en que los avances en la medicina espacial están ayudando a minimizarlos o a hacerlos menos agresivos y peligrosos para los viajeros espaciales.

## Los primeros vuelos espaciales

La exploración de las características del espacio exterior se remonta a los experimentos realizados con globos a partir de 1930 por Auguste A. Piccard, un físico, inventor y explorador suizo, pionero en el estudio de los rayos cósmicos y de la atmósfera alta terrestre. Los años 30 y 40 registran numerosos avances en el conocimiento de los parámetros físicos de este novedoso ambiente, comienzan a realizarse experimentos que combinan a las ciencias físicas con las ciencias biológicas y que permiten en agosto de 1960 enviar al espacio exterior a las perras Belka y Strelka, a bordo de la cosmonave Korabl-Sputnik 2, mantenerlas en órbita alrededor de la Tierra y traerlas a salvo de regreso, convirtiéndolas en los primeros seres vivos en viajar y regresar del espacio exterior en buenas condiciones físicas. Estos proyectos fueron, paulatinamente, consolidando la idea de estar en posibilidades de enviar con éxito humanos al espacio.

Por otro lado, en 1947 el doctor Hubertus Strughold, fisiólogo y médico alemán, emigra a Estados Unidos y junto con Richard Lindenberg, médico y patólogo estadounidense, es asignado a la recién instituida Escuela de Medicina Aeroespacial de la Fuerza Aérea estadounidense en el Campo Randolph, cerca de San Antonio, Texas. Ahí comenzaron a realizar las primeras investigaciones acerca de los retos médicos que implicaban los viajes espaciales. En 1948 acuñaron el término “medicina espacial” para identificar a estas investigaciones. Un año después, el doctor Strughold recibió el nombramiento de Profesor de Medicina del Espacio. Su interés por las investigaciones sobre control de la atmósfera, el efecto físico de la gravedad cero y la disrupción de los ciclos normales humanos provocados por los vuelos espaciales tripulados le valieron el ser considerado como el Padre de la Medicina Espacial.<sup>13</sup>

Entre 1952 y 1954 Strughold atestiguó la construcción del primer simulador de una cabina de vuelo, una cámara sellada dentro de la que se colocaban individuos por periodos prolongados para observar los potenciales efectos físicos y fisiológicos de vuelos fuera de la atmósfera. En 1962 fue nombrado director de la naciente División Médica Aeroespacial de la NASA, en donde apoyó sólidamente el diseño de los trajes presurizados de los astronautas, así como los sistemas de soporte de vida utilizados por los astronautas a bordo de las misiones Gemini y Apolo. Dirigió el entrenamiento especializado de los cirujanos y equipo médico del programa Apolo en preparación para la misión de llegada a la Luna. El doctor Strughold se retiró de la NASA en 1968.<sup>13</sup>

El Cuadro 7.2 recopila información sobre los primeros proyectos espaciales que pretendían mantener a un ser humano en el espacio. Estos proyectos debieron resolver aspectos esenciales para garantizar el soporte vital, la seguridad y la higiene de los primeros astronautas, como:

## Cuadro 7.2.

### Primeros proyectos espaciales tripulados

Nombre del proyecto	Institución responsable	Duración	Comentarios
Vostok	Fuerza Aérea Rusa	1961-1963	Primer programa de la extinta Unión Soviética ideado para colocar seres humanos en órbita y regresarlos a salvo. El primer vuelo tripulado exitoso lo realizaron el 12 de abril de 1961
Mercury	NASA	1958-1963	Primer programa de Estados Unidos dedicado a realizar vuelos espaciales tripulados. El primer vuelo tripulado exitoso lo realizaron el 5 de mayo de 1961
Gemini	NASA	1961-1966	La nave espacial tenía capacidad para dos astronautas y entre sus principales logros se cuentan periodos de viaje lo suficientemente prolongados como para verificar que era posible viajar a la Luna y regresar, el perfeccionamiento de actividades extravehiculares y el desarrollo de maniobras que permitieran un potencial alunizaje
Apolo	NASA	1961-1972	Primer programa espacial con el objetivo de aterrizar una nave espacial tripulada en la Luna. El primer vuelo tripulado de este proyecto se realizó el 25 de mayo de 1961, pero fue el vuelo del 20 de julio de 1969 correspondiente a la misión Apolo 11, el que llevó a Neil Armstrong, Buzz Aldrin y Michael Collins a posarse en la superficie lunar

- aporte de una adecuada atmósfera para respirar
- mantenimiento de una adecuada presión
- aprovisionamiento de agua y alimentos.
- eliminación de residuos y sustancias catabólicas
- control térmico del interior del vehículo
- superación técnica de condiciones extremas de temperatura, aceleración y ausencia de gravedad

Los estudios más avanzados en medicina espacial se han realizado en las misiones espaciales del proyecto Apolo y en los vuelos de Skylab, la primera estación espacial estadounidense.

La NASA desarrolla el programa de investigación humana “Efectos diferenciales en astronautas gemelos idénticos en la medición de exposiciones de factores espaciales”, entre cuyos principales objetivos se encuentra el medir los cambios que sufre el cuerpo humano en el estado de ingravidez del espacio y compararlos con personas en Tierra. El estudio intenta medir los cambios en el área física corporal y la esfera psicológica con el propósito final de determinar las respuestas del cuerpo y mente del ser humano y así disminuir los impactos nocivos en la salud, preparándolos para viajes espaciales prolongados, probablemente en el 2030 con destino al planeta Marte. El astronauta Scott Kelly y su gemelo Mark forman parte de este programa. Scott logró permanecer 340 días en la Estación Espacial Internacional y a su regreso a la Tierra se registraron cambios como que su estatura aumentó.

## La conquista del Espacio

La humanidad comenzó la exploración del espacio exterior a principios del siglo xx con el lanzamiento de globos de exploración atmosférica. Rápidamente se incorporaron los lanzamientos de cohetes tripulados. Misiones de exploración espacial no tripuladas como las Pioneer y las Voyager 1 y 2 han alcanzado los confines del sistema solar. La misión Pioneer 10 fue lanzada el 2 de marzo de 1972 y fue la primera en visitar el planeta Júpiter, el planeta de mayor tamaño del sistema solar localizado a 5.2 unidades astronómicas (UA) del Sol, es decir a poco más de 778 millones de kilómetros. La comunicación con la misión Pioneer 10 se perdió el 23 de enero de 2003 cuando se encontraba a 80 UA de la Tierra. Notablemente la misión Voyager 1 es el instrumento construido por el hombre que ha viajado la mayor distancia desde la Tierra. En abril de 2016 se recibieron señales indicando que se encontraba a 134 UA, convirtiéndose así en la nave de exploración espacial que ha alcanzado el espacio interestelar. Fue lanzada el 5 de septiembre de 1977 con el objetivo de realizar sobrevuelos por los planetas Júpiter y Saturno, así como por el satélite Titán, uno de los mayores satélites naturales del sistema solar.

El 12 de abril de 1961 el piloto y cosmonauta ruso Yuri Alekseyevich Gagarin se convirtió en el primer ser humano en viajar al espacio exterior y el primero en realizar un vuelo completo alrededor de la Tierra a bordo de la nave espacial Vostok. El mismo Gagarin reportó en la narrativa de su experiencia espacial que los primeros momentos del vuelo fueron incómodos, que la sensación de ingravidez fue algo completamente novedoso y que sintió como si estuviera colgando de cuerdas en una posición horizontal, como si estuviera suspendido.<sup>14</sup>

La persona que ha permanecido durante más tiempo en el espacio exterior es el cosmonauta Gennady Ivanovich Padalka, quien ha acumulado 879 días participando en cinco misiones diferentes, una en la estación espacial Mir y cuatro en la Estación Espacial Internacional. Peggy Whitson es la mujer que ha logrado acumular más tiempo en el espacio exterior, 376 días, 17 horas y 22 minutos participando en dos misiones a bordo de la Estación Espacial Internacional. El cosmonauta ruso Valeri Vladimirovich Polyakov, ostenta el récord de haber permanecido solo en la estación espacial Mir durante 437 días y 18 horas. Samantha Cristoforetti, una astronauta italiana, es la mujer que mantiene el récord de haber permanecido sola en un vuelo espacial durante 199 días y 16 horas en la misión Expedition 42/Expedition 43 de la Estación Espacial Internacional entre 2014 y 2015. En el Cuadro 7.3 se mencionan algunos astronautas de habla hispana que han participado en misiones espaciales.

Se han acumulado un poco más de 50 años de experiencia en viajes espaciales que han permitido lograr un mejor entendimiento no sólo de los retos tecnológicos que representa el espacio

### **Cuadro 7.3.**

#### Personas hispanoparlantes que han viajado al espacio exterior

<b>Nombre</b>	<b>País*</b>	<b>Misión (Fecha de lanzamiento)</b>	<b>Comentarios</b>
Arnaldo Tamayo Méndez	Cuba	Soyuz 30 (18 de septiembre de 1980)	Primera persona latinoamericana en viajar al espacio
Rodolfo Neri Vela	México	STS-61-B (26 de noviembre de 1985)	Primer mexicano en volar al espacio
Franklin Chang-Díaz	Estados Unidos Costa Rica	STS-61-C (12 de enero de 1986) STS-34 (18 de octubre de 1989) STS-46 (31 de julio de 1992) STS-60 (3 de febrero de 1994) STS-75 (22 de febrero de 1996) STS-91 (2 de junio de 1998) STS-111 (5 de junio de 2002)	Primer astronauta costarricense
Sidney M. Gutiérrez	Estados Unidos	STS-40 (5 de junio de 1991) STS-59 (9 de abril de 1994)	Primer astronauta hispano nacido en Estados Unidos
Ellen Ochoa	Estados Unidos México	STS-56 (8 de abril de 1993) STS-66 (3 de noviembre de 1994) STS-96 (27 de mayo de 1999) STS-110 (8 de abril de 2002)	Primera astronauta estadounidense de ascendencia mexicana
Michael López-Alegría	Estados Unidos España	STS-73 (20 de octubre de 1995) STS-92 (11 de octubre de 2000) STS-113 (24 de noviembre de 2002) Soyuz TMA-9 (18 de septiembre de 2006)	Primer astronauta estadounidense de ascendencia española

*Continúa*

*continuación*

Carlos I. Noriega	Estados Unidos Perú	STS-84 (15 de mayo de 1997) STS-97 (30 de noviembre de 2000)	Primer astronauta estado- unidense de ascendencia peruana
Pedro Duque	España	STS-95 (29 de octubre de 1998) Soyuz TMA-3/2 (18 de octubre de 2003)	Primer astronauta español
John D. Olivas	Estados Unidos México	STS-117 (8 de junio de 2007) STS-128 (28 de agosto de 2009)	
George D. Zamka	Estados Unidos Colombia	STS-120 (23 de octubre de 2007) STS-130 (8 de febrero de 2010)	
Joseph M. Acaba	Estados Unidos Puerto Rico	STS-119 (15 de marzo de 2009) Soyuz TMA-04M (15 de mayo de 2012)	Primer astronauta estado- unidense de ascendencia puertorriqueña
José Hernández	Estados Unidos México	STS-128 (28 de agosto de 2009)	

\* El primer país enlistado corresponde al de residencia. El segundo país enlistado corresponde al de nacimiento o ascendencia.

exterior, sino de la forma en que el cuerpo humano logra adaptarse a las condiciones del mismo. Debido a las exigencias asociadas con la protección de los astronautas, los viajes espaciales tripulados han estado restringidos a vuelos de órbita baja y a viajes hacia la Luna. En un futuro cercano los viajes interplanetarios que permitirán visitar a los planetas cercanos a la Tierra o la industrialización del espacio que permitirá aprovechar los recursos de otros mundos, requerirán de la capacidad de los seres humanos para permanecer por espacios de tiempo mayores a los hasta ahora logrados, en el espacio. Por ejemplo, con la actual tecnología un viaje a Marte tiene una duración de entre 8 a 9 meses.

Para pensar en la posibilidad de que un viaje tripulado a Marte pueda realizarse es necesario tener resuelto la manera de proporcionar satisfactores a las necesidades básicas de los tripulantes, así como protección hacia el medio hostil en el que estarán viajando, facilidades médicas, sistemas de comunicación remotos ágiles con la Tierra y facilidades que les permitan tener una convivencia armoniosa.

John Glenn realizó su primer vuelo espacial a bordo de la misión Friendship 7 el 20 de febrero de 1962, convirtiéndose en el primer estadounidense en completar una vuelta alrededor de la Tierra y en el quinto en visitar el espacio exterior. El 29 de octubre de 1998 realizó un viaje espacial más, a la edad de 77 años a bordo de la misión Discovery STS-95, convirtiéndose en la persona de mayor edad en volar hacia el espacio exterior, acto interesante que le proporcionó a la NASA un caudal de información sobre los efectos del espacio en personas mayores. Sin embargo, aún se desconocen

estos efectos en infantes lo que nos demuestra que las investigaciones en materia del espacio exterior tienen todavía mucho que ofrecernos y, por ende, es necesario continuar generando conocimiento, tecnología, proyectos y misiones que nos permitan acercarnos a la colonización de la última frontera.

## Referencias

1. Ramírez SI, Terrazas H. Astrobiología, una nueva disciplina científica. *Inventio. La génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 2006.2(3): p. 45-53.
2. Tepfer D, Zalar A, Leach, S. Sanz-Fernández de Cordoba S. Survival of plant seeds, their UV screens, and nptII DNA for 18 months outside the International Space Station. *Astrobiology*. 2012;12(5): p. 517-28.
3. Wassmann M, Moeller R, Rabbow E, Panitz C, Horneck G, Reitz G, et al. Survival of spores of the UV-Resistant *Bacillus subtilis* Strain MW01 after exposure to Low-Earth orbit and simulated martian conditions: data from space experiment ADAPT and EXPOSER-E. *Astrobiology*. 2012;12(5): p. 498-507.
4. Hubbard S. We can send humans to Mars safely and affordably. *New Space*. 2015;3(2): p. 71.
5. Seinfeld JH, Pandis SN. *Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change*. United States of America: John Wiley & Sons; 1997: 1326.
6. Von Kármán T, Edson L. *The wind and beyond: Theodore von Karman, pioneer in aviation and pathfinder in space*. USA: Little, Brown; 1967: 376
7. Affairs, U.N.O.f.D., *Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies*, U. Nations, Editor. 1967, UN: London, Moscow and Washington.
8. Sulzman FM, Genin AM. Life support and habitability. *Space, Biology and Medicine*. Nicogossian AE, Mohler SR, Gazonko OG, Grigoryev AI (ed). Vol. II. 1994, Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 423.
9. NASA, Preliminary Report Regarding NASA's Space Launch System and Multi-Purpose Crew Vehicle. 2011, NASA. p. 22.
10. Gueguinou N, Huin-Schohn C, Bascove M, Bueb JL, Schirhart E, Legrand-Frossi C, et al. Could spaceflight-associated immune system weakening preclude the expansion of human presence beyond Earth's orbit. *J. Leukocyte Biology*. 2009;85(5):p. 1027-38.
11. Cherry JD, Liu B, Frost JL, Lemere CA, Williams JP, Olschowka JA, et al. Galactic cosmic radiation leads to cognitive impairment and increased Ab plaque accumulation in a mouse model of Alzheimer's disease. *PLoS ONE*. 2012;7(12): p. e53275.
12. Zeitlin C, Hassler DM, Cucinotta FA, Ehresmann B, Wimmer-Schweingruber RF, Brinza DE, et al. Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory. *Science*. 2013;340(6136): p. 1080-84.
13. Campell MR, Strughold H. The father of Space Medicine. *Aviation, Space and Environmental Medicine*. 2007;78(7): p. 716-29.
14. Bizony P. First man of Space: the flight and plight of Yuri Gagarin. *Engineering and Technology Magazine*. 2011;6(3).

# 8. Aportaciones de la tecnología espacial a la salud humana

Benito Orozco Serna, Fabiola Vázquez Torres, Luz Ernestina Morán Solares

## ■ Introducción

El ser humano, desde tiempos inmemorables, ha tratado de mejorar o cuidar su salud mediante técnicas y métodos que han estado a su alcance de acuerdo con su desarrollo. La mejora de la salud humana ha sido el principal beneficio de los importantes avances científicos y tecnológicos que la humanidad ha logrado. Son incontables los beneficios que hemos tenido al invertir en dichos desarrollos, en contraste, el desarrollo de la tecnología espacial desde sus inicios ha generado de forma exponencial una mayor derrama de beneficios para nuestra salud.

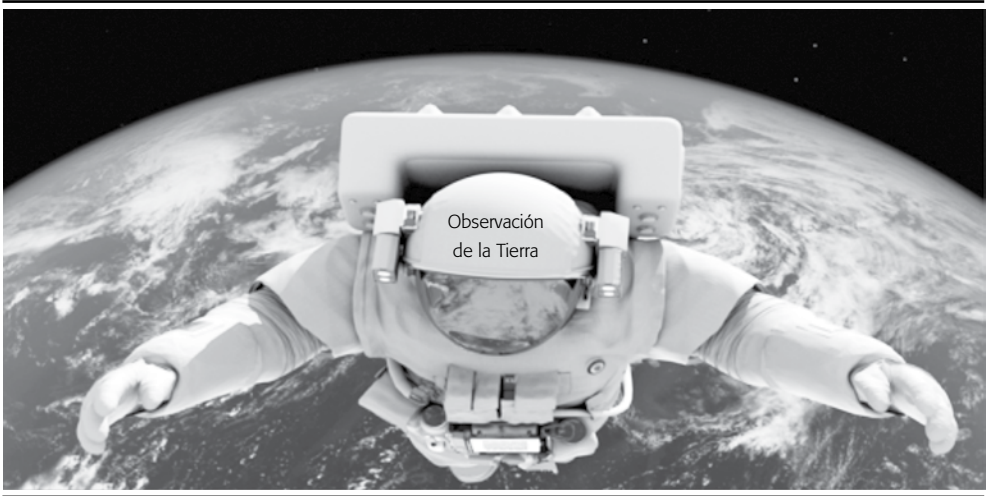
En la Estación Espacial Internacional (EEI), el diagnóstico de heridas o enfermedades en los astronautas puede ser muy difícil; los dispositivos como rayos X, tomografía computada (TC), o resonancia magnética (MRI) son muy grandes y pesados para poder ser transportados al espacio. Y aunque los astronautas reciben entrenamiento médico de diagnóstico, los médicos más cercanos se encuentran a miles de kilómetros en la Tierra. Los futuros astronautas en misiones espaciales de larga duración, como expediciones a la Luna o a Marte, experimentarán mucho mayores desafíos. Son estos problemas los que han inspirado a los científicos y tecnólogos espaciales para crear mejores instrumentos de diagnóstico, que al final de cuentas, los beneficiados somos los que vivimos en tierra.

Adicionalmente, el efecto de microgravedad que existe en la Estación Espacial Internacional no sólo es un importante hecho en el espacio, sino que es un elemento revolucionario en la tecnología espacial en tierra, dado que podría muy pronto ayudar a curar enfermedades del corazón o diabetes. Esto se podría lograr gracias a que se pueden entender comportamientos de las enfermedades de una manera diferente mediante los efectos que causa la microgravedad, la cual, a su vez, puede ser simulada en tierra mediante biorreactores.

La tecnología espacial también nos permite monitorear la salud de nuestro planeta a través de la observación constante de las actividades humanas. Es importante entender las causas del calentamiento global. Es importante entender el clima en todo momento para estar preparados. Además, el tema del clima espacial está tomando una importancia también crucial en el contexto, por ejemplo, de las telecomunicaciones y en las redes de suministro de electricidad. Monitoreo del suelo por el uso de agroquímicos, evolución de plagas, avance de tierras agrícolas en desmedro de las forestales, qué calidad tiene el agua de un lago o río y su probable incidencia en la salud de las personas, la detección de mareas rojas (y una lista interminable de posibilidades) implican un aporte para que se puedan no sólo combatir sino prevenir patologías.

El estudio de cómo reacciona el cuerpo humano a la microgravedad, a las radiaciones o a las brutales aceleraciones, son sólo unos pocos ejemplos de lo que conlleva la investigación espacial.





**Figura 8.1.**  
Aplicaciones a la salud humana de la ciencia y tecnología espacial.

Aunque en un principio no están pensados para su aplicación en la Tierra, muchos de estos avances acaban finalmente redundando en beneficio de la humanidad, y en la mayoría de los casos en productos totalmente cotidianos. En fin, debemos entender la importancia que implica la inversión en el espacio y los beneficios que nos trae.

A continuación veremos algunos pocos pero importantes ejemplos de estos desarrollos. Son muchos los ejemplos que se podrían mencionar pero tal vez necesitaríamos un libro completo, en su lugar, proponemos una clasificación basándonos en el tipo de beneficio que proporciona. El objetivo de este capítulo es el de generar una mayor conciencia con la población en general en cuanto a los beneficios que conlleva la inversión de los países en la investigación científica y desarrollo tecnológico espacial, así como el porqué es importante desarrollar esta rama de la medicina en México, la medicina espacial (Figura 8.1).

## Clasificación

Por el tipo de beneficio en la salud humana que proporciona la ciencia y tecnología espacial, se pueden mencionar cuatro grandes vertientes: 1) para observación de la Tierra; 2) para la salud y bienestar de los astronautas; 3) para mejorar la salud de la población en tierra, y 4) para realizar investigaciones que conduzcan a la creación de nuevos medicamentos y mejores tratamientos.

## Uso de tecnología espacial para observación de la Tierra

Aunque no nos parezca muy claro, la ciencia y tecnología espacial provee diversas aplicaciones para salud pública.

*Vigilancia de enfermedades.* En estos tiempos se ha hecho más fácil y barato para las personas viajar alrededor del mundo, y por lo mismo, se facilita la transmisión de enfermedades. Una vigilancia coordinada de epidemias y alerta temprana de sus efectos son la clave para limitar sus efectos. La infraestructura que se emplea para esto es la utilización de satélites de observación de la Tierra, sistemas de posicionamiento global y satélites de comunicaciones y sus aplicaciones asociadas. Todo esto en conjunto mejora la vigilancia y provee una efectiva alerta temprana.

En este tipo de tecnología se aborda el seguimiento de las enfermedades causadas y transmitidas por vectores, los organismos patógenos que se transmiten pueden causar enfermedades como:

- leishmaniosis visceral: también es conocida como kala-azar, es una enfermedad infecciosa producida por un protozoo parásito del género *Leishmania*, puede afectar al hombre y diferentes especies animales, principalmente el perro
- Hantavirus: es un género que agrupa varios virus RNA, que son transmitidos por roedores infectados y en humanos generalmente causan fiebre hemorrágica o una afección pulmonar muy grave
- paludismo: también conocido como malaria, es una enfermedad causada por parásitos del género *Plasmodium*, y algunos estudios sugieren que pudo haberse transmitido al ser humano a través de algunos monos
- dengue: es una enfermedad infecciosa causada por el virus del dengue, del género flavivirus que es transmitida por mosquitos, principalmente por el *Aedes aegypti*
- zika: es causada por el virus del zika, que se propaga entre las personas principalmente a través de la picadura de un mosquito de la especie *Aedes*. Los síntomas más comunes son fiebre, sarpullido, dolor de articulaciones y conjuntivitis
- chagas: es una infección causada por un parásito flagelado denominado *Trypanosoma cruzi*, y es llamada así en reconocimiento a su descubridor, el brasileño Carlos Chagas

Este tipo de tecnologías también nos permiten el monitoreo de la contaminación del agua y su incidencia en enfermedades. Ya son varios países los que han implementado sistemas de monitoreo del agua, por ejemplo la NASA en Estados Unidos lo hace a través del proyecto GRACE (por sus siglas en inglés), que consiste de dos satélites enviados al espacio desde el 2002, los cuales generan información útil acerca del agua dulce en la Tierra. Otro ejemplo es Brasil, que ha implementado el sistema SOMABrasil (Sistema de Observación y Monitoreo de Agricultura en Brasil), el cual recolecta datos de diferentes fuentes (incluyendo imágenes satelitales) y los presenta en mapas. El Servicio Meteorológico Nacional en México también utiliza tecnología espacial en el monitoreo de la sequía en diversas partes del país.

En el monitoreo de la calidad del aire, se toman datos de diversas fuentes, tanto de instrumentos en tierra como en satélites. A través de satélites, se utilizan algunos métodos, entre ellos, medida del espesor de aerosoles en la atmósfera, inspección visual de la imagen de satélite, medida de partículas negras, y análisis del cambio en la cobertura y uso de la tierra.

Las observaciones por satélite pueden proporcionar una visión completa de una ciudad, mostrar las diferentes fuentes de contaminación y el patrón de distribución, ayudar a determinar dónde se debe centrar el esfuerzo para reducir el nivel de contaminación, y determinar una relación entre las características de la población y la distribución de la contaminación del aire.

Muchos gobiernos se han dado a la tarea de desarrollar proyectos completos espaciales con el fin de tener un sistema de alerta temprana en salud que ayude a prevenir todas estas enfermedades.

## Monitoreo de la vegetación desde el espacio

A pesar de que el calentamiento global es noticia frecuente en los periódicos, el papel desempeñado por la vegetación al absorber o emitir dióxido de carbono es muy difícil de estimar. La asimilación del CO<sub>2</sub> por las plantas es realizada a través de la fotosíntesis. Sin embargo, el mismo se vuelve a emitir a través de la respiración, por lo que, en función de la salud de la vegetación, este ciclo puede actuar ya sea como un sumidero o como una fuente de carbono.

Se están desarrollando sistemas para tratar de cuantificar flujos de carbono en una región del planeta, utilizando un modelo de sistema simplificado de intercambio de carbono combinado con imágenes de satélite, con el fin de obtener una estimación repetible del comportamiento de la vegetación terrestre a nivel mundial. Cada día, para un grupo de lugares, el modelo estima tres tipos de flujos de masa de carbono; el primero representa la absorción de carbono realizada por la fotosíntesis, la segunda se refiere a pérdidas por respiración debidas en parte al crecimiento de las plantas, y el tercero, las pérdidas causadas por la descomposición de la hojarasca del suelo. Los datos tomados de imágenes de satélite ofrecen parámetros sobre la cantidad de luz solar disponible para la fotosíntesis. Todo esto se combina con información proveniente de estaciones meteorológicas colocadas en el área de estudio.

## Desarrollo de tecnología para la salud de los astronautas

La salud de los astronautas es prioridad en cada una de las misiones espaciales tripuladas, los que van al espacio son personas que están preparados física y psicológicamente a 100%. El entrenamiento de un astronauta empieza desde varios años antes de realizar la misión, y consta de varias fases. La primera fase dura un año y consiste en un curso de entrenamiento básico que incluye la adquisición de conocimientos médicos; la segunda fase también dura un año y consiste en adquirir el conocimiento de la Estación Espacial Internacional en detalle, los experimentos que se llevan a cabo y los vehículos de transporte; la tercera fase incluye la familiarización de la falta de gravedad mediante vuelos parabólicos.

Desde que un astronauta inicia su entrenamiento, luego realiza su misión en el espacio, y aún después de regresar a tierra, se le debe monitorear su estado de salud de forma continua. Esta necesidad ha propiciado el desarrollo de diversos instrumentos de monitoreo y diagnóstico que han repercutido enormemente en la forma en la que un médico (especialista o no) nos puede examinar.

Algunos de los desarrollos tecnológicos se mencionan a continuación.

## Telemedicina

El uso combinado de la información y la tecnología de comunicación abre nuevas posibilidades para la medicina. No sólo es posible ahora prestar atención médica a grandes distancias, sino que la tecnología también puede ayudar a que la medicina sea más segura, más eficaz y más conveniente. El uso de la información y de la tecnología de comunicación ofrece a los pacientes y médicos más oportunidades de adquirir conocimientos sobre opciones de tratamiento. Cuando la información está disponible más fácilmente, los pacientes y médicos pueden evaluar de manera más completa sus opciones y tomar decisiones totalmente informados.

La Telemedicina es el ejercicio de la medicina a distancia, cuyas intervenciones, diagnósticos, decisiones de tratamientos y recomendaciones están basadas en datos, documentos y otra información transmitida a través de sistemas de telecomunicación.

La telemedicina como la conocemos fue creada para el monitoreo de la salud de los astronautas, desde monitoreo físico hasta psicológico. Desde entonces muchos gobiernos la han adoptado y hasta la han regulado, estableciendo los principios en los que se debe basar, por ejemplo se habla de la relación médico-paciente y la confidencialidad de la información generada durante la consulta; se habla sobre las responsabilidades del médico, quien se debe asegurar que el paciente, los profesionales de la salud que lo atienden o los familiares, puedan utilizar el sistema de telecomunicación y los instrumentos necesarios; y también se habla sobre la calidad de la atención, se deben establecer medidas de calidad para asegurar el mejor diagnóstico y prácticas de tratamiento posibles en la telemedicina.

En México la telemedicina está en pañales, pues no se ha podido desarrollar de la forma como quisiéramos debido a la escasa conectividad existente, sobre todo en comunidades de difícil acceso, y en regiones en las que la orografía del terreno no ayuda a tener una buena infraestructura tecnológica. En los estados en los que sí se ha podido utilizar la telemedicina se ha avanzado mucho, por ejemplo, en el Estado de México ya se utilizan 23 robots para que con sólo cinco médicos intensivistas se atienda a pacientes que no tenían el acceso directo a un servicio de especialidad, dando también una solución parcial al hecho de que no hay especialistas que deseen trasladarse a lugares de difícil acceso (Figura 8.2).



**Figura 8.2.** Robot utilizado para realizar consultas de médicos especialistas. Se usan en hospitales que no tienen acceso a determinados especialistas.

## Angioplastia láser

Una angioplastia es un procedimiento médico a través del cual se busca dilatar una arteria ocluida para restaurar el correcto flujo sanguíneo, obstruido, por ejemplo, por placas de colesterol. El procedimiento era bastante complejo e invasivo, pero gracias a las angioplastias láser, hoy es mucho más simple, menos peligroso y también menos invasivo. Gracias a los aportes de la NASA al campo de la medicina, hoy puede realizarse una angioplastia introduciendo un pequeño par de cables en la arteria necesaria, para desintegrar las placas con láser ultravioleta a 65 °C. Además, este método es hasta un 85 % más eficaz, menos doloroso, menos riesgoso y al no ser invasivo, no se necesita una cirugía.

## Marcapasos cardiacos de última generación

En el pasado, cuando una persona sobrevivía a un paro cardíaco, tenía un 55 % de probabilidades de volver a sufrir otro ataque en el correr de los próximos 2 años. Sin embargo, gracias a los avances de la tecnología espacial y el perfeccionamiento de los marcapasos, ese riesgo puede disminuir hasta 3 %.

## Dispositivos para el análisis de sangre

Este instrumento es capaz de leer la acidez, alcalinidad, niveles de dióxido de carbono, bicarbonato de sodio, potasio, cloruro y glucosa en muy pocos minutos, y con muy poca sangre (3 gotas). Ahora también se utilizan en hospitales, vuelos, barcos, submarinos, y otros sitios.

## Termómetros infrarrojos

Tomar la temperatura cuando estamos enfermos puede resultar algo complicado, el termómetro estándar de mercurio puede resultar difícil de leer, uno rectal es algo incómodo. Utilizando tecnología originalmente desarrollada para el espacio, específicamente en astronomía para detectar objetos en el infrarrojo, se creó un sensor que sirve como termómetro, funciona midiendo la cantidad de energía infrarroja que el tímpano emite a través del canal auditivo.

## Los gemelos

En 2015 se realizó el primer estudio con gemelos para explorar los efectos a largo plazo de los vuelos espaciales sobre el organismo. En marzo de 2015, Scott Kelly viajó hacia la Estación Espacial Internacional donde trabajó como un astronauta más, mientras su hermano gemelo Mark permaneció en la Tierra. La idea del trabajo es evaluar el impacto de la microgravedad sobre parámetros genéticos, bioquímicos e incluso psicológicos. Las conclusiones iniciales determinan que las estancias a mediano y largo plazos en órbita pueden alterar el sistema inmunitario, se aumenta el riesgo de infección, reacciones de hipersensibilidad o incluso enfermedades autoinmunes. A la fecha aún no se tienen los resultados definitivos de la investigación.

## Limpieza del agua de bacterias y virus

El agua es uno de los consumibles más importantes en una misión espacial. En misiones de larga duración, la tripulación consumirá muchos litros de agua. Para ayudar a reducir la cantidad de



---

**Figura 8.3.**

Los sistemas de filtración de agua que se utilizan en las misiones espaciales tripuladas pueden emplearse en tierra para filtrar agua sucia.

este líquido a transportar, se han desarrollado diferentes técnicas de filtración para reciclar el agua utilizada y convertirla en bebible. Se debe incluir agua, por ejemplo, que se condensa dentro de la superficie de la nave, la que se utiliza para lavar la ropa o trastes, y también agua que se emplea en los experimentos (Figura 8.3).

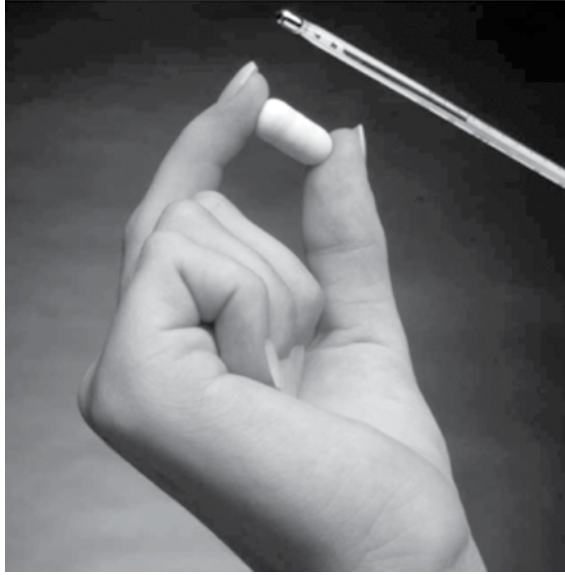
Uno de los retos de reciclar agua que fue utilizada para diferentes propósitos, es que es difícil de anticipar qué impurezas contiene. Puede contener, por ejemplo, componentes orgánicos volátiles (COV) y microbios patógenos, ambos son notoriamente difíciles de remover. Los sistemas desarrollados han probado ser altamente efectivos al remover todo tipo de contaminantes.

Un sistema desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) utiliza una serie de membranas que filtran el agua sucia de varias impurezas mientras es bombeada. Aunque esta técnica está limitada para el uso de los astronautas, el mismo concepto se podría utilizar para filtrar cientos de litros de agua sucia por hora.

La NASA desarrolló un sistema de fibras de óxido de aluminio del orden de nanómetros de diámetro, las cuales tienen propiedades bioadhesivas muy interesantes. Cuando se vierten en un líquido, las fibras electropositivas atraen y retienen partículas electronegativas, tales como bacterias y virus en soluciones a base de agua. Esta tecnología captó el interés de los vuelos espaciales como una posible solución para mejorar la filtración de agua en las cabinas espaciales.

## Píldora termómetro

El agotamiento por calor o hipertermia es una condición aguda causada por la exposición excesiva al calor y la deshidratación. Se produce cuando el cuerpo ya no puede disipar el calor adecuadamente debido a las condiciones extremas del medio ambiente o el aumento de la



**Figura 8.4.**

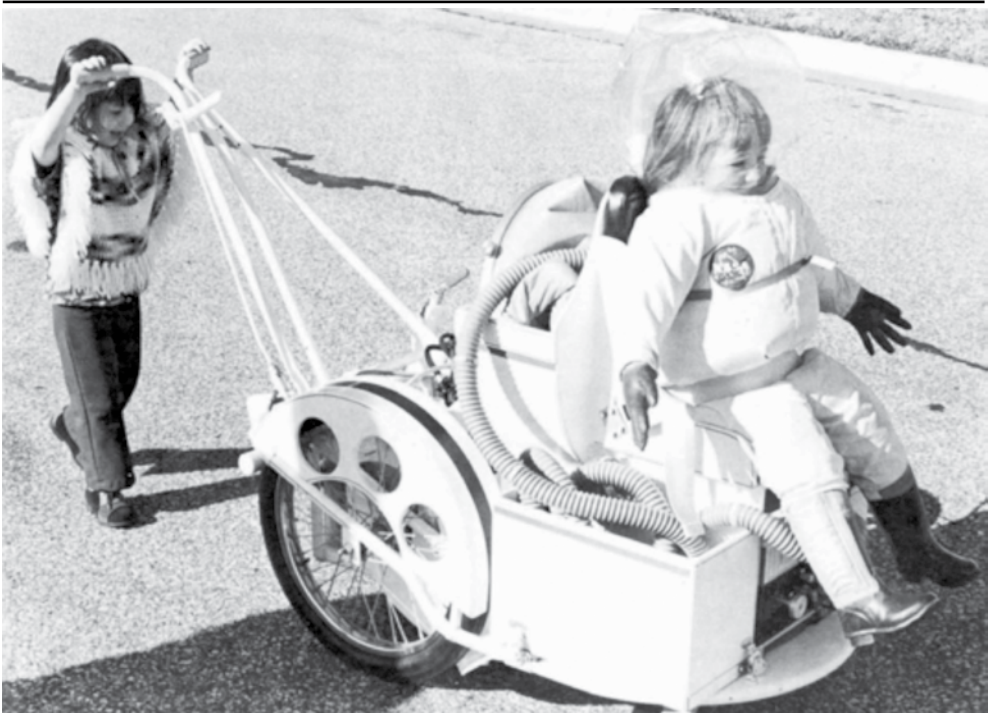
En  $\frac{3}{4}$  de pulgada (2 cm), esta píldora transmite de forma inalámbrica la temperatura del interior del cuerpo mientras viaja a través del tubo digestivo.

producción de calor desde el interior. El agotamiento por calor puede progresar a insolación cuando los mecanismos de termorregulación del cuerpo se sienten abrumados y fallan, al final afecta al cerebro y daña a los órganos e incluso puede causar la muerte.

En el espacio, cuando los astronautas realizan actividad extravehicular se esfuerzan a sí mismos demasiado, lo que puede causar un rápido incremento en la temperatura del cuerpo. Aunque el traje espacial está aislado para mantener a los astronautas lo más cómodos posible de las temperaturas extremas del espacio, el lado del traje que da al sol puede alcanzar temperaturas de hasta 120 °C, mientras que el lado opuesto, que se expone a la oscuridad del espacio profundo, puede alcanzar temperaturas tan bajas como -156 °C; esto, aunado a que los astronautas todavía liberan calor y humedad de sus cuerpos en el interior del traje, podría conducir al agotamiento por calor y, finalmente, a un golpe de calor.

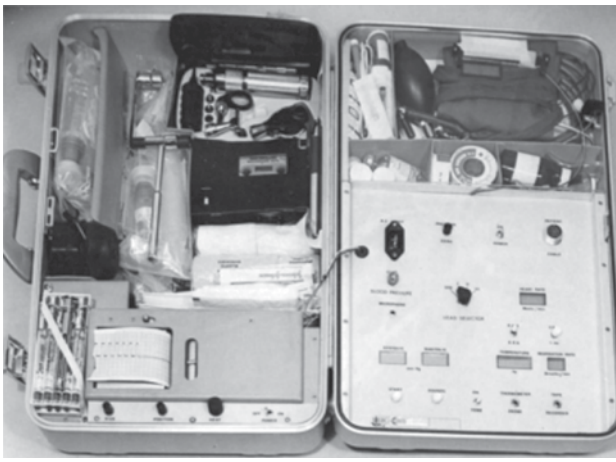
Para monitorear la temperatura de los astronautas durante su viaje espacial, se desarrolló una “pastilla termómetro” llamada Sistema de Monitoreo Termal Ingerible. Incorpora diversas tecnologías espaciales, incluyendo telemetría inalámbrica, circuitería miniaturizada, sensores y baterías (Figura 8.4). Debido a una mayor conciencia del riesgo de un golpe de calor entre los atletas, provocada por la muerte de un jugador de fútbol profesional y uno de fútbol universitario, tan sólo con una semana de diferencia en 2001, el producto está ahora bien recibido como un medio para detectar la temperatura elevada del cuerpo central durante actividades deportivas profesionales.





**Figura 8.5.**

Niña con inmunodeficiencia deja la sala estéril del hospital por más de cuatro horas en un traje modificado. (Cortesía de NASA.)



**Figura 8.6.**

Maletín médico portátil, para su época muy avanzado, pesaba menos de 15 kg, contenía equipo para monitorear y grabar signos vitales, electrocardiogramas y electroencefalogramas. (Cortesía de NASA, 1976.)





---

**Figura 8.7.**

Cirujanos sentados manipulando el sistema de cirugía robótica ZEUS, con el cual se realizan intervenciones mínimamente invasivas. (Cortesía de NASA.)

## Uso de tecnología espacial para mejorar la salud de la población en tierra

La ciencia y tecnología espacial, desde sus inicios, no sólo ha servido para monitorear y controlar la salud de los astronautas, todos los desarrollos que han servido para este fin han tenido una enorme derrama en el beneficio de nuestra salud en tierra. En la Figura 8.5 se muestra un ejemplo de los primeros usos de los beneficios de un traje espacial (1976) con las mismas características que tenían los que se utilizaron para el viaje a la Luna, ya que no se sabía el tipo de microorganismos que pudiera haber. También en la Figura 8.6 se muestra un maletín médico desarrollado a partir de tecnología para monitorear la salud de los astronautas.

Algunos ejemplos más se describen a continuación.

### Cirugía robótica

Al año se realizan millones de cirugías endoscópicas, las cuales consisten en insertar una cámara miniaturizada a través de una incisión en el paciente para acceder a la parte del cuerpo específica para la intervención. El cirujano utiliza la cámara para monitorear la operación y emplea herramientas largas y delgadas. Lo anterior permite reducir el tiempo de curación y recuperación que necesita el paciente y disminuye los costos sanitarios. Ahora, se controla el avance de la cámara de forma computada, la cual se coloca en un brazo robótico, esto evita que una o varias personas deban sostener la cámara y el brazo robótico permite una vista de la cirugía más estable y precisa. Los brazos robóticos provienen de la tecnología de la NASA que se utiliza para dar servicio a satélites y cargas útiles (Figura 8.7).

## Cámara de rayos X

Utilizando tecnología espacial se ha creado esta cámara de rayos X, para su construcción se han empleado técnicas de miniaturización con el objetivo de hacer un poco más agradable la revisión dental. Las radiografías obtenidas con esta cámara presentan un mayor nivel de detalle y un mayor contraste que las que se toman con las cámaras convencionales de rayos X, presentes prácticamente en cualquier consulta hoy en día. El núcleo de la cámara es un diminuto “centelleador estructurado” que convierte los rayos X en luz visible.

## Prótesis

La ciencia y tecnología espacial realmente revolucionó lo referente a las prótesis con un aporte esencial: un material originalmente creado para transbordadores espaciales que ha hecho posible prótesis mucho más complejas, fuertes, ligeras, versátiles e inteligentes. Piernas robóticas capaces de correr, manos artificiales funcionales a gran nivel y, entre otros artefactos, incluso un exoesqueleto robótico.

## Implante coclear

Los implantes cocleares son sumamente importantes para todas aquellas personas que han tenido el infortunio de sufrir problemas de audición o incluso perder el sentido de la escucha por problemas físicos. No obstante, estos implantes son en realidad una versión mejorada del audífono electrónico implantable, desarrollado por Adam Kissiah, ingeniero de la NASA.

## Unidad de cuidado intensivo

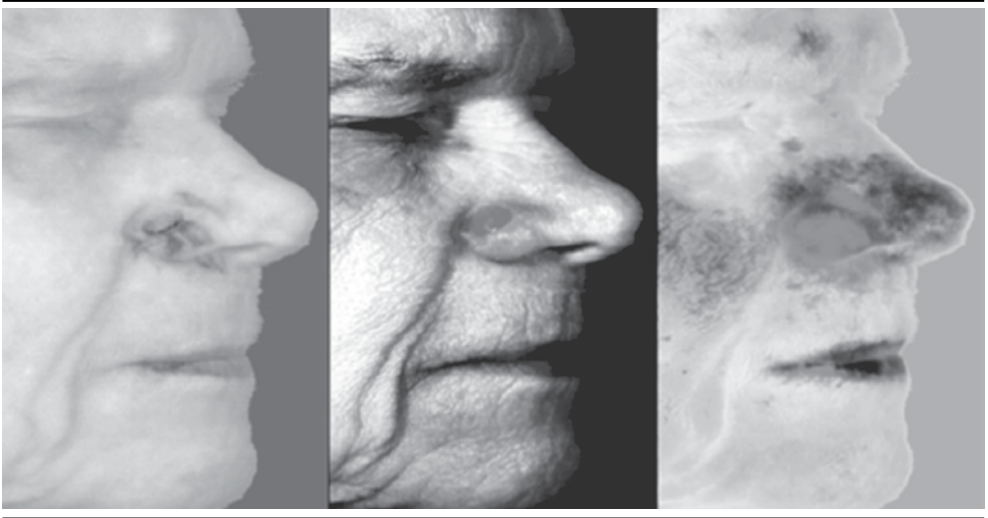
Uno de los legados más determinantes en el tema médico son las unidades de cuidado intensivo (UCI), presentes en todos los hospitales del mundo. Los sistemas de control utilizados en las UCI y salas de rehabilitación del corazón se desarrollaron a partir de los sistemas empleados para controlar la salud de los astronautas durante las primeras misiones espaciales en la década de los sesentas. Innumerables estadounidenses que se recuperan de ataques cardíacos y otras enfermedades o lesiones graves deben sus vidas a esta tecnología, un resultado directo del programa espacial de la NASA.

## Biopsias de mama

La mejora de las biopsias de mama se han desarrollado como resultado de la tecnología para el programa Telescopio Espacial Hubble. Las biopsias pueden ahora ser realizadas con una aguja en lugar de un bisturí. Las biopsias con aguja benefician a los pacientes dejando sólo una pequeña marca en lugar de una gran cicatriz, por un costo significativamente menor —un promedio de  $\frac{1}{4}$  parte de lo que cuesta la biopsia más tradicional.

## Mandíbulas de vida o tijeras de la vida

Esta poderosa herramienta de rescate de mano rápidamente puede cortar a través de los coches u otros recintos con el objetivo de liberar a las personas involucradas en un accidente u otra



### **Figura 8.8.**

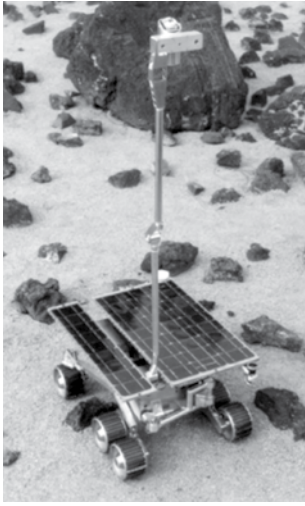
Basada en tecnología de imágenes hiperespectrales usada en satélites de observación de la Tierra, se han desarrollado cámaras con aplicaciones, por ejemplo para cáncer de piel, cáncer cervical y cáncer de mama. Estas imágenes muestran a un paciente con cáncer en nariz.

situación de peligro. La herramienta, desarrollada como parte de la tecnología espacial, utiliza la misma forma de fuerza que se emplea para separar cohetes de combustible sólido de los transbordadores espaciales.

## **Sistema de imágenes hiperespectrales para diagnóstico médico**

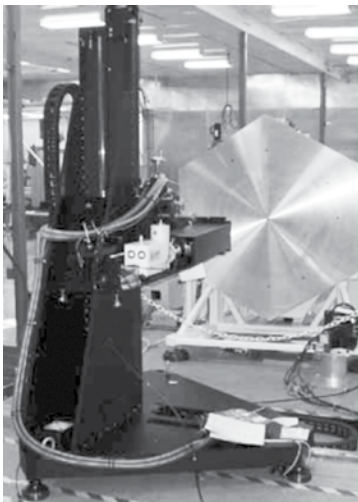
Hasta hace poco tiempo, para diagnóstico, el médico sólo podía ver imágenes de rayos X, de endoscopio (cámara en el visible), resonancia electromagnética, termografía y de otros aparatos; todas estas técnicas utilizan un pequeño rango de la longitud de onda de la luz. Con la ayuda de la tecnología espacial, se está desarrollando la técnica de obtener imágenes hiperespectrales, en las cuales se pueden ver los objetos en diferentes longitudes de onda al mismo tiempo. Las imágenes hiperespectrales es el proceso de escaneo y despliegue de una imagen dentro de una sección del espectro electromagnético. Para crear una imagen que nuestros ojos puedan ver, los niveles de energía de un objeto se codifican con colores y mapeados en capas. Este conjunto de imágenes proveerá información específica sobre la forma en la que un objeto transmite, refleja o absorbe energía en varias longitudes de onda.

Esta técnica de imagen se ha utilizado para observación de la superficie terrestre desde el lanzamiento del satélite Landsat 1. Ahora, podemos emplearla para aplicaciones médicas como una herramienta de diagnóstico. Mediante las imágenes hiperespectrales se pueden ver las heridas y quemaduras para revisar las curaciones, explorar la piel para detectar y controlar enfermedades, y ver el interior de los ojos para detectar retinopatía diabética y edema macular significativo. En aplicaciones de microscopía se incluyen análisis de células, esporas y de DNA (Figura 8.8).



**Figura 8.9.**

**a**, Robot llamado Rocky 7, diseñado para futuras misiones a Marte y probado en el desierto de Mohave. **b**, Robot QC-bot, desarrollado a partir de Rocky 7, diseñado para funcionar en un hospital y realizar tareas como repartir medicinas, anunciar citas, y otras acciones.



**Figura 8.10.**

**a**, Segmento del telescopio espacial James Webb siendo analizada su superficie. **b**, Instrumento analizador del ojo humano creado a partir de la misma tecnología de análisis para la superficie del telescopio espacial James Webb.

## Robots de hospital

Durante varios años se ha realizado una gran cantidad de misiones y programas a Marte, lo cual ha impulsado los avances tecnológicos para tener actualmente una impresionante colección de información e imágenes del planeta. Se han desarrollado en Marte misiones científicas y de exploración mediante robots. Uno de estos prototipos fue el Rocky 7, construido en el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL por sus siglas en inglés) a mediados de los años 90, y sirvió como un vehículo de navegación y tomador de muestras en la superficie del planeta rojo (Figura 8.9 a). Rocky 7 tiene un diseño con pocos actuadores (motores) para su movilidad, y otros pocos para manipulación de las muestras (brazo). El robot puede cavar y recoger pequeñas rocas, mientras que el mástil tiene cámaras y la capacidad de albergar un instrumento adicional, por lo general un microscopio. El objetivo principal del mástil era proveer imágenes del terreno circundante desde un punto en lo alto (Hayati, *et al.*, 1997) [Spinoff Program Office].

Posterior a Rocky 7, se desarrolló la idea de un sistema de robot autónomo comunicado con humanos de forma remota por medio de un control o de órdenes por voz. La idea era tener una especie de Rocky 7 en un ambiente complejo como un hospital y que pudiera ser operado remotamente (Figura 8.9 b). El resultado fue un robot capaz de encargarse de todo, desde reparar medicamentos, tirar la basura, anunciar las citas de los pacientes, etc. En México este tipo de robots se han utilizado para realizar consultas de forma remota en un hospital donde no se cuenta con los especialistas adecuados (Spinoff Program Office).

## Revisión de los ojos humanos usando tecnología de telescopios espaciales

La superficie del telescopio espacial James Webb, que se lanzará en 2018, está formada entre otros objetos por 18 espejos colocados de manera muy precisa para formar una superficie de 6.5 metros de diámetro. Cada segmento del espejo debe estar perfectamente suave, plano y libre de rayones, de tal forma que en conjunto sean capaces de recibir información de lugares a 13 millones de años luz de distancia. Para lograr este tipo de superficies, se debieron desarrollar instrumentos de medición complejos para analizarlas ópticamente, incluyendo diferentes métodos de análisis y algoritmos. Todos estos desarrollos y programas han servido para revisar los ojos humanos (Figura 8.10).

## Muñecos simuladores

Uno de los aspectos más importantes en la preparación de los astronautas es la formación médica.



**Figura 8.11.** Maniquí empleado por la NASA para practicar técnicas de primeros auxilios. Ha servido para entrenamiento de militares, bomberos y otros grupos.



---

**Figura 8.12.**

Se muestra un módulo que crea un ambiente de estabilidad y seguridad para pacientes que reciben terapia física. (Cortesía de NASA.)

Todos los miembros de una tripulación deben tener competencias y habilidades básicas en casos de emergencia, como la reanimación cardiopulmonar, ventilación e intubación. Tras el lanzamiento de la Estación Espacial Internacional, se dio paso a una serie de misiones espaciales prolongadas en órbita terrestre baja, dando lugar a la necesidad de entrenar a los miembros de la tripulación en un ambiente de microgravedad real. Un ejemplo importante es la realización de la reanimación cardiopulmonar o RCP, en la que el propio peso del cuerpo impulsa las compresiones, pero esa fuerza se anula en condiciones de microgravedad. Para compensar lo anterior, los astronautas deben plantar sus pies sobre el techo de la nave espacial para obtener apoyo y realizar las compresiones mientras se encuentra suspendido cabeza abajo. Para dominar esta técnica tan atípica en tierra, se debe realizar a través de la práctica simulada mediante maniqués (Figura 8.11).

Los beneficios que ha traído este desarrollo han sido muchos, pues han servido para el entrenamiento médico de tropas en ejércitos, departamentos de bomberos, grupos de primeros auxilios, de voluntarios para casos de desastres, y otros.

## Investigaciones para creación de nuevos medicamentos y mejores tratamientos

### Mejores terapias físicas para rehabilitación

A partir de instrumentos utilizados para el entrenamiento de astronautas, se han desarrollado nuevos dispositivos que permiten realizar nuevas terapias para pacientes que pudieran recuperar la capacidad de caminar después de haber sufrido lesiones traumáticas o alguna enfermedad degenerativa (Figura 8.12).

## Combate al cáncer de mama

En Estados Unidos una de cada ocho mujeres son afectadas por el cáncer de mama en algún momento de su vida, o cualquier tipo de cáncer; realizar una detección temprana es muy importante para la supervivencia. Se está utilizando tecnología de imágenes desarrollada para misiones espaciales para facilitar la detección temprana así como para realizar la medición de manera más comfortable. Lo más interesante es que dichos instrumentos han sido pensados originalmente para exploración planetaria, empleando sensores infrarrojos para detectar cambios de temperatura en el tejido que está alrededor del cáncer. Utilizado en conjunto con mamógrafos tradicionales, la mamografía infrarroja puede incrementar la tasa de detección del cáncer de mama en un 98 %.

Cuando los especialistas localizan una anomalía en la mamografía, realizan una biopsia de mama para buscar el posible cáncer. Hasta hace poco, las mujeres tenían que someterse a cirugías dolorosas de biopsia abierta. En la actualidad, los especialistas pueden realizar biopsias de mama con agujas en lugar de bisturís, esto gracias al desarrollo de un chip de silicio utilizado en el Telescopio Espacial Hubble que convierte la luz en imágenes electrónicas que muestra al especialista dónde insertar las agujas. El procedimiento ahorra tiempo, dinero y el dolor posterior de la intervención quirúrgica.

## Combate a la ceguera por degeneración macular

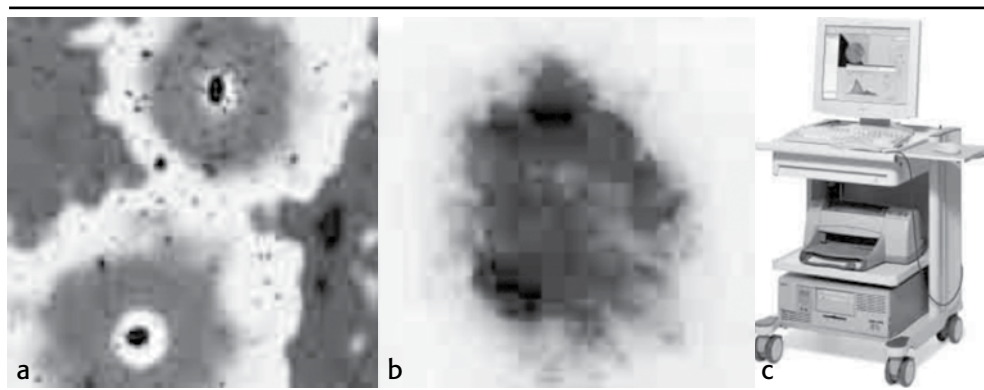
Una tecnología diseñada para mirar las estrellas ha derivado en permitir ver lo cotidiano a personas con graves problemas por degeneración de la mácula. Se trata de unas lentes intraoculares basadas en la tecnología de los telescopios espaciales capaces de reducir hasta en 40 % la ceguera por esta causa. Un problema que padecen más de 25 millones de enfermos en todo el mundo y que es el primer motivo de pérdida de la visión en mayores de 55 años en países occidentales. El diseño permite la implantación en los pacientes afectados en sólo 10 minutos y sin necesidad de suturas.

## Tratamientos para osteoporosis

Los astronautas son propensos a perder masa ósea durante viajes largos en el espacio, ya que el cuerpo siente que el esqueleto no requiere de apoyarse en un punto fijo en el vuelo, como en la Tierra. Dada la reducida gravedad en la nave o en una estación espacial, no se necesita tanta masa ósea para que el cuerpo pueda sostenerse como en la Tierra. Cuando ingerimos alimentos que contienen calcio, un nutriente esencial para lograr huesos sanos, el calcio se absorbe por la vitamina D en la corriente sanguínea, desde donde se lleva a los huesos. Pero si tenemos en cuenta que el cuerpo intenta reducir activamente la cantidad de masa ósea, el nivel de absorción de calcio en el espacio es menor que en la Tierra, por lo que se produce la pérdida progresiva del hueso.

La detección temprana de la osteoporosis en las misiones espaciales investiga la pérdida de hueso que ocurre en los miembros de la tripulación, lo cual es similar a la osteoporosis en la Tierra. Esto ayuda a probar la eficacia de los métodos (ejercicio, dieta, etc.) que actualmente se utilizan para contrarrestar esas condiciones y ayudará en el desarrollo de nuevos métodos en el futuro. También puede retroalimentar a los esquemas de prevención y rehabilitación para los pacientes de la Tierra con condiciones similares óseas como la osteoporosis. Este proyecto evalúa la eficacia de una técnica llamada tomografía computada tridimensional periférica no invasiva para explorar y analizar la estructura ósea. Los resultados ayudarán a probar la eficacia de las recomendaciones actuales para contrarrestar la pérdida ósea y podría conducir al desarrollo de nuevas contramedidas. Este método de exploración ósea también





**Figura 8.13.**

**a**, Imagen de rayos X obtenida por ROSAT del grupo de galaxias A3528. **b**, Imagen de piel superficial utilizando el mismo método que en (a). **c**, Instrumento para obtener e interpretar imágenes de piel.

podría contribuir a una técnica de referencia para la detección precoz de la osteoporosis en la Tierra, y un mejor diagnóstico temprano podría resultar importante en el desarrollo de un tratamiento más eficaz de la osteoporosis. El escáner utilizado ya se ha comercializado con éxito.

## Tratamiento para cáncer de piel

El cáncer de piel es un problema que crece cada día más debido entre otras cosas a la exposición al Sol. Ahora los médicos pueden detectar signos tempranos gracias a un método computacional usado para analizar rayos X desde el espacio (Figura 8.13).

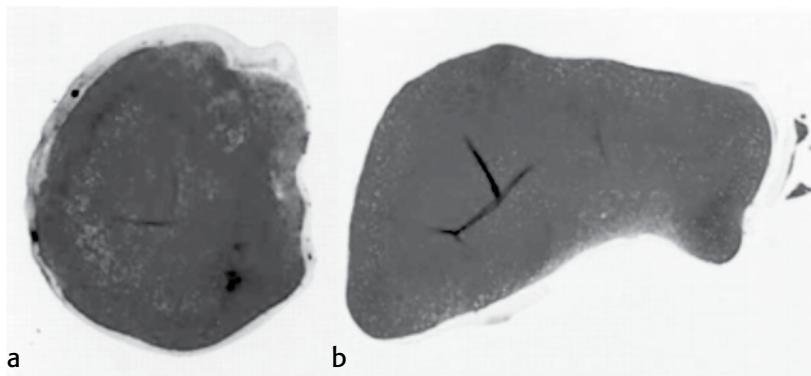
Uno de los retos de los astrónomos que estudian las estrellas y galaxias es extraer la información útil de todas las señales que se reciben a través de diferentes detectores. Un ejemplo es la información de rayos X que provee el satélite ROSAT de objetos como estrellas que explotan (supernovas) y agujeros negros. Para esto se desarrolló un algoritmo que extrae las débiles señales que vienen junto con el ruido aleatorio de fondo. Este algoritmo ayudó a los astrónomos a obtener señales de miles de fuentes de rayos X y pudieron analizar sus estructuras en forma cuantitativa.

Los investigadores rápidamente se percataron de que esta técnica podría tener aplicación para otras situaciones donde datos muy importantes vienen escondidos en un ruido de fondo. Específicamente, una de estas aplicaciones es la detección de problemas en la piel para la detección temprana del cáncer de piel. El sistema se llama MELDOQ (*Melanoma Recognition, Documentation and Quality Assurance System*) que incorpora el mismo método para analizar de manera muy precisa imágenes de una sección de piel superficial. Puede observar diferencias muy finas en color que pueden llevar a la detección y medición de crecimiento irregular de las células asociadas con un melanoma maligno (Bunk, Pompl, Morfill, Stolz, Abmayr, 1999).

## Biorreactores

La Estación Espacial Internacional está cayendo. Esto no preocupa a los astronautas a bordo, sino que, la caída es parte de que la EEI se mantenga en su órbita. La ausencia de gravedad





**Figura 8.14.**

Las células crecidas en microgravedad **(a)** tienden a ser más esféricas que aquellas crecidas en tierra **(b)**. Esto demuestra que los tejidos pueden crecer con una estructura diferente en microgravedad.

más allá de la atmósfera terrestre en realidad es una ilusión; a la altura de la órbita de la EEI de aproximadamente 400 km sobre la superficie, la fuerza gravitacional del planeta corresponde a 12% que en tierra. Pero también está el hecho de que la EEI está viajando a cerca de 30 000 km/h. Lo anterior significa que, aunque la EEI esté cayendo, se está moviendo lo suficientemente rápido para que nunca impacte a la Tierra. El equilibrio entre la fuerza de la gravedad y el movimiento de la EEI crea una órbita estable, y el hecho de que el ISS y todo lo que contiene, incluyendo los astronautas, están cayendo a un ritmo igual, crea la condición de ingravidez llamada microgravedad.

A mediados de los años 80, investigadores de la NASA estaban investigando los efectos de la microgravedad en tejidos humanos (Figura 8.14). En aquel entonces, derivado del desastre del Challenger, los viajes espaciales fueron cancelados, y los investigadores no tenían acceso a la microgravedad. Para proveer de un método para recrear tales condiciones en tierra, desarrollaron un dispositivo rotatorio horizontal llamado biorreactor, el cual permitía el crecimiento de células humanas en microgravedad simulada. Unos años después se comprobó que los resultados obtenidos mediante el biorreactor, son muy parecidos a los llevados a cabo en el espacio (Figura 8.15).

## Audios para mejorar el sueño

Los astronautas a bordo de la Estación Espacial Internacional tienen una agenda muy apretada, tienen anocheceres y atardeceres cada 45 minutos y un ambiente muy ruidoso, por lo que la mayoría sufre de insomnio en los inicios de la misión, esto puede resultar en una condición muy incómoda y peligrosa. Se han realizado estudios para examinar los impactos del sistema vestibular en el sueño con el objetivo de ayudar a los astronautas a ajustar sus periodos de sueño de manera efectiva.

Los estudios se han realizado en hámsters, los cuales tienen un sistema vestibular comparable al nuestro y hábitos de sueño muy estables. Estos estudios dieron como resultado que aplicando una estimulación en el sistema vestibular resultará en un cambio en los ciclos de sueño. Por un lado, una estimulación repentina de gran amplitud nos despierta, mientras que las de baja amplitud y con vibraciones periódicas nos pondrá a dormir (Figura 8.16).



**Figura 8.15.**

El biorreactor provee un más rápido y barato método para experimentos con células.



**Figura 8.16.**

Aplicación para dispositivo móvil desarrollada a partir de la necesidad de regular los ciclos de sueño de los astronautas.

## Sensores de radiación para tratamientos cardíaco y de cáncer

La radiación que existe en el espacio exterior es muy peligrosa pues podría causar daño al equipo electrónico en las naves espaciales. En consecuencia, los vehículos espaciales traen instrumentos para medir y registrar la radiación alrededor de ellos.

Un dispositivo sensor llamado RADFET (*radiation-sensitive field effect transistor*), desarrollado en los años setentas, monitorea la dosis de radiación que se incorpora en una nave espacial. El sensor no sólo puede registrar la cantidad de radiación recibida, sino que la puede convertir en una señal de radio. La dosis de radiación puede entonces ser transmitida a los controladores de la misión. Esta característica (detección remota) ofrece muy potenciales aplicaciones en la Tierra.

Específicamente, el sensor, al ser muy pequeño, puede utilizarse como un dosímetro para monitorear la radioterapia en tratamientos de cáncer y enfermedades cardíacas. En la Universidad de Nuevo México, un oncólogo colocó un sensor en un catéter para terapia de cáncer de mama. En la escuela de medicina de Harvard, se insertaron sensores dentro de tumores en ratones para registrar la dosis recibida. También se han explorado para monitorear arterias bloqueadas.

## Conclusión

Hemos mostrado en este capítulo sólo algunos ejemplos de los beneficios que nos trae la ciencia y tecnología espacial aplicadas a la salud. Se vio que desde los inicios de la carrera espacial, esos esfuerzos han traído beneficios que no se habían vislumbrado originalmente, pero que, utilizando el ingenio de los científicos y tecnólogos, se han hecho otros desarrollos.

El futuro nos depara muchos más importantes desarrollos, se está hablando mucho de las futuras misiones al planeta Marte y a la Luna y, por lo tanto, se habla de investigaciones que tienen que ver con la reproducción humana; por el momento, científicos chinos ya están experimentando en este tema con ratones enviados al espacio. También se habla del sexo en el espacio, para poder colonizar, debemos ser capaces de reproducirnos allá donde viajemos, o por lo menos debemos intentarlo en órbita.

Debemos avanzar también en la protección de los astronautas, se sabe que la radiación en la superficie de Marte es mayor a la que se recibe a bordo de la EEI.

También, nos queda claro que debemos seguir investigando en las enfermedades que más afectan a nuestra salud, como el cáncer, la diabetes, el síndrome metabólico, y otras.

En cuestiones de investigación, debemos impulsar los desarrollos científicos y tecnológicos que se hacen en tierra en los que se simule la ausencia de gravedad. Se ha demostrado que estos experimentos nos traen muy buenos avances en tratamientos y nuevos métodos de terapias y diagnóstico.

El desarrollo en México de la medicina espacial tiene importantes posibilidades de aplicación. Nuestro país cuenta con un excelente sistema de capacitación de profesionales de la salud, de ciencia espacial, como la astronomía, geofísica, geografía, y también tiene una gran fortaleza en el desarrollo de tecnología. Es cuestión de que se gestione la interacción de los diferentes grupos y crear uno o varios cuerpos multidisciplinarios de desarrollo, que nos lleven a la creación de aplicaciones que impacten en la salud de la población.

# Referencias

- Bunk W, Pompl R, Morfill G, Stolz W, Abmayr W. (1999). MELDOQ - astrophysical image and pattern analysis in medicine: early recognition of malignant melanomas of the skin by digital image analysis. *Bildverarbeitung für die Medizin*. 2000:234-8.
- Hayati S, Volpe R, Backets PG, Blaram J, Welch R, Iblev R, et al. (1997). The Rocky 7 rover: a Mars sciencecraft prototype. *IEEE ICRA*.
- Spinoff Program Office. Spinoff 2008. NASA Center for Aerospace Information.
- Spinoff Program Office. Spinoff 2009. NASA Center for Aerospace Information.
- Spinoff Program Office. Spinoff 2010. NASA Center for Aerospace Information.
- Spinoff Program Office. Spinoff 2011. NASA Center for Aerospace Information.
- Spinoff Program Office. Spinoff 2012. NASA Center for Aerospace Information.
- Spinoff Program Office. Spinoff 2014. NASA Center for Aerospace Information.
- Spinoff Program Office. Spinoff 2015. NASA Center for Aerospace Information.
- Down to Earth, Everyday Uses for European Space Technology 2001.
- Eric Berger. Apr 21, 2016. China claims a major breakthrough in making space babies. *Scientific Method/Science & Exploration*. <http://arstechnica.com/science/2016/04/china-claims-a-major-breakthrough-in-making-space-babies/>
- ESA. Technology transfer programme (2016). [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/TTP2](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/TTP2)
- NASA. Technology Transfer Program. NASA Spin Off (2016). <http://spinoff.nasa.gov/>
- DLR. Technology Marketing (2016). <http://www.dlr.de/tm/en/desktopdefault.aspx/tabid-8709>
- ESA. Space for Health (2016). [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Space\\_for\\_health](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Space_for_health)



# 9. Dispositivo para la estabilización de la postura en microgravedad

Rosario Vega, Enrique Soto, Adriana Pliego, Vladimir Alexandrov,  
Tamara Alexandrova

## ■ Resumen

Nuestro grupo de investigación (colaboración entre el Instituto de Fisiología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, la FCFM, Escuela de Biología y Universidad Estatal de Moscú) ha desarrollado una propuesta de auxiliar vestibular (prótesis) que se basa en el uso de la Estimulación Eléctrica Vestibular (EGV). En dicha propuesta se pretende utilizar un sistema de microgiróscopos y microacelerómetros para detectar los desplazamientos de la cabeza, procesar la salida de dichos sensores a través de un modelo matemático de la función vestibular<sup>1-4</sup> y finalmente inyectar una corriente eléctrica en las regiones periauriculares, la cual deberá contribuir a corregir la posición del sujeto o a devolver la sensación de posición y mejorar la estabilidad de la mirada en condiciones de microgravedad. Para ello hemos caracterizado las respuestas del vestíbulo y los procesos de codificación sensorial en modelos animales experimentales, y hemos realizado pruebas comparativas entre las respuestas de sistemas naturales y artificiales en diferentes condiciones experimentales. Se ha desarrollado un modelo matemático y algoritmos neuromiméticos a fin de construir un sistema de procesamiento de alto nivel para la salida del sistema prostético, para finalmente construir un sistema que funciona como auxiliar vestibular para la estabilización de la mirada y la postura.

## Introducción

La postura bípeda es inherentemente inestable y sujeta a perturbaciones producidas por el ciclo cardíaco y la respiración.<sup>5</sup> Mantenerse de pie puede modelarse como un péndulo invertido, ya que se tiene una base estrecha para sostenerse y el centro de gravedad en una posición más alta. El péndulo puede balancearse activamente para impedir que se caiga. El control de la postura en los mamíferos bípedos involucra integración compleja de información propioceptiva, vestibular y visual.<sup>6</sup>

El sistema vestibular tiene un papel fundamental en la orientación espacial. Los órganos sensoriales vestibulares periféricos actúan como sensores de las aceleraciones lineales y angulares de la cabeza. Los centros de control cerebrales usan esta entrada para definir la posición cefálica en relación al entorno vinculándola con entradas de otros sistemas sensoriales y para

producir respuestas motoras que ayuden a mantener el equilibrio y la posición de la mirada.<sup>5,7,8</sup> Adicionalmente, la entrada vestibular contribuye a la navegación del sujeto en su entorno, la generación de un mapa de referencia inercial y a procesos cognitivos relacionados con la imagen y esquema corporal.<sup>9-12</sup>

El sistema nervioso central utiliza reflejos originados en el vestíbulo que han sido extensamente estudiados por sus implicaciones clínicas. Estos son los reflejos vestíbulo-ocular (RVO: estabiliza el campo visual haciendo que el ojo se mueva coordinadamente con la cabeza), reflejos vestíbulo-cólicos (RVC: estabilizan la posición de la cabeza) y reflejos vestíbulo-espinales (RVE: interviene en la consecución del equilibrio estático y dinámico, manteniendo la posición erguida).

Los reflejos vestibulares son arcos reflejos de tres neuronas. Sus elementos básicos son la célula ciliada, una neurona bipolar aferente con su soma en el ganglio de Scarpa (vestibular primaria), una interneurona con soma en los núcleos vestibulares (vestibular secundaria) y una motoneurona. Además, el aparato vestibular inicia reflejos que modulan el movimiento, previenen oscilaciones y definen una vertical para realinear el cuerpo. Los reflejos laberínticos actúan en consonancia, y en dirección opuesta, a los reflejos del cuello, así ambos efectos se cancelan y la cabeza queda fija sobre el tronco.<sup>6</sup> Cabe destacar que en los procesos de estabilización de la posición y en la navegación participan diversas regiones del cerebro entre las que destacan el cerebelo, regiones hipocámpales y la corteza entorrinal.

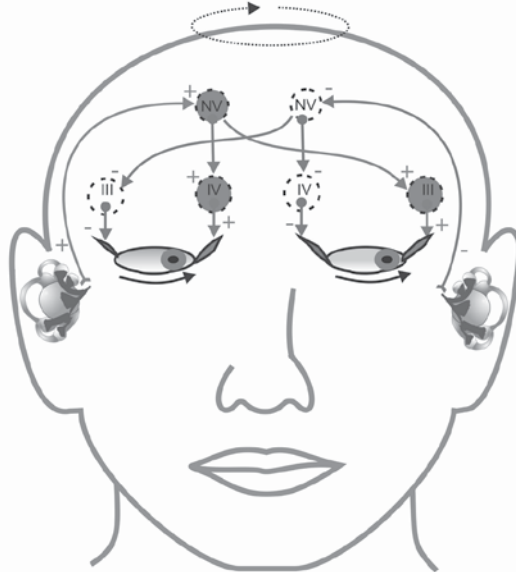
## El sistema vestibular

Es la parte más antigua del oído interno. La información vestibular se integra con información propioceptiva y visual de tal forma que la combinación de todas produce la sensación de movimiento. El vestíbulo se compone de un sistema de túbulos especializados que contienen líquido (canales semicirculares) y que detectan aceleraciones angulares, y de gravirreceptores denominados otolitos (utrículo y sáculo), los cuales indican la orientación de la cabeza con respecto a la vertical, es decir, responden a fuerzas gravitoinerciales.<sup>13</sup>

En el hombre, el sistema vestibular cumple con varias funciones: 1) es el órgano del equilibrio, responsable de aportar la sensación subjetiva de movimiento y orientación en el espacio; 2) ajusta la actividad muscular y la posición del cuerpo para prevenir; 3) provee señales de control para los movimientos oculares a fin de estabilizar los ojos en el espacio durante movimientos de la cabeza; 4) produce reflejos ortostáticos relacionados con el control de la presión sanguínea durante los cambios de posición del cuerpo, y 5) contribuye a generar un marco de referencia que permite al sujeto definir su posición en el espacio y las características de sus desplazamientos.

Los canales semicirculares responden principalmente a la aceleración angular. La actividad de las neuronas aferentes sensoriales que los inervan indica un cambio en la velocidad angular de la cabeza. En cambio, los órganos otolíticos responden a la gravedad y a la aceleración lineal. Las entradas vestibulares se combinan con la visual, exteroceptivas, interoceptivas y, ocasionalmente, con las auditivas formando un subsistema, del cual se derivan la orientación espacial y el mantenimiento del equilibrio. La pérdida total de la función vestibular provoca inestabilidad en la mirada y pérdida de balance en la postura (Figura 9.1).<sup>14</sup>

La noción de que los canales semicirculares responden únicamente a movimientos angulares y los otolitos a movimientos lineales es, claramente, una simplificación del sistema. Se ha demostrado que existe una influencia de la gravedad en los canales semicirculares directamente, registrando la descarga de los nervios en respuesta a la inclinación angular en el pez cazón. Estu-



**Figura 9.1.**

Esquema de la entrada del sistema vestibular a los núcleos vestibulares (NV) y a los núcleos oculomotores (III y IV). El vestíbulo es un sistema de jala y empuja. Esto significa que cuando las aferentes de un lado se excitan las del lado contrario se inhiben. Los NV de un lado proyectan de forma ipsilateral al núcleo del IV par craneal y contralateral al núcleo del III par craneal. Ello determina que la excitación de las aferentes activa el músculo recto interno ipsilateral y el recto externo contralateral, produciendo el movimiento coordinado de ambos ojos, uno en dirección nasal y el otro en dirección temporal.

dios con movimientos rotacionales con traslaciones en monos Rhesus demostraron que los canales también aportan información útil para discriminar entre diferentes fuentes de aceleración lineal. De hecho, se requiere de la integración tanto de información de los otolitos como de los canales para distinguir entre diferentes tipos de movimientos y determinar la posición de la cabeza.<sup>15</sup>

Aunque las acciones de los órganos vestibulares pueden separarse conceptual y experimentalmente, los movimientos del ser humano por lo general inducen un patrón complejo de excitación e inhibición en diversos órganos receptores en todo el cuerpo. Si un componente del sistema vestibular es excesivamente activo o anormalmente silente, el cerebro recibe información inadecuada sobre la aceleración y, en consecuencia, los reflejos provocados por aferencias vestibulares se ven afectados.<sup>15</sup>

En el humano, los tres canales semicirculares están dispuestos casi ortogonales entre ellos. El arreglo ortogonal y en paralelo de los pares de canales permite que actúen sinérgicamente y que generen una señal aferente indicando la rotación de la cabeza en cualquier dirección, esto



provoca la respuesta compensatoria de movimiento de los ojos y le aporta mayor linealidad al sistema. Los canales poseen una región alargada llamada ámpula. En ella se realiza el proceso de acoplamiento mecánico que convierte la torca mecánica en señales de las neuronas aferentes. El ámpula está sellada por la cúpula, donde se encuentran inmersos cilios que proyectan desde la crista subyacente y que permite acoplar el movimiento de la endolinfa con el haz de cilios y producir el proceso de transducción mecanoeléctrica.<sup>16-18</sup>

En el utrículo y sáculo, las áreas donde se encuentran agrupadas las células sensoriales son las máculas. Cada mácula brinda soporte a la masa gelatinosa que contiene otoconias, las cuales son prismas hexagonales de carbonato de calcio. La masa es más densa que el líquido circundante. Esto lo hace capaz de desplazarse en respuesta a una fuerza gravitoinercial provocada por aceleración lineal.<sup>13</sup>

La generación de la entrada vestibular ocurre con la inclinación del haz de cilios de las células ciliadas que son las células sensoriales. Estas células hacen sinapsis con fibras nerviosas localizadas en su base (aferentes primarias). Los desplazamientos de los cilios cambian la polaridad eléctrica de la membrana de las células ciliadas, activando diversos canales iónicos sensibles a voltaje, que finalmente determinan la forma del potencial de receptor en la célula ciliada y la activación de una corriente de calcio entrante<sup>19,20</sup> que da origen a la liberación de neurotransmisor de las células ciliadas y a la activación de las neuronas aferentes vestibulares.<sup>21</sup>

## Estimulación galvánica vestibular

Aunque esta herramienta comenzó a utilizarse hace cerca de 100 años, hasta hace apenas alrededor de 15 años adquirió relevancia en el área de investigación vestibular, ya que permite obtener una respuesta de este sistema sin excitar otras entradas sensoriales y sin interferir necesariamente con la función del cuerpo entero;<sup>22</sup> es decir, aísla la entrada sensorial, lo cual es imposible si se estimula de manera natural.<sup>23</sup>

El método consiste en aplicar una corriente constante de alrededor de 1 mA, a través de dos electrodos de Ag-AgCl, colocados sobre ambas apófisis mastoides.<sup>24</sup> El estímulo provoca la inclinación del sujeto hacia el electrodo de mayor potencial, y después de un segundo del inicio del estímulo induce una sensación de aceleración.<sup>25</sup>

Cuando se aplica una corriente alterna a baja frecuencia, el estímulo tiene influencia en la estabilización de la mirada y el grado de desplazamiento del ojo depende del valor de la corriente aplicada. En cambio, cuando se aplica corriente directa, lo que se obtiene es una sensación de desplazamiento con inclinación del cuerpo.<sup>25</sup>

La estimulación galvánica modula la descarga tónica de las aferentes, actuando directamente en aquellas que se encuentran cercanas al sitio de disparo postsináptico. La corriente catódica aumenta la frecuencia de descarga, mientras que la anódica la disminuye.<sup>24,26</sup> Otra posibilidad es que la estimulación galvánica vestibular (EGV) modula el potencial del epitelio de la cresta ampular y la mácula. Esto implica que la estimulación interfiere en el mecanismo de transducción de las células ciliadas. La EGV catódica o anódica afecta la descarga de las aferentes de los canales semicirculares de la misma manera que lo haría una aceleración angular ipsilateral y contralateral. La respuesta es análoga en monos y en humanos.<sup>27</sup>

La EGV altera el patrón de descarga de las aferentes de una forma que no tiene equivalente natural ya que aumenta la frecuencia de descarga de las aferentes ipsilaterales al ánodo, sin importar la dirección a la cual son sensibles. También aumenta la frecuencia de descarga de los canales ipsilaterales anterior y posterior, como sucede en un giro de la cabeza.<sup>28</sup> Respuestas

opuestas no tienen equivalente natural y deben cancelarse al ser de igual magnitud y dirección contraria. Como resultado, la EGV provoca patrones de descarga que corresponden a viraje y giro simultáneamente, con referencia al plano del aparato vestibular.

En un estudio con EGV y electromiografía en los músculos sóleo y tríceps braquial se observaron dos respuestas: una de latencia corta (60 a 70 ms) y otra de latencia media (120 ms).<sup>24</sup> Los autores proponen los tractos vestibuloespinales y reticuloespinales, respectivamente, como posibles candidatos para producir estas respuestas, ya que las señales de los canales (respuesta corta) y las señales otolíticas (respuesta mediana) tienen implicaciones diferentes en el movimiento del cuerpo y poseen distintas funciones, lo que muy probablemente se relaciona con que son procesadas y transmitidas por distintas vías. Los cambios en la musculatura del cuello, cabeza y tronco sugieren el paso de la actividad en respuesta al estímulo galvánico a través del tracto medial vestibuloespinal, el cual proyecta predominantemente a los segmentos lumbosacros. Esto concuerda con trabajos en los que aplicaron el estímulo galvánico durante la marcha y encontraron que la respuesta a la estimulación galvánica comienza en los miembros superiores y finaliza en los inferiores.<sup>29</sup>

La respuesta a la EGV sucede de la siguiente manera: la cabeza gira el tronco y el tronco inclina la pelvis con respecto a la horizontal. Cuando el estímulo finaliza, la respuesta en el electromiograma (EMG) presenta la misma magnitud pero la dirección opuesta. Los músculos se reacomodan y adoptan la postura erguida natural. Mientras mayor sea la corriente de estimulación, mayor será la inclinación virtual. La polaridad del estímulo determinará la dirección de la respuesta.<sup>28</sup> La EGV es diferente a una perturbación sorpresiva del equilibrio, como en un empujón, ya que la respuesta es idéntica cuando el estímulo no se espera como cuando se aplica por el mismo sujeto. Esta estimulación es capaz de perturbar un complejo proceso motor que involucra el cambio de posición de todos los segmentos corporales, desde la cabeza hasta los pies.<sup>22</sup>

Cabe destacar que si bien se ha estudiado la EGV en diversos trabajos, no existen estudios multifactoriales y adecuadamente parametrizados que permitan determinar su potencialidad para activar de manera selectiva uno u otro canal semicircular o las aferentes provenientes de sáculo y utrículo.

## Modalidades de estimulación galvánica vestibular

El grupo de Fitzpatrick y Day<sup>28</sup> describen tres modalidades para la estimulación galvánica de acuerdo con su modelo:

- 1) EGV bipolar. La señal de los canales semicirculares durante este tipo de estimulación, indica un giro de gran magnitud, y viraje de menor magnitud, hacia el lado del cátodo. Por lo tanto, se producirá una inclinación hacia el ánodo
- 2) EGV unilateral. Provoca una inclinación que tiene una trayectoria oblicua al eje interaural. La respuesta observada es hacia el ánodo o lejos del cátodo. El componente sagital del desplazamiento es hacia el frente cuando se aplica corriente catódica, y hacia atrás cuando la corriente es anódica
- 3) EGV bilateral unipolar. Los sujetos se inclinan hacia el frente con EGV catódica a ambos lados, y hacia atrás con EGV anódica en ambos lados

Contrario a esto, se ha observado que no hay diferencia entre estimulación monoaural y bilateral.<sup>29</sup> Cabe destacar que hasta donde conocemos no se han publicado estudios sistemáticos

del efecto de la posición de los electrodos y las posibles combinatorias entre polaridades y modalidades (bipolar vs. unipolar) de la EGV en condiciones experimentales uniformes.

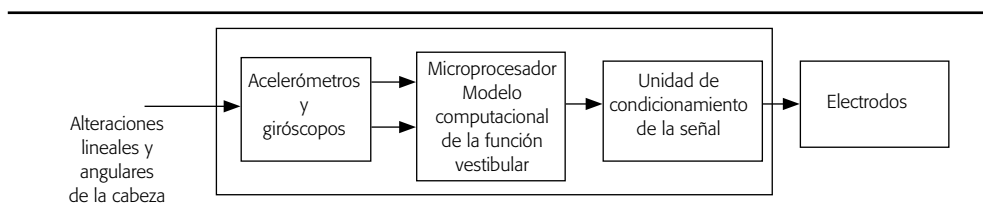
## Auxiliar vestibular (prótesis vestibular)

Nuestro grupo de investigación ha desarrollado una propuesta de auxiliar vestibular (prótesis) que se basa en el uso de las EGV. En dicha propuesta se pretende utilizar un sistema de microgiróscopos y microacelerómetros para detectar los desplazamientos de la cabeza, procesar la salida de dichos sensores a través de un modelo matemático de la función vestibular<sup>1-4</sup> y, finalmente, inyectar una corriente eléctrica en las regiones periauriculares, la cual está determinada en sus características por la salida del modelo matemático que deberá contribuir a corregir la posición del sujeto o a devolver la sensación de posición y a estabilizar la mirada (Figura 9.2).<sup>30</sup>

Inicialmente modelamos los procesos que van desde el acoplamiento de un estímulo mecánico, hasta la generación de potenciales de acción en las neuronas aferentes. En este modelo la entrada es la aceleración ya sea lineal o angular y la subsecuente deflexión del haz de cilios en las células sensoriales, el desplazamiento de los cilios genera una corriente de transducción debida a la apertura de canales iónicos mecanosensibles en el ápice de los cilios. Esta corriente de transducción determina en las células sensoriales (ciliadas) un cambio en el potencial de membrana, activación de canales de calcio y liberación subsecuente del neurotransmisor.<sup>16</sup> Este neurotransmisor va a interactuar con receptores postsinápticos ubicados en las neuronas aferentes que inervan el vestíbulo despolarizando el potencial de membrana de dichas neuronas e induciendo la generación de potenciales de acción.

## Modelo matemático de la función vestibular y su implementación técnica

El modelo matemático de la función vestibular describe la dinámica de la actividad eléctrica (proceso informativo) desde que el órgano vestibular detecta un estímulo mecánico hasta la activación de los nervios vestibulares aferentes que llevan la información respecto a dichos estímulos mecánicos al cerebro.



**Figura 9.2.**

Esquema simplificado de un sistema de prótesis vestibular. Los movimientos de la cabeza del sujeto son medidos por el sistema de microgiróscopos y microacelerómetros, y la salida de estos sensores es procesada por el modelo computacional cuya salida es condicionada y determina el patrón de corriente a aplicar en los electrodos.

A diferencia de otros desarrollos, el modelo de este trabajo es un modelo neuromimético. Es decir, su diseño está basado en los procesos fisiológicos que ocurren naturalmente en el sistema vestibular. De hecho, el modelo se basa en resultados de investigación básica sobre la neurobiología del sistema vestibular.<sup>16,17,1,31</sup>

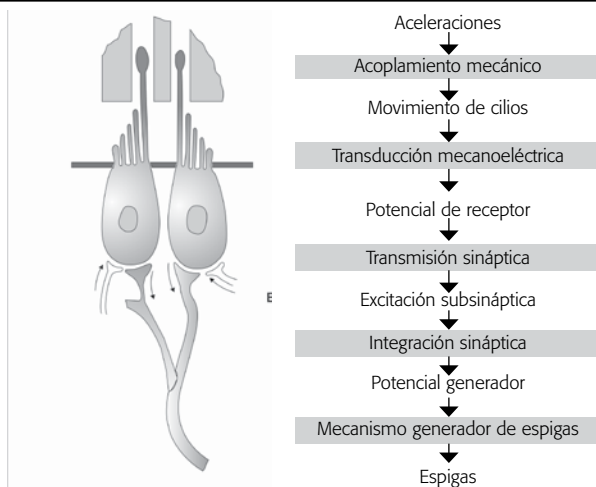
El modelo está formado por cinco etapas, cuya actividad está determinada por la interacción funcional entre ellas tal como se muestra en el Cuadro 9.1.

## Descripción de las etapas del modelo y sus ecuaciones

*Etapas 1.* Se refiere a la dinámica del acoplamiento mecánico del sistema cúpula-endolinfático y al modelo de la masa otolítica que simulan la función vestibular en los canales semicirculares y órganos otolíticos, respectivamente. Las células sensoriales de los canales semicirculares y de los órganos otolíticos son similares (Figura 9.3). Por ello, las etapas 2 a 5 del modelo matemático son similares para los órganos otolíticos y los canales semicirculares. Sin embargo, estos dos órganos difieren en términos del proceso de acoplamiento mecánico, por lo cual se han modelado matemáticamente por separado. Esto se refleja además en el hecho de que los equivalentes técnicos de los órganos otolíticos son los acelerómetros y de los canales semicirculares son los giróscopos.

En nuestro trabajo, un conjunto de giróscopos (por lo menos tres: uno en cada plano del espacio: X, Y, Z) realizan la función de los canales semicirculares, y un conjunto de acelerómetros (por lo menos tres: uno en cada plano del espacio: X, Y, Z) realizan la función de los órganos otolíticos (utrículo y sáculo).

*Etapas 2.* Se refiere al mecanismo de transducción mecanoeléctrica en la célula ciliada que realiza la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica y genera la corriente de trans-



**Figura 9.3.**

Esquema de los procesos desde el acoplamiento de un estímulo mecánico, hasta la generación de potenciales de acción en las neuronas aferentes. El modelo incluye el proceso de acoplamiento mecánico (ya sea en los canales semicirculares o los órganos otolíticos) peculiar. Transducción mecanoeléctrica potencial de receptor en la célula ciliada, transmisión sináptica y generación de potenciales de acción en la neurona aferente.<sup>16</sup>

ducción en las células ciliadas, se basa en resultados publicados por Markin y Hudspeth.<sup>32</sup> Este modelo describe la dependencia de la corriente de transducción respecto al desplazamiento del haz de cilios.

*Etapa 3.* Se refiere a la dinámica del potencial de membrana en la célula ciliada. Si bien el proceso de mecanotransducción no parece ser diferente entre las células ciliadas de diferentes órganos otolíticos y canales semicirculares. La respuesta a los estímulos mecánicos se especializa en cada órgano. Esta especialización puede ser debido a variaciones en las propiedades electrofisiológicas de las células ciliadas, las que pueden extraer información relevante del estímulo, filtrando ciertas fases o propiedades del estímulo o amplificando otros aspectos. Un ejemplo de esta función de las células ciliadas es su resonancia eléctrica.<sup>33</sup> Por ello es relevante modelar las diferentes corrientes iónicas que originan el potencial de receptor.<sup>21</sup> El modelo del potencial de membrana de la célula ciliada está basado en las ecuaciones de Hodgkin-Huxley,<sup>34</sup> con una modificación propuesta de conformidad con las características de las células ciliadas.<sup>17,35</sup>

*Etapa 4.* Se refiere a la transmisión sináptica. Las células ciliadas liberan un transmisor sináptico, del tipo glutamato, cuyo flujo es determinado por la despolarización presináptica y que requiere de la presencia de  $Ca^{2+}$  en el medio extracelular. Experimentalmente se encontró que la respuesta sináptica en la neurona aferente (corriente postsináptica,  $I_{Syn}$ ) depende del potencial de membrana de la célula ciliada.<sup>36</sup>

*Etapa 5.* Se refiere a la dinámica del potencial de membrana de la neurona aferente primaria. Para modelar la generación de potenciales de acción de la neurona primaria aferente bipolar, se utilizan nuevamente las ecuaciones de Hodgkin-Huxley,<sup>34</sup> aplicando las simplificaciones que son parte de nuestra propuesta,<sup>35</sup> obtuvimos una solución que permite resolver estas ecuaciones de forma simplificada.

## Resultados obtenidos con el modelo matemático de la función vestibular

Para el desarrollo del modelo de respuesta de la célula ciliada y la neurona aferente, se han desarrollado un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen detalladamente en términos matemáticos y físicos el comportamiento del sistema (ver Cuadro 9.1 y Figura 9.3). Posteriormente, se han desarrollado una serie de simplificaciones de forma tal que se obtienen soluciones reales y no teóricas del sistema a la entrada natural del vestíbulo, representadas por las aceleraciones lineales y angulares a que se somete la cabeza. El modelo será útil desde el punto de vista técnico cuando pueda ser rápidamente solucionado en línea *–on line–* por un microprocesador.

Esta solución en tiempo real de un modelo neuromimético altamente sofisticado es una contribución de los aspectos de este trabajo, porque permite procesar los estímulos que en forma de aceleraciones angulares y lineales son detectados por los acelerómetros y giróscopos y generar una salida en forma de patrones de impulsos eléctricos.<sup>30</sup>

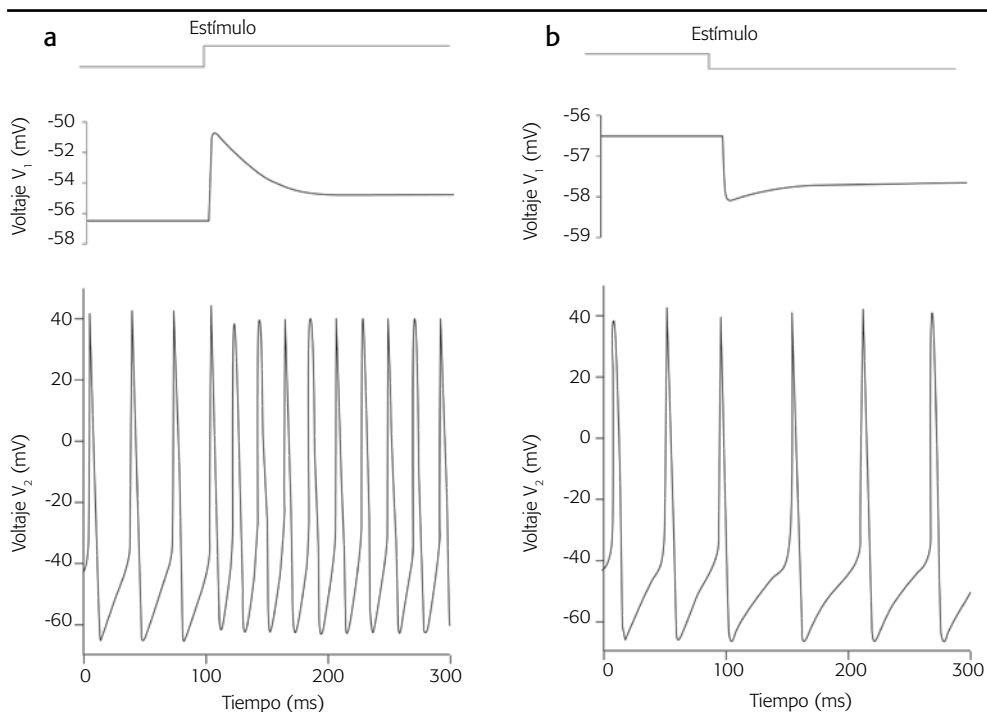
El modelo de la función vestibular nos ha permitido demostrar que el conjunto de ecuaciones desarrollado y sus simplificaciones pueden utilizarse para analizar una entrada en forma de aceleraciones lineales o angulares y obtener una respuesta similar a la que se produce en el sistema vestibular natural. Las gráficas que se muestran en la Figura 9.4 presentan una aplicación del modelo a una entrada en forma de un estímulo mecánico y la salida resultante.<sup>35,37</sup> Este modelo es capaz de describir y reproducir la actividad eléctrica en el sistema vestibular periférico durante el proceso de estabilización de la postura vertical en situaciones extremas (que pueden provocar una caída) en el plano sagital.

### Cuadro 9.1.

Esquema general del modelo matemático de la función vestibular

$\frac{d^2x}{dx^2} + \frac{1}{\tau_1} \frac{dx}{dt} + \frac{1}{\tau_1 \tau_2} x = \frac{R_1}{k_1^2} \left(1 + \frac{l_1}{L_1}\right) \frac{d\omega}{dt}$ $M_+ \frac{d^2X}{dX^2} + K_e \frac{dX}{dt} + K_c X = M_-(G - W)_x$	<p>Acoplamiento mecánico en un canal semicircular vertical</p> <p>Acoplamiento mecánico en el sáculo</p>
$I_{Tr} = g_{Tr}(x, s)(V_1 - E_{Tr});$ $g_{Tr} = g_{Tr}p(x, s); p(x, s) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x+s-x_0}{s_1}}}$	<p>Transducción mecanoeléctrica</p>
$C_{m1} \frac{dV_1}{dt} = -I_{Tr} - I_T - I_{L1}$ $I_T = g_T m^3 (h_1 + h_2)(V_1 - E_T)$ $I_L = g_L V_1$ $\tau_m(V_1) \frac{dm}{dt} = (m_{ST}(V_1) - m) Q_{10}$ $\tau_{h1}(V_1) \frac{dh_1}{dt} = (q_1 h_{ST}(V_1) - h_1) Q_{10}$ $\tau_{h2}(V_1) \frac{dh_2}{dt} = (q_2 h_{ST}(V_1) - h_2) Q_{10}$	<p>Dinámica del potencial de membrana de la célula ciliada</p>
$I_{Syn} = \phi(V_1)$	<p>Transmisión sináptica</p>
$C_{m2} \frac{dV_2}{dt} = I_{Syn} - I_{Na} - I_K - I_{L2}$ $I_{Na} = g_{Na}^{max} (m_{\infty}(V_2))^3 (C(V_2) - n)(V_2 - V_{Na})$ $I_K = g_K^{max} n^4 h_K (V_2 - V_K)$ $I_{L2} = g_{L2}^{max} (V_2 - V_L)$ $\tau_n(V_2) \frac{dn}{dt} = (n_{\infty}(V_2) - n) Q_{10}$ $\tau_h(V_2) \frac{dh}{dt} = (h_{\infty}(V_2) - h) Q_{10}$	<p>Dinámica del potencial de membrana de la célula nerviosa primaria aferente</p>

La etapa 1 se refiere a la dinámica del acoplamiento mecánico. En el cuadro se modela la masa otolítica, para el caso de un canal semicircular el acoplamiento cúpula-endolinfático se describe en detalle en Vega, *et al.* (Ver descripción de las cinco etapas en el texto, las cuales tienen su equivalente anatómico funcional preciso en el sistema vestibular de vertebrados según se ilustra en la Figura 9.3.)



### Figura 9.4.

Respuesta del modelo. En **a**, el estímulo mecánico inicia a los 100 ms y dura 200 ms produciendo una despolarización de la célula ciliada de 6 mV ( $V_1$ ). Esto causa un aumento en la frecuencia de descarga de potenciales de acción ( $V_2$ ). En **b**, un estímulo en la dirección contraria produce una hiperpolarización de -3 mV de la célula ciliada ( $V_1$ ) y en consecuencia una disminución en la descarga de potenciales de acción en la neurona aferente vestibular ( $V_2$ ).<sup>35</sup>

La información de salida del modelo es un conjunto de impulsos eléctricos ( $V_2$ ) con diferentes frecuencias, amplitudes y polaridades variables, o la modulación de la amplitud, polaridad y frecuencia de corriente galvánica, las cuales dependen de la intensidad de los estímulos. En los órganos naturales, las frecuencias con que son enviadas las señales, a través de las vías vestibulares hacia el cerebro determinan el control de la postura. Con la ayuda del modelo de la función vestibular se calcula la frecuencia de aparición de estos pulsos para un estímulo y con ello se obtiene teóricamente la información requerida por el cerebro para detectar aceleraciones angulares y lineales a las que se somete la cabeza y generar los reflejos necesarios para controlar la postura.

## Dispositivo para la corrección de la orientación personal en condiciones extremas

El objetivo principal es el desarrollo de un sistema de “Corrección de la orientación personal en condiciones extremas”. Este dispositivo permite mejorar la calidad del control visual de los

objetos que se mueven en las condiciones de microgravedad. Este dispositivo debe compensar la señal desarrollada por el sistema vestibular para lo cual se hace uso de un conjunto de microgiroscopos y microacelerómetros, articulado en un módulo de medición inercial.

Bajo las condiciones de microgravedad que acompañan a los vuelos espaciales la calidad del control visual de los objetos en movimiento disminuye. Este fenómeno se supone que es causado por los conflictos vestibular-sensorial de la ingravidez, en particular, los cambios adaptativos, en el sistema de control oculomotor y las interacciones visuovestibulares resultantes de las alteraciones en las señales aferentes de mecanorreceptores vestibulares en la ingravidez (o en la microgravedad). Esto es debido a que en la ingravidez, los órganos otolíticos dejan de funcionar ya que su actividad se fundamenta en el efecto de una masa sensible sobre los haces de cilios. En la ingravidez, dicha masa sensible deja de tener un efecto sobre los haces ciliares y la entrada de información proveniente de aferentes de los órganos otolíticos se altera por completo lo que produce un conflicto con la entrada de información proveniente de los canales semicirculares y del sistema visual.

Esencialmente ante un desplazamiento el cosmonauta no recibe señales relacionadas con las aceleraciones lineales, en tanto el sistema visual informa de un desplazamiento del sujeto en el espacio. (Este conflicto es parcialmente semejante a lo que sucede a un sujeto en un elevador, en el cual antes del aprendizaje por su uso repetido, el sujeto –usualmente en la niñez– tiene una sensación extraña, debido a que por una parte el sistema visual informa de ausencia de movimiento, en tanto los órganos vestibulares informan de una aceleración del sujeto en dirección vertical.) Como resultado las estructuras integradoras del cerebro no pueden interpretar de manera correcta la información entrante. El tiempo necesario para la visualización, el reconocimiento de un objeto y la estabilización de la mirada aumentan significativamente. Proponemos que una posibilidad para superar los conflictos vestibular-sensoriales es el uso de un dispositivo que provea al sujeto de información de los desplazamientos de la cabeza.

## Interfaz sistema-humano

Un elemento clave del sistema de prótesis vestibular y del sistema de corrección de la orientación personal espacial en condiciones extremas es la EGV, ya que en ello reside la operatividad del sistema y el conjunto de electrodos con los que se realiza la EGV es en última instancia la interfaz entre el sistema y el sujeto. Para ello hemos propuesto el desarrollo de una diadema con un conjunto de electrodos que se colocará en la cabeza del individuo y que permite entonces aplicar pulsos de corriente DC a la región periauricular y corregir la posición en función de la salida del sistema protésico (Figura 9.5).

Este sistema se ha implementado en un dispositivo de corrección de la orientación personal espacial en condiciones extremas utilizando la estimulación galvánica (Figura 9.6). Este sistema es la base para diseñar una prótesis vestibular para la corrección de la postura<sup>30</sup> y reducir el tiempo de fijación de la mirada en órbita.<sup>2,38</sup> El dispositivo cuenta con un conjunto de sensores inerciales implementado en un Sistema Micro Electro Mecánicos (MEMS) actualmente en estudio en el experimento iMISS en el satélite experimental Lomonosov lanzado el 27 de mayo de 2016.<sup>39</sup> El sistema de corrección consiste en un casco que en la parte frontal incluye un MEMS con 3 microacelerómetros y 3 microgiroscopios (Figura 9.6).

Como ya mencionamos, en órbita, los sujetos tienen que controlar el movimiento de la nave espacial, dispositivos para maniobras, y en algunos casos un sistema de navegación personal, todo ello bajo condiciones de microgravedad. En estas condiciones los órganos otolíticos del aparato vestibular no funcionan adecuadamente y, por lo tanto, se ha propuesto que el cerebelo,





---

### **Figura 9.5.**

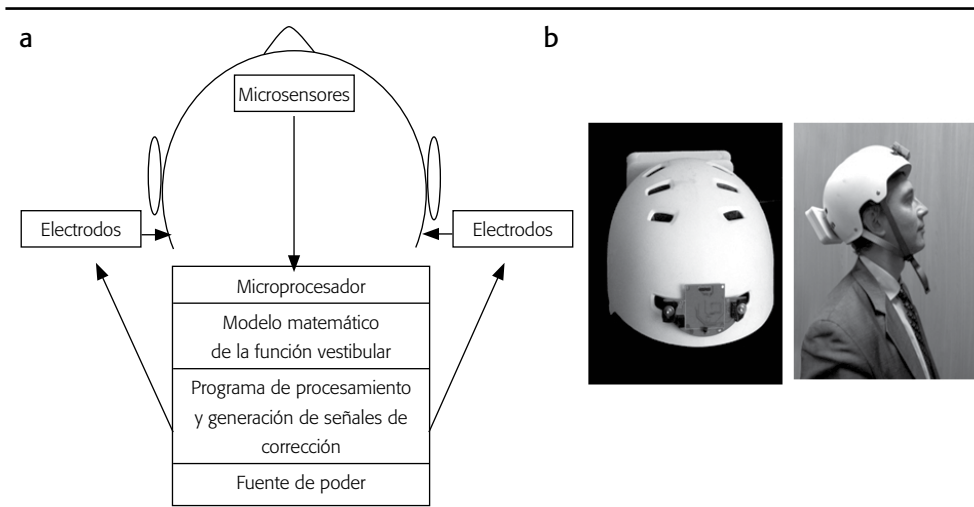
**Diadema de estimulación.** Es la interfaz entre el dispositivo electrónico y el sujeto. En los sistemas protésicos este suele ser el elemento más complejo ya que tiene que tratarse de un sistema biocompatible y que sea adecuado para su uso en forma continua por un sujeto que, en la fase médica del sistema, será muy probablemente un sujeto enfermo. Por ello su diseño y características son críticas para el éxito del sistema.

como uno de los niveles de control del sistema nervioso central, disminuye la ganancia de la entrada de información proveniente de los otolitos, alterando con ello la ganancia de los reflejos vestibulo-oculares.

El retraso en la estabilización de la mirada puede conducir a consecuencias catastróficas. En estas condiciones se propone utilizar los sensores artificiales, basados en el uso de microgiroscopios y microacelerómetros MEMS que permitan reponer la entrada de información respecto de los movimientos de la cabeza y de esta manera evitar los cambios plásticos de la ganancia en la entrada vestibular secundarios a la alteración de la respuesta de los órganos otolíticos y de los canales semicirculares; que además provean al usuario de información respecto a la dirección de la normal devolviéndole la sensación del arriba y el abajo y contribuyendo así a mantener la postura, contribuir a estabilizar la mirada y evitar el desarrollo de conflictos sensoriales que lleven a cambios plásticos complejos en las entradas vestibulares; eventualmente también contribuir a devolver a los sujetos en el espacio una sensación de bienestar derivada de la capacidad de reconocer su posición y desplazamientos en el medio.<sup>40</sup>

## **Discusión**

Debido a la alta incidencia de alteraciones vestibulares y sus efectos discapacitantes, se han desarrollado algunas prótesis y auxiliares vestibulares. Éstas consisten de al menos dos categorías: en una primera categoría, la prótesis vestibular provee información directa al sistema nervioso a



**Figura 9.6.**

Sistema de estabilización de la mirada. En **a**, el sistema incluye los sensores, la unidad de procesamiento, la unidad de potencia y los electrodos para la EGV. En **b**, prototipo del casco que incluye el sistema de estabilización propuesto. Se planifican experimentos para probar este casco en la Estación Espacial Internacional en 2016-2018, y si éstos resultan exitosos, en 2018-2020 se probará el sistema completo usando el sistema corrector, incluida la EGV para analizar su capacidad para reducir el retraso en la estabilización de la mirada en condiciones de microgravedad.

través de estimulación eléctrica de las vías vestibulares relacionadas con la orientación espacial. En una segunda categoría, la prótesis vestibular proporciona información vía sustitución sensorial a través de otros sistemas sensoriales (táctil, visual, auditivo, etcétera).

En relación con los dispositivos de la primera categoría, actualmente se realizan investigaciones para desarrollar prótesis vestibulares totalmente implantables, diseñadas con tecnología MEMS que consisten de giróscopos y acelerómetros, así como circuitos integrados. La operación y/o funcionamiento de estos dispositivos está basado en la capacidad para detectar las aceleraciones a las que se somete la cabeza y a la posibilidad de inyectar pulsos a la parte vestibular del cerebro. Entre los parámetros de sensibilidad que se toman en cuenta, están: a) el umbral de percepción rotacional; b) el umbral de sensibilidad de aceleraciones lineales en humanos, y c) la relación de descarga neuronal y su relación con las rotaciones y movimientos de la cabeza.

Las prótesis vestibulares de la segunda categoría tienen un carácter no-invasivo, es decir, sin necesidad de implantes y basadas en métodos que permiten al sujeto obtener información acerca de las aceleraciones a que se somete la cabeza por medio de otros órganos sensoriales (p. ej., un sonido o un estímulo eléctrico en la piel). En este caso, las capacidades plástica adaptativa y de aprendizaje del sujeto juegan un papel esencial en el funcionamiento del sistema protésico.

El grupo de investigación de la Universidad de Harvard es pionero en el campo de desarrollo de prótesis vestibulares. Ellos iniciaron realizando investigación en una prótesis neural del

canal semicircular que utiliza estimulación eléctrica. El dispositivo mide la velocidad angular de la cabeza con un microgiróscopo y se produce la estimulación eléctrica, entre 50 a 250 Hz a través de una tabla de valores que relacionan sigmoidalmente la velocidad angular con la frecuencia de estimulación. Una fuente de corriente utiliza estos pulsos para entregar una carga equilibrada en forma de pulsos de corriente a los nervios que inervan los canales semicirculares a través de electrodos de platino. Todos los componentes del dispositivo se encuentran en un contenedor que se puede montar en la parte superior de la cabeza.<sup>41,42</sup>

Otro dispositivo en investigación es el desarrollado por investigadores de la Universidad de Irvine en California, grupo con el que tuvimos una fructífera colaboración en el 2002, que permitió dejar clara la factibilidad en el desarrollo de las prótesis vestibulares (Shkel y Soto -2002 "estudio de la factibilidad del desarrollo de prótesis vestibulares". Proyecto UC-MEXUS-Conacyt). Ellos diseñaron una prótesis vestibular unilateral cuyo elemento de detección es un giróscopo MEMS de un eje. Similar a los canales semicirculares, el microgiróscopo detecta el movimiento angular de la cabeza y genera voltajes proporcionales a las aceleraciones angulares. La salida de estos detectores se envía a una unidad de generación de pulsos, en donde el movimiento angular se traduce en pulsos de corriente bifásica para estimular la correspondiente rama del nervio vestibular.<sup>43-46</sup>

Investigadores de la Universidad de John Hopkins en Estados Unidos han desarrollado un dispositivo, del cual han derivado diversas solicitudes de patente (WO-2011/088130, WO-2012/018631, US-2005-0267549), en donde se describe el funcionamiento de una prótesis vestibular que codifica el movimiento en tres dimensiones y origina impulsos eléctricos de frecuencia modulada, con los cuales los nervios ampulares son estimulados. Este dispositivo ha sido estudiado en animales experimentales, en los cuales los nervios ampulares son estimulados, provocando respuestas de giro y respuestas compensadoras acompañadas con reflejos vestibulo-oculares.<sup>47-50</sup> El sistema incluye un arreglo de electrodos para ser implantados quirúrgicamente en las ramas del nervio vestibular. Entre estas patentes y propuestas de prótesis destaca la idea de que un controlador digital pueda, usando la información derivada de sensores, configurarse para controlar la amplitud, frecuencia, polaridad y duración de la corriente para ser entregadas a cualquier combinación de electrodos implantados en los nervios vestibulares.<sup>48,49,51</sup>

Investigadores del Centro Médico de la Universidad de Washington realizaron un implante en humanos el cual tiene como objetivo tratar el vértigo asociado con la enfermedad de Ménière (trastorno del oído interno que afecta el equilibrio y la audición de la persona). El dispositivo se basa en la tecnología comercial para implantes cocleares con un arreglo de electrodos y un procesador con *software* diseñado para su uso especializado. El sujeto lleva un procesador y, cuando comienza un ataque, el paciente activa el dispositivo para que opere en los periodos en que tiene lugar el vértigo. Dicho dispositivo transmite impulsos eléctricos a través de tres electrodos insertados en los canales del laberinto óseo del oído interno. La intensidad del estímulo y la eficiencia en la supresión del vértigo deben ser moduladas por ajustes de amplitud y frecuencia. A pesar de los resultados positivos obtenidos con este implante en animales experimentales, el resultado de su uso en un paciente ha tenido un mal desempeño, con pérdida de su funcionalidad, además de que la implantación produjo pérdida auditiva secundaria en el sujeto.<sup>52,53</sup> Este mismo grupo de trabajo ha publicado posteriormente una casuística de cuatro pacientes implantados y sus resultados muestran que la estimulación eléctrica del órgano vestibular en humanos produce ciertamente un control de las entradas vestibulares, pero en los pacientes con enfermedad de Ménière se produjo pérdida total de la función auditiva y vestibular en el oído implantado. Lo cual indudablemente representa un grave fracaso del uso de prótesis vestibulares implantadas.<sup>54</sup>

En contraste con estos resultados negativos, el grupo de investigación formado por el consorcio Ginebra-Maastricht ha demostrado recientemente que es posible restaurar el reflejo ves-

tíbulo-ocular (RVO) en pacientes con hipofunción vestibular bilateral (BVH), estimulando eléctricamente con pulsos de amplitud modulada en los nervios ampulares de tres pacientes usando un prototipo de implante vestibular basado en un implante coclear modificado con electrodos para las ámpulas de los canales semicirculares e implantado crónicamente.<sup>55</sup> Este sistema puede restaurar artificialmente el RVO alcanzando hasta un 79 % de la respuesta medida en voluntarios sanos en las mismas condiciones experimentales. Estos resultados permiten por primera vez la rehabilitación clínicamente útil de los pacientes con pérdida vestibular bilateral. En estos experimentos, se observaron algunos efectos dependientes de la frecuencia comparable a la observada para el VOR "natural", lo que demuestra que, al menos en la gama de frecuencias específica (limitado), la prueba del implante vestibular imita las respuestas del sistema vestibular.<sup>56,57</sup>

Recientemente se ha desarrollado un sistema de giróscopos que se basa en microfluidos y que permite aparentemente reproducir muy bien las respuestas de los canales semicirculares, con una sensibilidad a la velocidad angular de menos de  $1^\circ/\text{s}$ , que es similar a la del sistema vestibular natural, además de que su consumo de corriente es mínimo lo cual lo hace muy atractivo como alternativa al uso de giróscopos vibracionales que son los que más comúnmente se han utilizado como sensores de aceleraciones angulares.<sup>58</sup>

Estos desarrollos, sin embargo, son incipientes. No existe en el estado de la técnica una prótesis vestibular que reproduzca el procesamiento de la información vestibular natural ante los estímulos mecánicos. Por lo tanto, existe una necesidad de desarrollo de una prótesis o sistema auxiliar vestibular, que compense la pérdida de la función vestibular en una persona y las funciones relacionadas con ella. Cabe destacar que las prótesis implantadas han fracasado en pacientes y que si bien los resultados del consorcio Ginebra-Maastricht son alentadores, este sistema no es propiamente una prótesis vestibular ya que su actividad no está relacionada ni es controlada por un sistema con sensores de movimiento. Por eso consideramos que el enfoque dado a nuestro trabajo llevándolo al desarrollo de un sistema auxiliar vestibular, más que al de un sistema prostético implantado que sustituye completamente la función vestibular, es potencialmente adecuado y puede tener importantes aplicaciones en el medio aeroespacial (es impensable implantar intracerebralmente una prótesis en sujetos sanos, al menos no en el futuro cercano) y en su uso en pacientes y ancianos en quienes las alteraciones en el sistema del equilibrio pueden ser el origen de caídas que deriven en daño grave al sistema óseo y en ocasiones en evento terminal de la vida.

# Referencias

1. Vega R, Alexandrov VV, Alexandrova TB, Soto E. Mathematical model of the cupula-endolymph system with morphological parameters for the axolotl (*Ambystoma tigrinum*) semicircular canals. *Open Med Inf J*. 2008;2:138-48.
2. Alexandrov VV, Alexandrova TB, Bugrov DI, Lebedev AV, Lemak SS, Tikhonova KV, et al. Mathematical modeling of output signal for the correction of the vestibular system inertial biosensors. *International Symposium on Inertial Sensors and Systems*. IEEE Proceedings. 2014:109-12.
3. Sadovnichii VA, Alexandrov VV, Alexandrova TB, Soto E, Sidorenko G, Tikhonova KE. On the automatic correction of vestibular-sensory conflict under weightlessness conditions of space, based galvanic stimulation principle and on mathematical and computer modeling. *Integral*. 2012;1:70-4.
4. Sadovnichii V, Alexandrov VV, Alexandrova T, Konik AA, Pakhomov BV, Sidorenko G, et al. Mathematical simulation of correction of output signals from gravito-inertial mechanoreceptor of a vestibular apparatus. *Moscow Univ Mech Bull*. 2013;68(5):111-6.
5. Basci AM, Colebatch JG. Evidence for reflex and perceptual vestibular contributions to postural control. *Exp Brain Res*. 2005;160:22-8.
6. Cullen KE. The vestibular system: multimodal integration and encoding of self-motion for motor control. *Trends Neurosci*. 2012;35(3):185-96.
7. Jamon M. The development of vestibular system and related functions in mammals: impact of gravity. *Front Integr Neurosci*. 2014;8:11.
8. Jones GM. Postura. En: Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM (ed). *Principios de Neurociencias*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana; 2000.
9. Lopez C. A neuroscientific account of how vestibular disorders impair bodily self-consciousness. *Front Integr Neurosci*. 2013;7:91.
10. Hitiér M, Besnard S, Smith PF. Vestibular pathways involved in cognition. *Front Integr Neurosci*. 2014;8:59.
11. Alme CB, Miao C, Jezek K, Treves A, Moser EI, Moser MB. Place cells in the hippocampus: Eleven maps for eleven rooms. *Proc Natl Acad Sci*. 2014;111:18428-35.
12. Moser MB. Nobel Lecture: Grid Cells, Place Cells and Memory. [nobelprize.org](http://nobelprize.org). Nobel Media AB 2014. [www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/medicine/laureates/2014/may-britt-moser-lecture.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2014/may-britt-moser-lecture.html)
13. Fife TD. Overview of anatomy and physiology of the vestibular system. En: Scott DZ, Eggers, Zee DS (ed). *Vertigo and imbalance: Clinical Neurophysiology of the vestibular system*. Handbook of Clinical Neurophysiology. Philadelphia: Elsevier; 2010
14. Hegeman J, Honegger F, Kupper M, Allum JHJ. The balance control of bilateral peripheral vestibular loss subjects and its improvement with auditory prosthetic feedback. *J Vest Res*. 2005;15(2):109-17.
15. Angelaki DE, McHenry MQ, Dickman JD, Newlands SD, Hess BJ. Computation of inertial motion: neural strategies to resolve ambiguous otolith information. *J Neurosci*. 1999;19(1):316-27.
16. Soto E, Budelli R, Holmgren B. Sistema vestibular. En: Muñoz J, García X (ed). *Fisiología. Células órganos y sistemas*. Vol. V. México: Fondo de Cultura Económica; 1998: p. 173-83.
17. Soto E, Alexandrov VV, Alexandrova TV, Cruz R, Astakhova TG. Mathematical model of the cupula-endolymph system with morphological parameters for the axolotl (*Ambystoma tigrinum*) semicircular canals. En: Doger E, Sadovnichiy VA (ed). *Mathematical modeling of complex information processing systems*. Moscow State University Press; 2001: p. 5-14.
18. Krizkova M. Control of the body vertical by vestibular and proprioceptive inputs. *Brain Res*. 1996;40:431-4.
19. Almanza A, Vega R, Soto E. Calcium current in type I hair cells isolated from the semicircular canal crista ampullaris of the rat. *Brain Res*. 2003;994:175-80.
20. Almanza A, Vega R, Navarrete F, Soto E. Nitric oxide modulation of L type Ca current in sensory hair cells. *Journal of Neurophysiology*. 2007;97:1188-95.
21. Vega R, Almanza A, Soto E. Hair cell ionic currents: a comparative analysis of the utricle and semicircular canal cells from the axolotl (*Ambystoma tigrinum*). En: Doger E, Sadovnichiy VA (ed). *Mathematical modeling of complex information processing systems*. Moscow State University Press; 2001: p. 15-25.
22. Day BL. Galvanic vestibular stimulation: new uses for an old tool. *J Physiol*. 1999;517:631-5.
23. Cathers I, Day BL, Fitzpatrick RC. Otolith and canal reflexes in human standing. *J Physiol*. 2005;563:229-34.
24. Britton TC, Day BL, Rothwell JC, Thompson PD, Marsden CD. Postural electromyographic responses in the arm and leg following galvanic vestibular stimulation in man. *Exp Brain Res*. 1993;94:143-51.
25. Hlavacka F, Mergner T, Krizkova M. Control of the body vertical by vestibular and proprioceptive inputs. *Brain Res Bull*. 1996;40:431-5.
26. Wardman DL, Taylor JL, Fitzpatrick RC. Effects of galvanic vestibular stimulation on human posture and perception while standing. *J Physiol*. 2003;551(3):1033-42.
27. Fernández C, Goldberg JM. Physiology of peripheral neurons innervating otolith organs of squirrel monkey. I. Response to static tilts and to long-duration centrifugal force. *J Neurophysiol*. 1976;39(5):970-84.
28. Fitzpatrick RC, Day BL. Probing the vestibular system with galvanic vestibular stimulation. *J Appl Physiol*. 2004;96:2301-16.
29. Cauquil AS, Bousquet P, Salon MCC, Dupui P, Bessou P. Monaural and binaural galvanic vestibular stimulation in human dynamic balance function. *Gait Post*. 1997; 6:210-7.
30. Soto E, Vega R, Alexandrova T, Alexandrov V, Reyes M, Pliego A, et al. Vestibular prosthesis. Patent No. 8,855,774 B2. Issued by the Patent Office of the United States. October 7, 2014. Pub.No. US2014/0081346 A1

31. Pliego-Carrillo A. Desarrollo de sistemas prostéticos auxiliares para el control del equilibrio y la orientación. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias Fisiológicas, Universidad Autónoma de Puebla. 2013.
32. Markin VS, Hudspeth AJ. Gating-spring models of mechano-electrical transduction by hair cells of the internal ear. *Annu Rev Biophys Biomol Struct.* 1995;24:59-83.
33. Fettiplace R, Fuchs PA. Mechanisms of hair cell tuning. *Ann Rev Physiol.* 1999;61:809-34.
34. Hodgkin AL, Huxley AF. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *J Physiol.* 1952;117(4):500-44.
35. Alexandrov VV, Alexandrova TB, Castillo-Quiroz G, Ortega A, Vega R, Shulenina N, et al. Information process in the biosensor of the angular motion of the head. En: *Computers and Simulation in Modern Science. Volume IV.* WSEAS Press; 2010; p. 56-62.
36. Keen EC, Hudspeth AJ. Transfer characteristics of the hair cell's afferent synapse. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2006;103(14):5537-42.
37. Alexandrov VV, Alexandrova TB, Vega R, Castillo-Quiroz G, Angeles-Vazquez A, Reyes-Romero M, et al. Information process in vestibular system. *WSEAS Transactions in Biology and Medicine.* 2007;12(4):193-203.
38. Sadovnichii V, Alexandrov VV, Alexandrova TB, Soto E, Vega R, et al. Automatic correction mechanism for the stabilization of gaze, in the direction of motion in microgravity. Patent No. 2,500,375. Issued by the patent office in Russia with international validity of the December 10, 2013 to January 8, 2032 (ROSPATENT 2012123665/14 (036206). [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet)
39. Lomonosov Project. Automatic gaze stabilization corrector. Disponible en: <http://lomonosov.sinp.msu.ru/en/scientific-equipment-2/imiss-1>; <http://lomonosov.sinp.msu.ru/en/science/avtomaticheskij-korrektor-stabilizatsii-vzora>
40. Smith PF, Darlington CL. Personality changes in patients with vestibular dysfunction. *Front Hum Neurosci.* 2013;7:678.
41. Gong W, Merfeld DM. Semicircular canal prosthesis. *Analysis.* 2002;49(2):175-81.
42. Merfeld DM, Rabbitt RD. Vestibular prosthesis. En: *Neuroprosthetics. Theory and Practice, Series on Bioengineering and Biomedical Engineering. Vol. 2* World Scientific Publishing. 1a ed. 2004; p. 1115-45.
43. Liu J, Shkel AM, Nie K, Zeng FG. System design and experimental evaluation of a MEMS-based semicircular canal prosthesis. Proceedings of the 1st International IEE EMBS. Conference on Neural Engineering. Capri Island, Italy. March 20-22. 2003.
44. Alexandrov V, Lemak S, Shkel A, Soto E. Corrections of a vestibular function under extreme conditions of the aerospace flight. Proceedings of the 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. St Petersburg Ed. Alexandr Nebylov. 2004;1:268-73.
45. Shkel AM. An electronic prosthesis mimicking the dynamic vestibular function. Proceedings of SPIE. 2006;6174(14):1-12.
46. Shkel AM, Zeng FG. An electronic prosthesis mimicking the dynamic vestibular function. *Audiology and Neurotology. Special issue on Micro- and Nanotechnology for Neurotology.* Karger Publisher. 2006;11(2).
47. Della-Santina CC, Migliaccio AA, Patel AH. A multichannel semicircular canal neural prosthesis using electrical stimulation to restore 3-D vestibular sensation. *IEEE Trans Biomed Engn.* 2007;54(6):1016-30.
48. Dai C, Fridman GY, Chiang B, Davidovics NS, Melvin TA, Cullen KE, et al. Cross-axis adaptation improves 3-D vestibulo-ocular reflex alignment during chronic stimulation via head-mounted multichannel vestibular prosthesis. *Exp Brain Res.* 2011a;210:595-606.
49. Dai C, Fridman GY, Davidovics NS, Chiang B, Ahn JH, Della-Santina CC. Restoration of 3D vestibular sensation in rhesus monkeys using a multichannel vestibular prosthesis. *Hearing Res.* 2011b;281:74-83.
50. Mitchell DE, Dai C, Rahman MA, Ahn JH, Della-Santina CC, Cullen KE. Head movements evoked in alert rhesus monkey by vestibular prosthesis stimulation: implications for postural and gaze stabilization. *PLoS One.* 2013;8(10):e78767.
51. Hayden R, Sawyer S, Frey E, Mori S, Migliaccio A, Della-Santina CC. (2011). Virtual labyrinth model of vestibular afferent excitation via implanted electrodes: validation and application to design of a multichannel vestibular prosthesis. *Exp Brain Res.* 210(3-4):623-40.
52. Rubinstein JT, Bierer S, Kaneko C, Ling L, Nie K, Oxford T, et al. Implantation of the semicircular canals with preservation of hearing and rotational sensitivity: a vestibular neurostimulator suitable for clinical research. *Otology & Neurotology.* 2010;33(5):789-96.
53. Golub JS, Ling L, Nie K, Nowack A, Shepherd SJ, Bierer SM, et al. Prosthetic implantation of the human vestibular system. *Otology & Neurotology.* 2014;35(1):136-47.
54. Phillips JO, Ling L, Nie K, Jameyson E, Phillips CM, Nowack AL, et al. Vestibular implantation and longitudinal electrical stimulation of the semicircular canal afferents in human subjects. *J Neurophysiol.* 2015;113(10):3866-92.
55. Perez-Fornos A, Guinand N, Van de Berg R, Stokroos R, Micera S, Kingma, et al. Artificial balance: restoration of the vestibulo-ocular reflex in humans with a prototype vestibular neuroprosthesis. *Front Neurol.* 2014;5:66.
56. Van de Berg R, Guinand N, Nguyen TAK, Ranieri M., Cavuscens S, Guyot JP, et al. The vestibular implant: frequency-dependency of the electrically evoked vestibulo-ocular reflex in humans. *Front Sys Neurosci.* 2014;8:255.
57. DiGiovanna J, Nguyen TAK, Guinand N, Pérez-Fornos A, Micera S. Neural network model of vestibular nuclei reaction to onset of vestibular prosthetic stimulation. *Front Bioeng Biotechnol.* 2016;4:34.
58. Andreou C, Pahitas Y, Georgiou J. Bio-inspired micro-fluidic angular-rate sensor for vestibular prostheses. *Sensors.* 2014;14(7):13173-185.

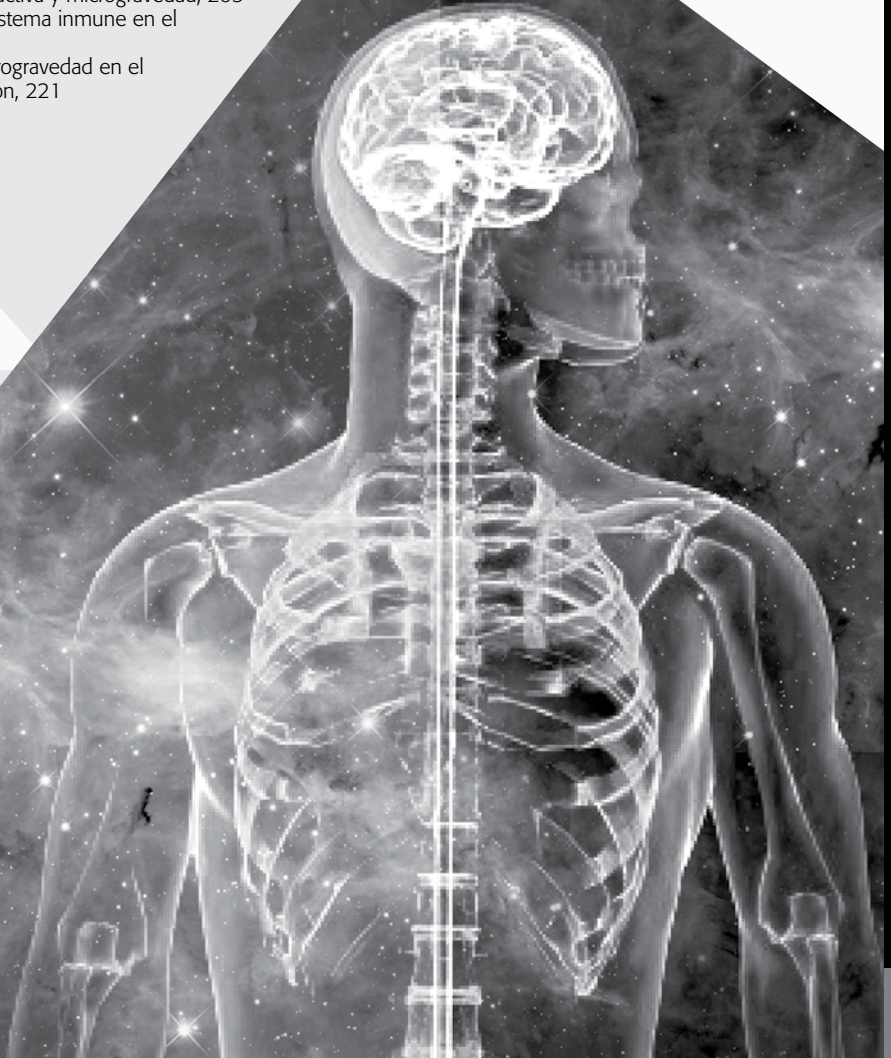




## Sección 2

# Adaptación fisiológica en el espacio

10. Sistema cardiovascular, 139
11. Sistema neurológico y vestibular, 153
12. Sistema respiratorio, 165
13. Rehabilitación en microgravedad, 175
14. Líquidos, electrolitos y función renal en el Espacio, 185
15. Nutrición en el Espacio, 193
16. Medicina reproductiva y microgravedad, 205
17. Adaptación del sistema inmune en el Espacio, 209
18. Efectos de la microgravedad en el aparato de la visión, 221







# 10. Sistema cardiovascular

José Martín Meza Márquez, Raúl Carrillo Esper

## ■ Introducción

El sistema cardiovascular (SCV) es una de las áreas del cuerpo humano particularmente influenciadas por la gravedad terrestre; este sistema posee una serie de mecanismos de ajuste hemodinámico que asegura una adecuada presión de perfusión cerebral en cualquier posición que el cuerpo adopte con respecto al vector de aceleración de la gravedad.

A lo largo de la evolución de la humanidad, la gravedad ha tenido una importante participación, ejemplo de ello es el que se observa en cualquier individuo en posición vertical (de pie), por efecto de la gravedad el retorno sanguíneo venoso estará disminuido. Esta disminución inducida provocará una disminución del gasto cardiaco (GC) lo que es detectado por barorreceptores cardiopulmonares y arteriales que inician una constricción de los vasos de resistencia arterial para evitar que la presión arterial (PA) caiga.<sup>1</sup> Por lo tanto, ya que la posición vertical es la postura en la cual los seres humanos pasamos la mayor parte de la vida (2/3 partes en promedio), puede decirse que la gravedad induce vasoconstricción sistémica crónica. Por efectos de la gravedad algunas constantes clínicas cardiovasculares varían en las diferentes partes del cuerpo.<sup>1,2</sup>

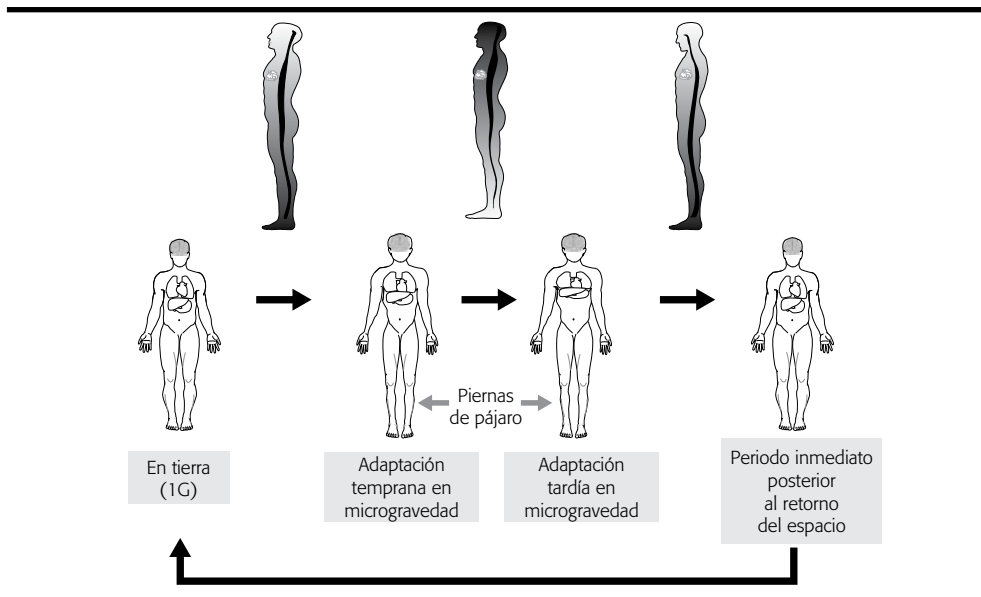
Cambios drásticos en el SCV se pueden esperar al llegar al espacio. Afortunadamente el SCV tiene la capacidad de adaptarse a condiciones de microgravedad. Los mecanismos de adaptación que lleva a cabo este sistema se determinan de acuerdo con la etapa o fase del vuelo.<sup>2,3</sup>

El proceso de adaptación del SCV en microgravedad presenta dos fases con marcadas diferencias hemodinámicas. La primera fase se inicia en el momento en que la nave entra en órbita y cubre alrededor de 72 horas; se caracteriza por incremento del retorno venoso (precarga), del volumen latido, del gasto cardiaco y, de las dimensiones de las cavidades cardíacas. La segunda se caracteriza por cambios progresivos y apenas perceptibles (Figura 10.1).<sup>2,3</sup>

## Adaptaciones tempranas

### Redistribución de líquidos

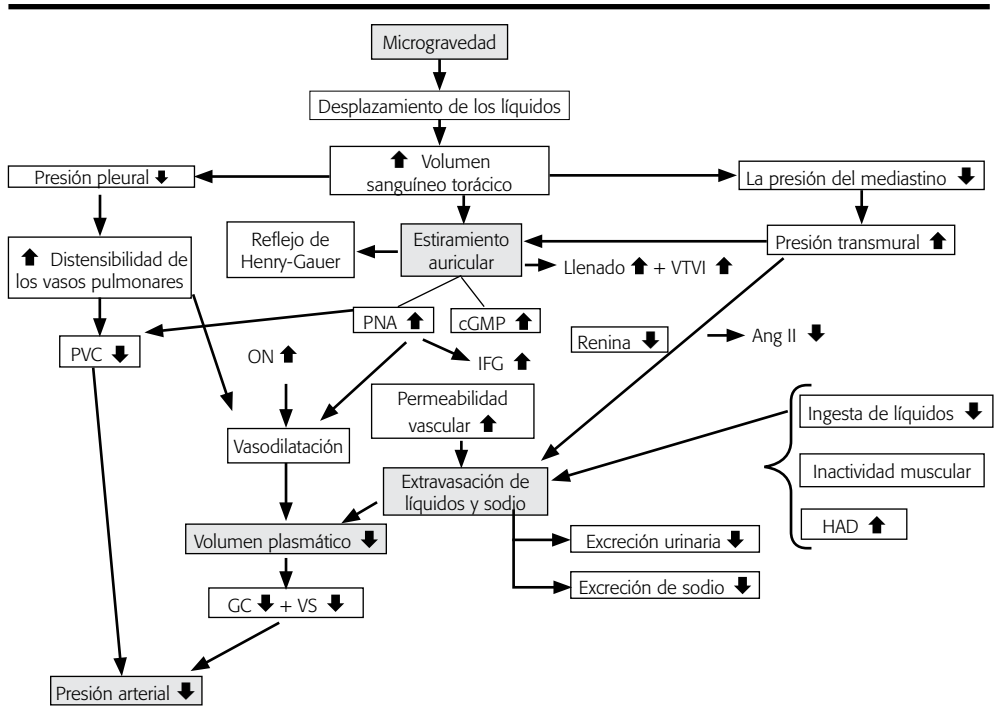
Al entrar en microgravedad, los líquidos corporales incluida la sangre ya no tienden a concentrarse en las piernas, sino que se redistribuyen a la parte superior del cuerpo teniendo como



**Figura 10.1.** Representación esquemática de los cambios físicos y fisiológicos en las diferentes fases del vuelo espacial. Nótese la distribución de los líquidos hacia la parte superior del cuerpo.



**Figura 10.2.** La redistribución de flujo a la parte superior del cuerpo provoca disminución del diámetro de las piernas ("piernas de pájaro"), y edema facial. Nótese las caras de los astronautas antes del vuelo (*izquierda*), y durante microgravedad.



**Figura 10.3.**

Se muestran los diferentes cambios fisiológicos en la fase temprana en un ambiente de microgravedad.

(PVC, presión venosa central; ON, óxido nítrico; PNA, péptido natriurético auricular; cGMP, monofosfato cíclico de guanosina; Ang II, angiotensina II; VTVI, volumen telediastólico del ventrículo izquierdo; IFG, índice de filtrado glomerular; HAD, hormona antidiurética; GC, gasto cardíaco; VS, volumen sistólico.)

repercusión clínica en los astronautas la disminución del perímetro de las piernas (“piernas de pollo o pájaro”), aumento del perímetro torácico, y edema facial (Figura 10.2).<sup>3</sup> Cerca de 2 litros de líquido se desplazan en sentido cefálico provocando un incremento del gasto cardíaco en 18 a 26%.<sup>4</sup> Este desplazamiento de líquidos se cuantificó midiendo el espesor de los tejidos blandos de las piernas y de la región frontal de la cabeza a través de ultrasonido. Se observó una disminución del tejido tibial en un 15%, mientras que en la frente se incrementó en 7%. Por lo tanto, hubo un cambio de aproximadamente 200 mililitros del tejido superficial de las extremidades inferiores y alrededor de 50 mL se acumularon en los tejidos blandos de la cabeza.<sup>5</sup>

La migración de la sangre a la parte superior del cuerpo provoca un aumento de la capacidad venosa de los vasos torácicos incrementando la precarga y distendiendo las cámaras cardíacas. Esto es apoyado por un aumento de la presión venosa central (PVC) transmural durante la primera fase de ingravidez.<sup>6</sup> Sin embargo, varias investigaciones demostraron una sorprendente disminución de la PVC junto con el aumento de volumen de las cavidades cardíacas (Figura 10.3).<sup>7-9</sup> Estas primeras mediciones fueron obtenidas durante la primera misión de la Estación

Espacial Internacional (EEI): se colocó un catéter venoso central posicionado cerca de la aurícula derecha a tres astronautas. Se obtuvieron mediciones continuas de la PVC antes, durante el lanzamiento y en la fase temprana de microgravedad. La media de PVC fue de 8.4 cm H<sub>2</sub>O en posición sedente antes del vuelo, 15 cm H<sub>2</sub>O en posición supina con las piernas elevadas durante el procedimiento de lanzamiento y 2.5 cm H<sub>2</sub>O después de 10 minutos de microgravedad. Por otra parte el volumen de llenado y el volumen sistólico se mantuvieron elevados.<sup>8,9</sup> Esta discrepancia entre PVC baja y altos volúmenes de llenado intratorácico siguen siendo un problema no resuelto.

La microgravedad causa una reducción sustancial en la presión intratorácica secundaria al aumento del diámetro torácico. Videbaek y Norsk observaron cambios respecto a la dilatación cardíaca y la reducción simultánea de la PVC en condiciones de microgravedad. La presión esofágica (una medida de presión intratorácica) se midió con la PVC y el diámetro de la aurícula derecha durante vuelos parabólicos simulando microgravedad. La PVC disminuyó de  $5.8 \pm 1.5$  mm Hg a  $4.5 \pm 1.1$  mm Hg. Además, reportaron que la caída de la presión intratorácica fue aún mayor que la disminución de la PVC (la presión esofágica se redujo de  $1.5 \pm 1.6$  mm Hg a  $-4.1 \pm 1.7$  mm Hg), de tal manera que existe un aumento de la presión transmural cardíaca en condiciones de microgravedad. El aumento de la presión transmural correspondió a un aumento del diámetro de la aurícula derecha. Por lo tanto, las consecuencias mecánicas de estar en microgravedad conduce a distensión de las cavidades cardíacas en las primeras 24 h de vuelo espacial.<sup>10</sup>

Parece claro que la distensión de las cavidades cardíacas se produce durante los primeros 2 días de vuelo espacial.<sup>11</sup> El incremento en el volumen telediastólico evidencia el aumento del diámetro del ventrículo izquierdo (VI). Se han realizado estudios ecocardiográficos que han demostrado un aumento del volumen del VI durante las primeras 48 h en microgravedad.<sup>12</sup>

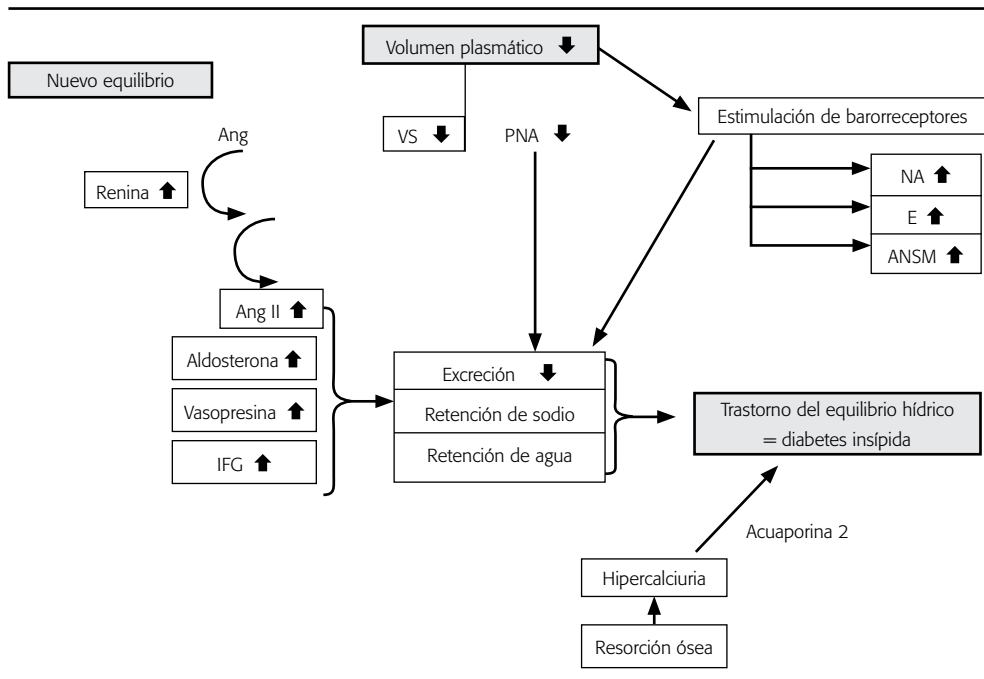
El estiramiento auricular provocará liberación de péptido natriurético auricular (PNA). Se ha demostrado que existe un 80 % de PNA el primer día en microgravedad. Lo anterior conducirá a un aumento de la permeabilidad vascular, que junto al aumento de la presión transmural, la transición de sodio (Na) y agua del compartimento intravascular al extravascular lograrán disminuir el volumen sanguíneo central.<sup>13</sup>

En microgravedad también desaparece la tensión relacionada con la compresión de los tejidos, lo que lleva a vasodilatación. Esto también se ve facilitado por una disminución de la presión pleural, lo que favorece la distensibilidad de los vasos pulmonares y la vasculatura torácica, como resultado la PVC disminuye.<sup>14</sup>

También se ha sugerido que el cese de la función de los grandes músculos en condiciones de microgravedad facilita la extravasación de sodio y líquidos. Recordemos que el retorno de agua al compartimento vascular es mediado en parte por la acción de bombeo de la contracción muscular aumentando el flujo linfático.<sup>15</sup>

Por lo tanto, el volumen plasmático no sólo se desplaza a la parte superior del cuerpo, sino también se reduce. Así entonces, la exposición a la microgravedad a corto plazo (< 10 días) produce vasodilatación y un rápido cambio en la permeabilidad vascular, lo cual conduce a una extravasación exagerada de líquidos, que contribuirá a una disminución en el volumen plasmático y esto ayudará a disminuir la presión de la auricular (Figura 10.4).<sup>16</sup>

El volumen sanguíneo efectivo es el acontecimiento clave en la adaptación crónica a la microgravedad. El bajo volumen sistólico (VS), así como niveles reducidos de PNA indican el déficit de volumen en el plasma.<sup>17</sup> En un estudio utilizando 125 I-albúmina para estimar el volumen plasmático en seis astronautas, mostró una reducción de 17 % de 3.52 a 2.94 litros 21 horas después del vuelo espacial. El volumen plasmático se mantuvo disminuido hasta después del aterrizaje.<sup>18</sup>



### Figura 10.4.

Se ilustran los cambios fisiológicos para mantener una homeostasis como respuesta a la disminución del volumen plasmático.

(Ang, angiotensina; Ang I, angiotensina I; Ang II, angiotensina II; ECA, enzima convertidora de angiotensina; VS, volumen sistólico; PNA, péptido natriurético auricular; NA, noradrenalina; E, epinefrina; ANSM, actividad nerviosa simpática muscular.)

Pero de igual manera, varios mecanismos compensatorios se activan en un esfuerzo por superar el déficit de volumen sanguíneo efectivo. Los barorreceptores responden a la disminución de volumen plasmático, aumentando el tono vasomotor, así como la reabsorción de sodio y agua.<sup>19</sup> Esto se refleja en niveles séricos elevados de noradrenalina. El sistema renina-angiotensina-aldosterona se activa para retener líquidos en el espacio intravascular, como forma de compensar la pérdida de volumen.<sup>20</sup> Estas acciones conducen nuevamente a la excreción y retención de sodio. La combinación de retención de Na con un desequilibrio hídrico indica un trastorno de la reabsorción de agua regulada por vasopresina. Esto es apoyado por la supresión de la actividad de los canales de acuaporina 2 en combinación con la hipercalciuria causada por la pérdida de hueso.<sup>21</sup>

## Aspectos hemodinámicos

Otras de las adaptaciones a un ambiente de microgravedad son los cambios en el gasto cardiaco, volumen sistólico y la presión arterial. Como se ha mencionado, el aumento del volumen sanguíneo central en condiciones de microgravedad aumentará la precarga, en consecuencia, tanto el VS y el GC aumentarán. Simultáneamente la PA permanecerá sin cambios o ligeramente disminuida.<sup>22</sup>

También se ha comprobado que durante las misiones espaciales existe una dilatación sistémica que induce un aumento del GC desde el principio hasta el final del vuelo para incrementar la PA.<sup>23</sup>

Resultados de mediciones cardiovasculares en astronautas durante vuelos espaciales indican que el GC se incrementó en promedio 18% durante un ambiente de microgravedad en comparación con la posición vertical o sedente en gravedad 1, más aún durante los primeros días de vuelo que al final del mismo.<sup>23</sup>

Fritsch llevó a cabo un estudio durante vuelos de corta duración en el transbordador espacial midiendo la PA ambulatoria por 24 h con un equipo portátil. Una disminución de la presión arterial diastólica (PAD) de 5 mm Hg fue reportada dentro de las primeras 2 semanas de vuelos, pero no se observaron cambios en la presión arterial media (PAM), ni en la presión arterial sistólica (PAS). Por lo tanto, al aumentarse el GC la PAM se mantiene sin cambios a pesar de la dilatación arterial inducida por la disminución en la resistencia vascular sistémica (RVS).<sup>24</sup>

Los cambios antes mencionados se han detectado en las primeras 2 semanas en microgravedad a bordo de un transbordador espacial. Se sabe poco acerca de si estas adaptaciones persisten, están atenuadas, aumentadas o suprimidas durante vuelos de larga duración. En un estudio realizado por Herauld en la Estación Espacial Rusa (EER), observó por medio de ecocardiografía una disminución en el VS en 10 a 16% en comparación con la posición del cuerpo en supino en gravedad 1.<sup>25</sup> Sin embargo, Hughson utilizando un método no invasivo para el análisis del contorno de la onda de presión sanguínea del dedo en astronautas en la EEI no observó ningún cambio en el VS a lo largo de meses de vuelo comparando con la posición sedente y supina en tierra.<sup>26</sup>

En una investigación reciente realizada en astronautas de la EEI, se midió de forma continua por 24 h la PA, GC, y frecuencia cardiaca (FC) antes del vuelo (días 322 y 71), durante el vuelo (días 85 y 192) y después del vuelo (días 58 y 209). Los resultados fueron los siguientes: la PAS, PAD y PAM disminuyeron durante todas las fases del ciclo de 24 h durante el vuelo en comparación con el prevuelo. La media de la PAS disminuyó de  $129 \pm 2$  mm Hg a  $121 \pm 2$  mm Hg ( $p = 0.01$ ); la de la PAD de  $85 \pm 2$  mm Hg a  $76 \pm 2$  mm Hg ( $p = 0.001$ ), y la PAM de  $102 \pm 3$  mm Hg a  $92 \pm 1$  mm Hg ( $p = 0.006$ ). Todas las presiones arteriales volvieron a niveles previos al regresar a tierra. La media de la FC de 24 h se mantuvo sin cambios durante los vuelos espaciales ( $64 \pm 2$  latidos/min vs.  $63 \pm 2$  latidos/min en tierra). El GC aumentó en el espacio de un valor prevuelo en posición sedente de  $6.2 \pm 0.4$  L/min a  $8.4 \pm 0.3$  L/min ( $p < 0.001$ ). Las RVS disminuyeron un  $39 \pm 4\%$  ( $p < 0.001$ ). El VS aumentó  $33 \pm 8$  mL ( $p < 0.001$ ).<sup>27</sup>

El incremento del GC también obedece al cambio reposo-actividad física de forma muy similar a lo que se observa en gravedad 1. Esto se demostró al medir el GC inmediatamente después de las primeras actividades ambulatorias durante el vuelo espacial, encontrando un aumento del GC de  $6.5 \pm 0.4$  L/min a  $8.5 \pm 0.4$  L/min ( $p < 0.001$ ), y la segunda medición realizada después de 5 a 7 minutos de reposo y posteriormente actividad ambulatoria incrementando

de  $5.9 \pm 0.4$  L/min a  $8.4 \pm 0.4$  L/min ( $p < 0.001$ ). También se reportó que la PAS fue significativamente menor durante el periodo de sueño en el espacio en comparación con periodos similares en tierra.<sup>27</sup>

La reducción de la presión arterial es inducida por una disminución de la RVS hasta en un 39 % por dilatación de los vasos arteriales de resistencia. Esta disminución fue evidente tanto en el comienzo como al final del vuelo.<sup>27</sup>

No está claro la fisiopatología de la vasodilatación periférica. Se esperaría que dicha vasodilatación debería ser inducida por la supresión de la actividad aferente del sistema nervioso simpático. Los posibles mecanismos fisiopatológicos que explican la disminución de la resistencia vascular sistémica implican cambios crónicos en la distribución de los líquidos y la sangre a la parte superior del cuerpo, lo que ocasiona menos estiramiento de las pequeñas arterias y venas de las piernas, además de la dilatación de las cavidades cardíacas. El menor estiramiento de los pequeños vasos dependientes, reduce la contractilidad del músculo liso arteriolar.<sup>28,29</sup> Otro factor que pudiera contribuir es la secreción de péptido natriurético auricular y cerebral.<sup>30</sup> Sin embargo estas hipótesis no son compatibles con resultados de investigaciones anteriores sobre vuelos cortos en transbordadores.<sup>31</sup>

Verheyden investigó la actividad barorrefleja espontánea en la EEI concluyendo que la regulación neurocardiovascular en microgravedad se encuentra en un nivel muy cercano al de la posición supina en tierra, lo que sugiere que la resistencia de los vasos arteriales se disminuye como consecuencia de la dilatación crónica durante por lo menos 6 meses de vuelos espaciales.<sup>32</sup>

Dado que la gravedad hace hincapié en el SCV humano al inducir un aumento de la actividad nerviosa simpática mediada por barorreflejos, se pensaba que la ingravidez suprimiría esta respuesta. Esto estaría de acuerdo con los resultados de los modelos de simulación antiortostática donde los cambios agudos en la postura o la inmersión en agua suprimían la actividad nerviosa simpática en comparación con los valores en posición vertical sentado.<sup>33</sup>

Durante la década de los 70, se observó una disminución en las tasas de excreción urinaria de norepinefrina durante las misiones del Skylab en comparación con los valores posteriores al vuelo, pero sólo una tendencia a la disminución respecto a los niveles previos al vuelo. Sin embargo, el problema es que las tasas de excreción urinaria de norepinefrina no reflejan necesariamente la actividad global del sistema nervioso simpático.<sup>33</sup>

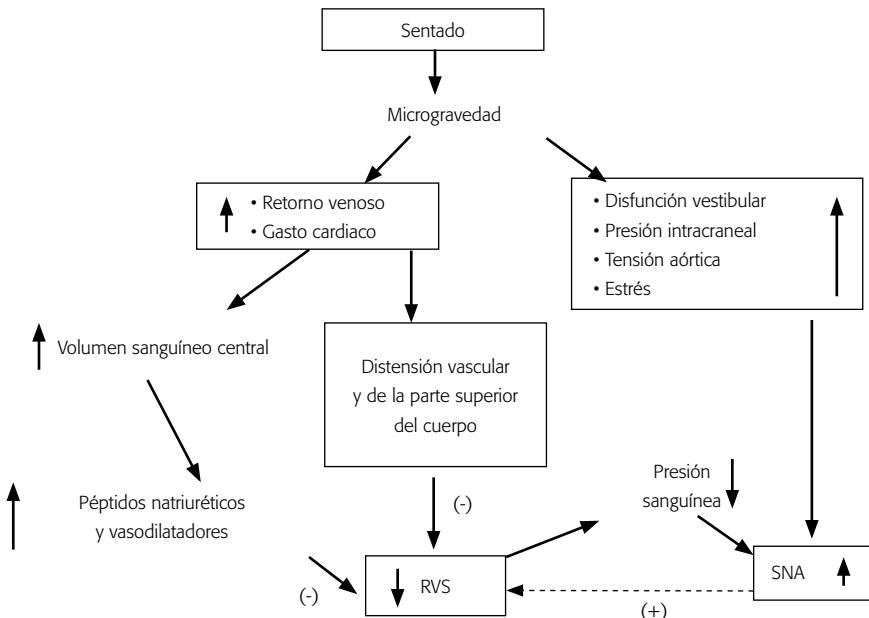
Mediciones más precisas de la actividad nerviosa simpática en humanos en el espacio han indicado que contrariamente a lo esperado, no hubo una disminución, sino lo contrario, se observó un incremento de la actividad en comparación con el grupo control en posición supina en tierra.<sup>33</sup> Por lo tanto, los valores de norepinefrina se encuentran elevados durante un vuelo espacial en comparación con la posición supina aguda en tierra y en ocasiones también en comparación con valores observados en posición sedente. Ertl informó más tarde que la secreción neural simpática basal determinada por una técnica microneurográfica directa en un nervio peroneo, incrementó moderadamente en el vuelo comparado con el grupo control en supino. Además, en el mismo estudio se demostró que la tasa de secreción de norepinefrina fue significativamente mayor en el espacio.<sup>34</sup>

Es una paradoja que las RVS se disminuyan mientras que el sistema nervioso simpático se activa simultáneamente. Una posibilidad a considerar es que la sensibilidad vascular a la actividad nerviosa simpática se encuentra de alguna manera reducida en un ambiente de microgravedad. Zhang ha revisado a fondo cómo la suspensión de ratas con las extremidades posteriores levantadas disminuye la capacidad de vasoconstricción de los vasos de resistencia. Cuando las células del músculo liso en la regiones dependientes del estiramiento crónico por los gradientes de presión hidrostática inducida por la gravedad, la capacidad de vasoconstricción



disminuye. Además, la actividad adrenérgica perivascular y las fibras nerviosas peptidérgicas del músculo de las arterias y arteriolas de las extremidades posteriores disminuyeron durante la suspensión por la cola. Estas observaciones indican que las células del músculo liso arterial y la inervación perivascular y peptidérgica son sensibles a los cambios en las presiones transmuralas locales, y que a largo plazo en ingravidez podría atenuar la respuesta contráctil en los vasos de resistencia arteriolar.<sup>35</sup> En el caso de los seres humanos es dudoso, ya que se ha demostrado que la respuesta vasoconstrictora local en el tejido subcutáneo de las extremidades inferiores no se atenúa de inmediato después del aterrizaje de los vuelos espaciales de 4 a 6 meses. Sin embargo, esto no excluye que la sensibilidad vascular a la actividad nerviosa simpática esté atenuada.<sup>36</sup>

Otra de las posibilidades que expliquen la disminución de las RVS es el hecho de la distensión de las cavidades cardíacas que podrían inducir un estado crónico de aumentada liberación de péptidos natriuréticos (auricular y cerebral) y péptidos vasodilatadores, los cuales podrían volver a dilatar los vasos de resistencia arterial. Si es así, esta dilatación podría ser la causa de la pequeña disminución de la PAD estimulando la función nerviosa simpática.<sup>37</sup> Según esta hipótesis, existe una constante competencia entre la vasoconstricción inducida por el sistema nervioso simpático y la vasodilatación provocada por péptidos natriuréticos y vasodilatadores (Figura 10.5). La debilidad de esta hipótesis es que no hay evidencia actual de un aumento en los niveles plasmáticos de péptidos natriuréticos o péptidos vasodilatadores en vuelos espaciales, incluso, se ha demostrado



**Figura 10.5.** Hipótesis que trata de explicar cómo puede ocurrir la disminución de la RVS simultáneamente con un aumento de la actividad nerviosa simpática en un astronauta en posición vertical sentado en un sillón en ambiente de microgravedad. (RVS, resistencia vascular sistémica; SNA, sistema nervioso autónomo.)

que la concentración de péptido natriurético auricular se redujo después de algunos días en el espacio hasta en un 50 % con respecto a la posición supina aguda en tierra.<sup>37</sup>

De igual forma, en un estudio reciente no hubo diferencia en cuanto a niveles de catecolaminas a nivel plasmático y urinario entre antes, durante y después de un vuelo espacial.<sup>28</sup>

## Adaptaciones tardías

### Atrofia cardiaca

Después de algún tiempo en el espacio el corazón se atrofia como adaptación fisiológica a la disminución de la carga de trabajo del miocardio en condiciones de microgravedad.

La masa del ventrículo izquierdo (VI) ha sido determinada por resonancia magnética (RM) en cuatro astronautas antes y después del vuelo. Al cabo de 10 días en microgravedad la masa del VI disminuyó de  $183 \pm 7$  gramos (prevuelo), a  $160 \pm 5$  g (posvuelo).<sup>38</sup>

Perhonen y colaboradores realizaron un estudio en hombres sedentarios expuestos a reposo en cama horizontal inclinada por 6 semanas ( $n=55$ ) y, 12 semanas ( $n=53$ ). Se midieron por medio de RM las masas del ventrículo derecho (VD) y del ventrículo izquierdo, además del volumen telediastólico a las 2, 6, y 12 semanas de reposo en cama. Durante el reposo en cama la masa del VI disminuyó de  $8.0 \pm 2\%$  ( $p = 0.005$ ) después de 6 semanas con una atrofia adicional de  $7.6 \pm 2.3\%$  en los sujetos que permanecieron en cama durante 12 semanas. La media del grosor de la pared del VI disminuyó  $4 \pm 2.5\%$  ( $p = 0.002$ ) después de reposo de 6 semanas, sugiriendo una remodelación fisiológica con respecto a la carga alterada. Así también, después de 6 semanas la masa de la pared libre disminuyó de  $10 \pm 2.7\%$  ( $p = 0.06$ ), y el volumen telediastólico en un  $16 \pm 2.7\%$  ( $p = 0.06$ ).<sup>39</sup>

Hasta el momento no se sabe si la pérdida de masa muscular cardiaca durante un vuelo espacial es debida a cambios en las células musculares (disminución de las síntesis de proteínas o, incluso, apoptosis), tejido conectivo o ambos.<sup>40</sup>

### Arritmias cardiacas

Los primeros reportes de arritmias ventriculares durante los vuelos espaciales se hicieron durante la era del Apolo (1961 a 1972). Durante las 15 misiones del Apolo el astronauta James Benson Irwin tuvo bigeminismo por contracciones prematuras ventriculares.<sup>41</sup> Las arritmias comúnmente observadas en el espacio son: complejos prematuros ventriculares o supraventriculares, arritmias nodales y trastornos de la conducción aurículo-ventricular.<sup>41,42</sup>

Algunos estudios han informado de prolongación del QTc durante vuelos de larga duración a bordo de la estación espacial Mir y de la EEI. Después de un vuelo de larga duración, 24 % de los QTc fueron mayores de 0.450 segundos, lo que indica que el proceso de repolarización ventricular pueda estar alterado durante un vuelo de larga duración.<sup>43</sup>

La detección de la alternancia en microvolts de la onda T (AMOT) es un método de análisis electrocardiográfico reciente, no invasivo, que evalúa el proceso de repolarización cardiaca, lo que ayuda a predecir muerte súbita. Un estudio reveló que la AMOT aumentó significativamente de 17 a 42 % durante una prueba de 9 a 16 días en sujetos en cama inclinada. Los sujetos

que resultaron con alternancia de la onda T tuvieron un incremento de la respuesta simpática ( $p = 0.03$ ), además de una tendencia hacia una mayor excreción de potasio. Por otro lado, otra investigación no encontró ningún cambio en el QTc después de 90 días de reposo en cama inclinada.<sup>44</sup>

Existen varias hipótesis etiopatogénicas: la deficiencia de potasio, o magnesio, también se ha sugerido el papel de las catecolaminas, aunque ninguna se ha demostrado.<sup>43,44</sup>

## Retorno a la gravedad: intolerancia ortostática

La intolerancia ortostática (IO) es un problema común posvuelo. Se ha reportado con una incidencia de 9 hasta 64 % después de un vuelo espacial. A pesar de que la IO suele desaparecer rápidamente, el proceso de adaptación tras el retorno a tierra puede tomar varias semanas.<sup>45</sup>

Los diferentes síntomas que afectan a los tripulantes después de un viaje espacial al reingresar a tierra son principalmente mareos, aumento de la FC, palpitaciones, incapacidad para ponerse de pie (intolerancia ortostática) y signos presincoales.

La IO está presente cuando el cambio de posición provoca una inadecuada compensación neurohumoral, lo que ocasiona un volumen de llenado y volumen sistólico bajos, no logrando mantener una adecuada presión de perfusión cerebral en posición vertical (Figura 10.6).<sup>46</sup>

Los siguientes mecanismos han sido sugeridos como causa de IO: hipovolemia, incremento de la distensibilidad (*compliance*) vascular, alteraciones de la resistencia arterial, alteraciones del retorno venoso y atrofia cardíaca. La explicación más probable de la IO es una combinación de la afectación de la reserva simpática con una capacidad de respuesta al estrés ortostático deficiente.<sup>47</sup>

Evidencia reciente recabada de estudios en humanos en reposo en cama inclinada y después del vuelo, indican que una inadecuada respuesta vasoconstrictora es un factor importante en la IO.<sup>48</sup> Blomqvist ha propuesto que la degradación de mecanismos neurohumorales vasoconstrictores puede ocurrir a uno o más niveles, ya sea a nivel de los impulsos aferentes, eferentes o, de integración central.<sup>49</sup>

Convertino ha ofrecido otra explicación probable que una menor reserva vasoconstrictora. Parece que hay una reserva vasoconstrictora máxima que no se altera por la adaptación a la microgravedad, pero la reducción en el volumen sanguíneo central debido a la microgravedad puede causar una mayor vasoconstricción y reducir la reserva para un aumento adicional en la RVS. La vasoconstricción elevada asociada con un bajo volumen vascular y, aun bajo volumen sistólico, disminuye la capacidad de amortiguar la hipotensión ortostática. Este efecto puede estar relacionado con una respuesta barorrefleja simpática atenuada tras la exposición a la microgravedad.<sup>50</sup>

Fritsch encontró un deterioro de la respuesta barorrefleja tras el regreso de una misión espacial de 5 días. Se documentó una reducción significativa de la estimulación cardíaca vagal. También describió una relación entre el aumento de la PAS en reposo y al ponerse de pie después de un vuelo espacial. La respuesta disminuida de los barorreceptores persistió durante el periodo de recolección de datos (8 a 10 días). Más tarde se mostró evidencia adicional donde la modulación vagal de la FC y el incremento del control simpático de la FC retornaron de 8 a 14 días después de la misión. En consecuencia, el equilibrio simpático fue mayor después de los vuelos espaciales, indicando un predominio simpático en el control de la FC al cambiar de posición de reposo.<sup>51</sup> Cooke confirmó estos hallazgos y mostró una disminución del flujo eferente vagal cardíaco, en combinación con la reducción de la actividad barorrefleja. Estos cambios persistieron durante al menos 2 semanas después del retorno a la Tierra.<sup>52</sup>



**Figura 10.6.** Retorno a la Tierra de la tripulación de la Estación Espacial Internacional (los cosmonautas Pável Vinográdov, Alexander Misurkin y el astronauta Christopher Cassidy). Obsérvese que se encuentran sentados y requieren de apoyo para trasladarse, esto secundario al reacondicionamiento cardíaco que sufren al regresar a gravedad 1.

## Conclusión

El ser humano ha demostrado una gran capacidad de adaptarse a su medio, y un ambiente de microgravedad no es la excepción. Existen diferentes adaptaciones fisiológicas durante un vuelo espacial, pero sin duda, la de mayor relevancia y mejor estudiada es la adaptación del SCV.

Esta adaptación inicia desde los primeros minutos en microgravedad y se mantiene hasta el final de la misión espacial como lo son la redistribución de líquidos, el aumento del VS, GC, y disminución de la PAS, PAD, PAM, otros aparecerán tardíamente y de igual forma persistirán hasta el último día en microgravedad. Estos mecanismos de reacción pueden ser apropiados durante el desarrollo de un vuelo en condiciones de microgravedad, pero son inapropiados al momento del retorno al ambiente terrestre. Por lo tanto, lo que en la Tierra se considera patológico, fisiológicamente hablando, en el espacio es normal.

# Referencias

1. West JB. Physiology in microgravity. *J Appl Physiol.* 2000;89(1):379-84.
2. Carrillo ER, Diaz PMJA, Peña PCA, Flores ROI, Ortiz TA, Cortés AO, et al. Efectos fisiológicos en un ambiente de microgravedad. *Rev Fac Med UNAM.* 2015;58(3):13-24.
3. Aubert AE, Beckers F, Verheyden B. Cardiovascular function and basics of physiology in microgravity. *Acta Cardiol.* 2005;60(2):129-51.
4. Norsk P, Damgaard M, Petersen L, Gybel M, Pump B, Gabrielsen A, et al. Vasorelaxation in space. *Hypertension.* 2006;47:69-73.
5. Christensen NJ, Drummer C, Norsk P. Renal and sympathoadrenal responses in space. *Am J Kidney Dis.* 2001;38(3):679-83.
6. Hughson RL. Recent findings in cardiovascular physiology whit space travel. *Respir Physiol Neurobiol.* 2009;169(1):38-41.
7. Buckley JC, Gaffney FA, Lane LD, Levine BD, Watenpaugh DE, Blomqvist CG. Central venous pressure in space. *N Engl J Med.* 1993;328(25):1853-54.
8. Buckley JC Jr, Gaffney FA, Lane LD, Levine BD, Watenpaugh DE, Wright SJ, et al. Central venous pressure in space. *J Appl Physiol.* 1996;81:19-25.
9. Foldager N, Andersen TA, Jessen FB, Ellegaard P, Stadeager C, Videbaek R, et al. Central venous pressure in humans during microgravity. *J Appl Physiol.* 1996;81(1):408-12.
10. Videbaek R, Norsk P. Atrial distension in humans during microgravity induced by parabolic flights. *J Appl Physiol.* 1997;83(6):1862-66.
11. Premkumar K, Lee P. Gravitational effects on the cardiovascular system. Manual for instructors: Gravitational effects on the cardiovascular system. 2009;5:2-21.
12. Arbeille P, Fomina G, Roumy J, Alferova I, Tobal N, Herault S. Adaptation of the left heart, cerebral and femoral arteries, and jugular and femoral veins during short- and long-term head-down tilt and spaceflights. *Eur J Appl Physiol.* 2001;86(2):157-68.
13. Martina H, Marinos E, Patrick R. Energy and fluid metabolism in microgravity. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care.* 2001;4(4):307-11.
14. Prisk GK. Microgravity and the respiratory system. *Eur Respir J.* 2014;43(5):1459-71.
15. Norsk P, Christensen NJ, Bie P, Gabrielsen A, Heer M, Drummer C. Unexpected renal responses in space. *Lancet.* 2000;356(9241):1577-78.
16. Drummer C, Gerzer R, Baisch F, Heer M. Body fluid regulation in micro-gravity differs from that on Earth: an overview. *Pflugers Arch.* 2000;441(2):66-72.
17. Drummer C, Hesse C, Baisch F, Norsk P, Elmann-Larsen B, Gerzer R, et al. Water and sodium balances and their relation to body mass changes in microgravity. *Eur J Clin Invest.* 2000;30(12):1066-75.
18. Leach CS, Alfrey CP, Suki WN, Leonard JJ, Rambaut PC, Inners LD, et al. Regulation of body fluid compartments during short-term spaceflight. *J Appl Physiol.* 1996;81(1):105-16.
19. Drummer C, Norsk P, Heer M. Water and sodium balance in space. *Am J Kidney Dis.* 2001;38(3):684-90.
20. Kramer HJ, Heer M, Cirillo M, De Santo NG. Renal hemodynamics in space. *Am J Kidney Dis.* 2001;38(3):675-8.
21. Drummer C, Cirillo M, De Santo NG. History of fluid balance and kidney function in space. *J Nephrol.* 2004;17(1):180-6.
22. Drummer C, Valenti G, Cirillo M, Perna A, Bellini L, Nenov V, et al. Vasopressin, hypercalciuria and aquaporin—the key elements for impaired renal water handling in astronauts? *Nephron.* 2002;92(3):503-14.
23. Petersen LG, Damgaard M, Petersen JC, Norsk P. Mechanisms of increase in cardiac output during acute weightlessness in humans. *J Appl Physiol.* 2011;111:407-11.
24. Fritsch-Yelle JM, Charles JB, Jones MM, Wood ML. Microgravity decreases heart rate and arterial pressure in humans. *J Appl Physiol.* 1996;80:910-4.
25. Herault S, Fomina G, Alferova I, Kotovskaya A, Poliakov V, Arbeille P. Cardiac, arterial and venous adaptation to weightlessness during 6-month MIR spaceflights with and without thigh cuffs (bracelets). *Eur J Appl Physiol.* 2000;81:384-90.
26. Hughson RL, Shoemaker JH, Blaber AP, Arbeille P, Greaves DK, Pereira-Junior PP, et al. Cardiovascular regulation during long-duration spaceflights to the International Space Station. *J Appl Physiol.* 2012;112:719-27.
27. Norsk P, Asmar A, Damgaard M, Christensen NJ. Fluid shifts, vasodilatation and ambulatory blood pressure reduction during long duration spaceflight. *J Physiol.* 2015;593(3):573-84.
28. Pump B, Kamo T, Gabrielsen A, Bie P, Christensen NJ, Norsk P. Central volume expansion is pivotal for sustained decrease in heart rate during seated to supine posture change. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2001;281:1274-79.
29. Norsk P. Blood pressure regulation IV: adaptive responses to weightlessness. *Eur J Appl Physiol.* 2014;114:481-97.
30. De Bold AJ. Thirty years of research on atrial natriuretic factor: historical background and emerging concepts. *Can J Physiol Pharmacol.* 2011;89:527-31.
31. Gabrielsen A, Norsk P. Effect of spaceflight on the subcutaneous venoarteriolar reflex in the human lower leg. *J Appl Physiol.* 2007;103:959-62.
32. Verheyden B, Liu J, Beckers F, Aubert AE. Operational point of neural cardiovascular regulation in humans up to 6 months in space. *J Appl Physiol.* 2010;108:646-54.
33. Norsk P, Christensen NJ. The paradox of systemic vasodilatation and sympathetic nervous stimulation in space. *Respiratory Physiology & Neurobiology.* 2009;169:26-9.
34. Ertl AC, Diedrich A, Biaggioni I, Levine BD, Robertson RM, Cox JF, et al. Human muscle sympathetic nerve activity and plasma noradrenaline kinetics in space. *J Physiol.* 2002;538(Pt 1): 321-9.

35. Zhang LF. Vascular adaptation to microgravity: what have we learned? *J Appl Physiol.* 2001;91:2415–30.
36. Watenpaugh DE, Buckley JC, Lane LD, Gaffney FA, Levine BD, Moore WE, et al. Effects of spaceflight on human calf hemodynamics. *J Appl Physiol.* 2001;90:1552–58.
37. Hughson RL, Shoemaker JK. Vascular health in space. *J Gravit Physiol.* 2004;11(2):71–4.
38. Blaber E, Marcal H, Burns BP. Bioastronautics: the influence of microgravity on astronaut health. *Astrobiology.* 2010;10(5):463–73.
39. Perhonen MA, Franco F, Lane LD, Buckley JC, Blomqvist CG, Zerwekh JE, et al. Cardiac atrophy after bed rest and spaceflight. *J Appl Physiol* 2001;91(2):645–53.
40. Zhong GH, Ling SK, Li YX. Mechanism of cardiac atrophy under weightlessness/simulated weightlessness. *Sheng Li Xue Bao.* 2016;25;68(2):194–200.
41. Lees JP. Cardiology in space. *Hell J Cardiol.* 2005;46:320–3.
42. Anzai T, Frey MA, Nogami A. Cardiac arrhythmias during long-duration spaceflights. *Journal of Arrhythmia.* 2014;30:139–49.
43. D'Aunno DS, Dougherty AH, DeBlock HF, Meck JV. Effect of short- and long-duration spaceflight on QTc intervals in healthy astronauts. *The American Journal of Cardiology.* 2003;91(4):494–7.
44. Grenon SM, Xiao X, Hurwitz S, Ramsdell CD, Sheynberg N, Kim C, et al. Simulated microgravity induces microvolt T wave. *Ann Noninvasive Electrocardiol.* 2005;10(3):363–70.
45. Beckers F, Verheyden B, Aubert AE. Evolution of heart rate variability before, during and after spaceflight. *J Gravit Phys.* 2003;10:107–8.
46. Spaak J, Sundblad P, Linnarsson D. Impaired pressor response after spaceflight and bed rest: evidence for cardiovascular dysfunction. *Eur J Appl Physiol.* 2001;85:49–55.
47. Antonutto G, di Prampero PE. Cardiovascular deconditioning in microgravity: some possible countermeasures. *Eur J Appl Physiol.* 2003;90:283–91.
48. Zhang LF. Vascular adaptation to microgravity: what have we learned? *Appl Physiol.* 2001;91:2415–30.
49. Blomqvist CG, Buckley JC, Gaffney FA, Lane LD, Levine BD, Watenpaugh DE. Mechanisms of postflight orthostatic intolerance. *J Gravit Physiol.* 1994;1:122–4.
50. Convertino VA, Polet JL, Engelke KA, Hoffer GW, Lane LD, Blomqvist CG. Evidence for increased b-adrenoreceptor responsiveness induced by 14 days simulated microgravity in humans. *Am J Physiol Regulatory Integrative Comp-Physiol.* 1997;273:93–9.
51. Fritsch-Yelle JM, Whitson PA, Bondar RL, Brown TE. Subnormal norepinephrine release relates to presyncope in astronauts after spaceflight. *J Appl Physiol.* 1996;81:2134–41.
52. Cooke WH, Ames JE, Crossman AA, Cox JF, Kuusela TA, Tahvanainen KU, et al. Nine months in space: effects on human autonomic cardiovascular regulation. *J Appl Physiol.* 2000;89:1039–45.



# 11. Sistema neurológico y vestibular

Ángel Augusto Pérez Calatayud

## ■ Introducción

La exposición a la microgravedad y el viaje espacial producen cambios neurológicos graves que incluyen ataxia, alteraciones posturales, ilusiones perceptuales, debilidad neuromuscular y fatiga. Estas alteraciones ponen en peligro la salud del astronauta durante el viaje espacial y también dificultan su readaptación terrestre a su regreso. Un mejor entendimiento de los mecanismos por los cuales la microgravedad afecta de manera diversa al sistema nervioso central y la creación de tratamientos más efectivos, proveerá una estancia en el espacio más sana y prolongada lo cual es de gran importancia para las misiones a la estación espacial y a Marte.

## Efecto de la microgravedad en neurotransmisores

Neurolab es un experimento diseñado para investigar cómo se adapta el sistema nervioso a las condiciones de microgravedad. Esta es la primera misión de la NASA especializada en el estudio del sistema nervioso en el espacio. Se sabe que la ingravidez produce una atrofia de los músculos antigravitatorios pero se desconoce en qué medida estas alteraciones afectan a la corteza cerebral.

Los resultados obtenidos con las ratas que estuvieron en la nave se han comparado con los obtenidos en las ratas controles que permanecieron en tierra.

La corteza cerebral contiene una gran variedad de tipos celulares, los cuales pueden reducirse a dos clases fundamentales: células piramidales y células no piramidales. Las células piramidales son las principales neuronas de proyección de la corteza cerebral, son excitadoras y utilizan el ácido glutámico como neurotransmisor. Las células no piramidales se caracterizan porque su axón permanece dentro de la corteza (interneuronas). La mayoría de las interneuronas son inhibitorias y utilizan el GABA como neurotransmisor (gabaérgicas). Sin embargo, existe un gran número de posibles neurotransmisores y neuropéptidos activos los cuales se encuentran en subpoblaciones específicas de neuronas gabaérgicas. Las interneuronas gabaérgicas controlan la actividad de las células piramidales y también tienen una función muy importante en la plasticidad de la corteza cerebral como respuesta a la modificación de los estímulos sensoriales. Por otra parte, las neuronas de la corteza cerebral están fuertemente conectadas entre sí formando circuitos sinápticos de gran complejidad, cuyas conexiones se establecen principalmente durante el desarrollo posnatal (en la rata la maduración de las conexiones sinápticas y expresión definitiva de neurotransmisores termina alrededor del mes y medio posnatal). Si



durante este periodo los circuitos no se establecen correctamente, el procesamiento de información cortical también se ve afectado, lo que da lugar a una serie de graves alteraciones neurológicas y psiquiátricas. También, se sabe que si el cerebro se expone a estímulos anormales, éste no se desarrolla normalmente y, puesto que el sistema nervioso está diseñado para funcionar en el campo gravitatorio terrestre, entonces una pregunta fundamental es si los circuitos sinápticos se desarrollan normalmente en ausencia de gravedad.

Experimentos realizados en la Tierra indican que la gravedad tiene un papel muy importante en el aprendizaje de ciertas habilidades motoras como la de andar. Por tanto, es fundamental determinar si la ausencia de gravedad puede afectar al sistema nervioso motor de los tripulantes que pasarán varios años en el espacio o, en un futuro más lejano, para conocer cómo afectaría la ausencia de gravedad a los individuos que nunca hayan andado en la Tierra (en el caso de un niño que nazca en el espacio). Por estos motivos son los estudios realizados hasta el momento en el efecto del vuelo espacial sobre la población de neuronas gabaérgicas y circuitos sinápticos en el área HL de la corteza somatosensorial, mediante la utilización de métodos inmunocitoquímicos y de microscopía electrónica. Uno de los resultados más interesantes obtenidos es que el vuelo espacial afecta selectivamente a una subpoblación de neuronas gabaérgicas que expresan el neuropéptido somatostatina, disminuyendo el número de estas neuronas. La importancia de este hallazgo es que la somatostatina, además de ser una sustancia neuroactiva, actúa como factor neurotrófico durante el desarrollo del cerebro y, por tanto, la disminución de una población de neuronas que expresan esta sustancia puede tener consecuencias negativas en el desarrollo normal del cerebro. A nivel ultraestructural existe un incremento en la longitud de los contactos sinápticos y una reducción en el número de sinapsis en ciertas capas corticales de las ratas que estuvieron en el espacio. Aún se desconoce el significado funcional de estos cambios, pero podrían representar el sustrato anatómico de las alteraciones sensorimotoras que padecen las ratas que viajaron al espacio. Por último, en el momento actual se analiza si estos cambios son permanentes o transitorios.

## **Efectos neurológicos de la microgravedad**

### **Sistema vestibular**

La exposición a un ambiente privado de gravedad repercute notablemente en el sistema neurovestibular, regulador de la orientación y del equilibrio. Su disfunción genera los síntomas propios de la cinetosis espacial. Afecta entre 40 a 50 % de los tripulantes. Su incidencia sería aún más elevada de no recurrir un buen número de tripulantes a la administración de medicación anticinetósica. A diferencia de la cinetosis terrestre, la cinetosis espacial se caracteriza por los síntomas siguientes: malestar general, anorexia, letargia y cefalea. La actividad fuera del vehículo espacial no genera nuevos síntomas.

En relación con la cinetosis, parece existir una predisposición individual e incluso, en cada individuo acontecen modificaciones de la susceptibilidad en el curso de su vida astronáutica. Los síntomas aparecen justo después de producirse el ingreso en órbita y se agravan con los cambios de posición cefálica y con los movimientos del cuerpo. En general desaparecen en el transcurso de 2 a 4 días. La susceptibilidad a la cinetosis se mantiene por algún tiempo durante la fase de

posvuelo (*post* vuelo). Los tripulantes del Skylab tardaron una media de 10 días en recuperar la estabilidad postural.<sup>1</sup>

Existen varias teorías para explicar el origen de la cinetosis:

- a) conflicto sensorial: se produce un desbalance entre los datos proporcionados por los otolitos, los canales semicirculares, la información visual y la originada a nivel de los sensores-receptores de la piel y propioceptores articulares
- b) redistribución de los líquidos orgánicos originada por la ausencia de gravedad: modifica las condiciones de la endolinfa en el órgano estato-acústico
- c) asimetría de los otolitos: en ciertos individuos existe un desequilibrio en la función de los otolitos de cada oído, compensado a nivel central en ambiente de gravedad; la ausencia de gravedad descompensa este equilibrio hasta que los centros compensatorios centrales restablecen de nuevo el equilibrio de los otolitos

## Respuestas sensoriales

*Sentido del oído:* no se han registrado cambios en los niveles de audición durante los exámenes posvuelo.

*Sentido de la vista:* en ambiente espacial la visión experimenta cambios subjetivos.

1. La ausencia del filtrado atmosférico determina que la luz se perciba con más brillantez
2. Las áreas no iluminadas directamente por la luz solar, aparecen como más oscuras
3. La presión intraocular se encuentra discretamente disminuida de forma transitoria en el posvuelo

*Ilusiones cenestésicas:* se trata del fenómeno de la oscilopsia. El astronauta cree que los objetos se mueven cuando realiza movimientos pasivos o voluntarios de la cabeza. Durante la reentrada a la atmósfera, e inmediatamente después del aterrizaje, los astronautas perciben que los movimientos de la cabeza originan la ilusión de automovimiento y la ilusión de movimiento del entorno (oscilopsia). Este fenómeno es debido al reajuste compensatorio de los movimientos oculares a un ambiente de microgravedad; cuando el astronauta regresa al ambiente de gravedad se produce un nuevo reajuste.<sup>2</sup>

## Equilibrio postural

La ausencia de peso (gravedad) origina modificaciones propioceptivas. Los órganos sensoriales reinterpretan la realidad circundante. El reajuste al regresar a la Tierra produce diversas respuestas adaptativas: a) sensación de giro cuando el astronauta trata de deambular de frente; b) inestabilidad; c) sensación de desplazamiento lateral al andar de frente, como si una mano gigantesca empujase lateralmente; d) los movimientos de la cabeza y cuello al andar, se perciben como de mayor amplitud, exagerados; e) al mantener la vertical, se puede sentir la sensación de estar vencido hacia delante. Se trata de respuestas que reflejan la incongruencia suscitada en los órganos sensoriales y en el aparato neuromuscular por la situación de ausencia de gravedad.

## **Autorregulación cerebral antes, durante y después de un viaje espacial**

La exposición a la microgravedad altera la distribución de los líquidos corporales y el grado de distensión de las vasos sanguíneos craneales, y estos cambios pueden ocasionar remodelamiento estructural y alterar la autorregulación cerebral.

Alteraciones en la autorregulación cerebral han sido documentadas en condiciones de simulación de microgravedad en humanos mediante el reposo en cama cabeza abajo y se ha propuesto como mecanismo responsable de la intolerancia ortostática, posterior al vuelo espacial. Los estudios realizados hasta el momento demuestran que la autorregulación cerebral está no solamente preservada sino que es posible que se encuentre mejorada durante un vuelo espacial de corta duración.

En tierra la fuerza de gravedad produce un vector gravitacional que fuerza a la sangre y otros líquidos a dirigirse hacia los pies en bipedestación. Esto genera un gradiente de presión a través del cuerpo que la presión media de 100 mm Hg a nivel de corazón se traduce en aproximadamente 200 mm Hg a nivel de pies y de 70 mm Hg a nivel cerebral.<sup>3</sup> En el espacio, el gradiente de presión inducido por gravedad es eliminado y la presión se ecualiza de manera efectiva reduciendo la presión de los miembros inferiores y aumentando la presión a nivel cerebral.<sup>3</sup> A esto se agrega que la exposición a la microgravedad ocasiona cambios de los líquidos cefálicos<sup>4</sup> que podrían contribuir al incremento de la presión intracraneana (PIC). A pesar de que el líquido extracelular y el volumen plasmático disminuyen en microgravedad, el cambio de líquido hacia la parte superior del cuerpo lleva a un aumento de volumen intracelular e intersticial,<sup>5</sup> y la ausencia de gradientes hidrostáticos puede incrementar la permeabilidad de la barrera hematoencefálica.<sup>5</sup> El aumento de la filtración del cerebro se predice cuando los gradientes hidrostáticos inducidos por la gravedad son removidos y el espacio entre las células endoteliales se incrementa.<sup>5,6</sup>

El vuelo espacial induce cambios en el líquido cefalorraquídeo que puede ocasionar un aumento en la PIC, en la presión del líquido cerebrospinal, presión intraocular (PIO), síndrome de adaptación espacial y pérdida de la agudeza visual.<sup>7</sup>

La PIO se encuentra incrementada en el inicio durante la exposición a microgravedad simulada y disminuye con la exposición prolongada a este ambiente simulado,<sup>8</sup> sin embargo, en contraste con los vuelos espaciales, los datos de astronautas que permanecieron durante más de 30 días en el espacio presentaron un incremento de la PIO de hasta 1 mm Hg.<sup>9</sup> Existen reportes de desarrollo de edema de papila, pliegues coroideos, aplanamiento del globo posterior e hipermetropía en los astronautas con misiones de más de 30 días en el espacio.<sup>10,11</sup> En un pequeño grupo de estos astronautas la elevación de la presión del líquido espinal fue confirmada por punción lumbar lo que indica el incremento de la PIC.<sup>10,11</sup>

Aún se conoce poco de si el aumento de la PIC tiene implicaciones de remodelamiento cerebrovascular o altera la regulación del flujo sanguíneo cerebral. Sin embargo la evidencia actual sugiere que la autorregulación cerebral puede encontrarse alterada en algunos astronautas lo que aumenta la susceptibilidad de síncope al regreso a la Tierra.<sup>12,13</sup> Existen pocos trabajos que hayan examinado los efectos del vuelo espacial en la regulación del flujo sanguíneo cerebral. Con el uso del doppler transcraneal, Bagian y Hackett<sup>14</sup> demostraron que no existen cambios en la velocidad de flujo sanguíneo cerebral (VFSC) durante el vuelo espacial, los datos obtenidos durante la misión Neurolab (STS-70) acerca del comportamiento de la VFSC, muestran resultados similares al respecto.<sup>15</sup> En contraste, el trabajo de Arbeille<sup>16</sup> demostró un incremento inicial de la VFSC con retorno a niveles basales prevuelo después de 1 semana a 3 meses en el espacio. Este incremento

en la VFSC se acompañó de un incremento en el flujo sanguíneo carotídeo, lo que sugiere un incremento en el FSC al inicio del vuelo espacial y de igual forma regresa a velocidades basales a la semana de permanencia en el espacio.

Estudios recientes han estudiado los efectos de la autorregulación cerebral durante el vuelo espacial, y se ha concluido que existen alteraciones de ésta durante el aterrizaje, lo que tiene como consecuencia que los astronautas no logren completar la prueba de 10 minutos en bipedestación demostrando intolerancia ortostática.<sup>13</sup> Zuj<sup>12</sup> estudió la prueba de reactividad al CO<sub>2</sub> en la regulación del flujo sanguíneo cerebral encontrando también alteraciones en la autorregulación y en la respuesta a la vasorreactividad al CO<sub>2</sub> durante el vuelo espacial. Se desconoce si esto podría tener también efecto en la intolerancia ortostática que presenta el astronauta al regresar a la Tierra.

Aún se desconocen los mecanismos que contribuyen a la pérdida de la autorregulación cerebrovascular, un mecanismo propuesto es por reducción del control simpático, sin embargo se especula que esto puede deberse también a la respuesta de la vasculatura cerebral por cambios en la PIC.<sup>17</sup>

Tenemos poco conocimiento de la hemodinámica cerebrovascular durante las misiones espaciales, sabemos que ésta juega un papel crucial en la regulación del flujo sanguíneo cerebral. Las alteraciones en la autorregulación cerebral y los cambios en la PIC durante las misiones espaciales podrían tener consecuencias que aún desconocemos en la estructura y función cerebral.

## Disfunción cognitiva en el espacio

Existen cuatro rutas de evolución cognitiva: la construcción filogenética, en la cual la selección natural produce cambios cualitativos en la forma en la que los mecanismos cognitivos operan (lenguaje). Inflexión filogenética, en la cual la selección natural sesga o desvía la entrada a un mecanismo cognitivo (memoria espacial); construcción ontogenética, en la cual la selección de desarrollo altera la manera en la que un mecanismo cognitivo opera (reconocimiento de caras y la teoría de la mente), y la inflexión ontogenética, en la que el desarrollo de selección cambia hacia un mecanismo cognitivo (imitación). Este marco integra los hallazgos de la psicología evolucionista, en contraste con la psicología evolutiva humana nativa la cual reconoce el significado de la adaptación en el desarrollo de procesos, conserva la distinción entre mecanismos cognitivos y no cognitivos y engloba investigación en animales humanos y no humanos.<sup>18</sup>

La historia de los vuelos espaciales se encuentra repleta de problemas que van desde triviales a aquellos que ponen en peligro la vida. El personal de control de la misión en tierra y la tripulación se encuentra por necesidad en estado de alerta a la necesidad de resolver problemas relacionados con el estrés asociado con una misión espacial. Esto conlleva a un entrenamiento psicológico que va desde antes del despegue hasta la supervivencia al completar este tipo de misiones y la adaptación a la realidad terrestre a su regreso.

En la literatura científica encontramos diferentes definiciones de afrontamiento, algunos lo consideran una respuesta, un proceso o estrategia para..., sin embargo, la definición más cercana lo identifica como una respuesta que tiene como objetivo disminuir la disrupción psicológica de la homeostasis y los efectos psicológicos negativos causados por un desafío ambiental impuesto.<sup>18</sup>

Uno debe tomar en cuenta que también existen diferencias culturales entre los astronautas que impactan a nivel psicológico, psiquiátrico, interpersonal, cognitivo y organizacional en diferentes maneras (Cuadro 11.1).

## Cuadro 11.1.

### Factores de estrés en vuelos espaciales de larga duración

---

Demanda de trabajo  
Eventos y restos impredecibles  
Síndrome de adaptación espacial  
Alteraciones de la fotoperiodicidad, ritmo circadiano, cambio de turnos  
Preocupación psicológica por presencia de efectos adversos (radiación, cardíaco, hueso, músculo, etc.)  
Preocupación por falla en equipo  
Preocupación por accidentes  
Preocupación por rendimiento inadecuado  
Fatiga y alteración del sueño  
Aislamiento, lejanía, fenómeno de rompimiento  
Falta de información o malas noticias de casa (incluye eventos nacionales e internacionales así como personales)  
Falta de privacidad, espacio personal y territorio, hacinamiento  
Condiciones adversas dentro de la cápsula (contaminación, ruido, temperaturas elevadas, poder insuficiente, etc.)  
Discusiones y malos entendidos interpersonales con otros miembros de la tripulación, personal terrestre, etc.  
Aburrición, tiempo libre prolongado (ociosidad)

---

*Primero:* las diferencias en personalidades y el afrontamiento al estrés se presentan en cualquier tripulación, pero que es más complicado si esta es multicultural. Esto se debe a que algunas características de expresión emocional, puede ser común en algunas culturas pero inusual en otras.

*Segundo:* las manifestaciones de salud mental también pueden ser diferentes a lo largo de grupos culturales, por ejemplo, la depresión ocurre con ansiedad en astronautas estadounidenses pero se presenta con fatiga en los rusos.<sup>19</sup>

*Tercero:* los estilos cognitivos en conjunto con las normas de comportamiento individual en la toma de decisiones y la reacción personal en las expectativas de privacidad en ambientes confinados y hábitos de higiene personal también varían entre grupos culturales.

*Cuarto:* las normas de comportamiento también pueden afectar la tensión o la cohesión durante las misiones, por ejemplo, como se espera que se socialice durante la comida.<sup>20</sup>

El motivo de esta revisión es resaltar lo existente acerca de la función cognitiva en las misiones espaciales, desde el entrenamiento antes del despegue hasta la readaptación terrestre a su regreso.

La personalidad ideal para las misiones espaciales a corto y largo plazos.

Existen algunos estudios que proponen que es posible predecir antes de una misión, cómo se va a adaptar y comportar un individuo durante las misiones prolongadas, esto mediante análisis de personalidad y factores predictores de adaptación, en ambientes análogos al espacio.<sup>21</sup> Los hallazgos encontrados en estos estudios han mostrado que la personalidad asociada con un mejor rendimiento se caracteriza por la combinación de altos niveles de instrumentalidad y expresividad acompañado de un nivel bajo de agresividad interpersonal.<sup>22-24</sup>

Las investigaciones realizadas en estaciones en la Antártica (Figura 11.1) durante el invierno, sugieren que los candidatos ideales para misiones espaciales prolongadas muestran niveles bajos de neurosis, labilidad emocional, extraversión, conciencia y un deseo bajo de afecto.<sup>23</sup>



**Figura 11.1.**  
Ejemplos de estaciones de investigación especial en la Antártica.

Al momento de asignar una tripulación para misiones espaciales multinacionales, la comunicación y las habilidades interpersonales, la compatibilidad interpersonal y la competencia intercultural deben ser evaluadas de manera mandatoria, a pesar que las cuestiones políticas y de relaciones públicas siempre serán un factor contribuyente en el asignamiento de misiones multinacionales, éstas no deben detractar la importancia de la composición de la tripulación psicológicamente guiada.

## Monitoreo de la evolución psicológica en misiones espaciales

Durante misiones prolongadas dentro de órbita, la provisión de apoyo en vuelo a los miembros de la tripulación es una contramedida importante para estabilizar el estado emocional y asegurar un bienestar óptimo, además de mantener un contacto cercano entre la tripulación y la Tierra. Para este propósito se confía en métodos de comunicaciones espacio-tierra efectivos (transmisiones de audio y video) y en los vuelos de reabastecimiento. La limitada atención médica o de asesoramiento en el sitio enfatiza la necesidad de tener disponibilidad de una consulta de telemedicina o telepsicología precisa.

El apoyo a las familias de la tripulación durante una misión ayuda a éstos a mantenerse concentrados en los objetivos de la misión, aliviándolos de las consideraciones y sentimientos de responsabilidad de problemas en casa. Además las familias deberán ser entrenadas en la interacción de su familiar en el espacio y prepararlos para cualquier cambio cognitivo durante la misión como resultado de una crisis psicológica.

El trabajo de apoyo psicológico a los miembros de la tripulación y sus familiares no debe ser limitado a la fase de vuelo. La evidencia de situaciones similares (submarinos, Antártica) indican una incidencia persistente de problemas de reintegración familiar en periodos de ausencia prolongados.<sup>25,26</sup> La participación en misiones por tiempos prolongados podría tener efectos psicológicos similares en la tripulación y sus familiares, por lo que puede ser difícil reintegrarse a su vida normal.

## **Cuadro 11.2.**

### Aspectos ambientales positivos del vuelo espacial

#### **Ambiente externo**

---

Grandeza natural, vastedad, belleza del espacio  
Vista de la tierra  
Misterio  
Combinación de novedad y familiaridad

---

#### **Ambiente interno (cápsula)**

---

Refugio  
Familiaridad  
Eficiencia  
Confort, recreación, descanso  
Actividades improvisadas  
Tiempo libre

---

## **Cuadro 11.3.**

### Aspectos personales y sociales positivos del vuelo espacial

#### **Dinámica de la tripulación**

---

Pertenecer a un grupo de élite  
Cooperación grupal efectiva  
Objetivos superiores  
Interdependencia, ayuda mutua  
Camaradería  
Intimidad, amistad con los colegas

---

#### **Consecuencias al finalizar la misión**

---

Continuar el contacto grupal, amistad y orgullo  
Reunión con amigos y familiar fuera del programa espacial  
Confianza en sí mismo  
Nuevos valores y habilidades  
Respeto, admiración y aclamación del público  
"Derecho de fanfarronear"

---

## **Salud conductual y psiquiátrica**

En contraste con lo anterior, los problemas psiquiátricos se encargan de la respuesta a estas condiciones. En el individuo la genética, su constitución y el desarrollo de vulnerabilidades pueden contribuir a la presencia de dificultades psiquiátricas. Sin embargo los estresores operacionales en una misión (hacinamiento, presencia de peligro, microgravedad y radiación) así como los factores psicosociales (la tensión en la tripulación, cohesión, problemas de autoridad, diferencias de lenguaje y culturales) tienen un papel a considerar en las misiones.<sup>26,27</sup>

Los ambientes de confinamiento y aislamiento pueden tener cambios en personalidad positivos, de crecimiento personal y de génesis de salud (Cuadros 11.2 y 11.3).<sup>28-30</sup> Las personas que han experimentado ambientes de aislamiento como en el Polo Norte o en el espacio reportan sentimientos de mayor fuerza mental, independencia, ingenuidad, camaradería e incluso disminución de la tensión y la depresión. Algunos cosmonautas y astronautas han reportado experiencias trascendentales, religiosas y un mejor sentido de unidad con la raza humana como resultados de ver la Tierra y el Cosmos.<sup>31,32</sup>

## Problemas psiquiátricos en el espacio

Los problemas de salud mental afectan a todos los géneros y las culturas pero pueden manifestarse de diferente manera entre éstos. Las alteraciones psiquiátricas más reportadas son las reacciones de ajuste, que son respuestas anormales a estresores internos o externos, como la presencia de depresión clínica secundaria a la asolación sentida en órbita y la separación de la familia. También están reportadas las reacciones psicósomáticas, como dolor de dientes y sueños recurrentes de infecciones dentales que ocasionan cuadros de ansiedad. Los problemas psiquiátricos severos no son frecuentes (esquizofrenia, trastornos bipolares, etc.), ya son detectados durante las fases de entrenamiento pero han sido reportados en los aplicantes y en ambientes similares como en submarinos y las misiones a la Antártica.<sup>32</sup>

Los trastornos de personalidad después de una misión afectan frecuentemente a los cosmonautas, van desde cambios positivos, como se comentaron previamente, hasta los cambios negativos como son la ansiedad, depresión mayor y el abuso de sustancias y adicciones.<sup>33</sup>

Otra alteración reportada por los psicólogos espaciales rusos es la presencia de astenia, definida como una condición psiquiátrica con presencia de debilidad del sistema nervioso que resulta en fatiga, irritabilidad y labilidad emocional, dificultad de atención y concentración, percepción aumentada, palpitaciones, inestabilidad hemodinámica, debilidad física y problemas de sueño y apetito.<sup>34,35</sup> El síndrome es conocido como “neuroastenia” aunque su existencia es controversial y el sistema de diagnóstico psiquiátrico estadounidense no reconoce este síndrome, es aceptado en el sistema de diagnóstico internacional utilizado por Europa, Rusia y China.

El uso de fármacos psicotrópicos durante las misiones espaciales conforman parte del botiquín básico, con consideraciones de farmacocinética y farmacodinamia propias de los ambientes de microgravedad.

## Trastornos cognitivos

La falta de la fuerza gravitacional en el espacio ha mostrado afectar diferentes mecanismos cerebrales. Un efecto particularmente importante es la disrupción de la congruencia entre las señales vestibulares y otros receptores (visuales, táctiles, etc.) así como también del otolito vestibular y los receptores semicirculares causados por la alteración de otolitos sensitivos a gravedad. La microgravedad se relaciona también con cambios mecánicos y propioceptivos durante la ejecución de movimiento llevando a una disrupción de las relaciones entre señales aferentes y eferentes lo que ocasiona un estado de discordancia sensomotora.<sup>36</sup> Además de estos efectos, las condiciones de trabajo y hábitat en el espacio inducen estados de estrés en los astronautas que pueden llevar a la degradación del desempeño cognitivo y psicomotor. Estos estados de estrés se deben a la presencia de disminución del estado de alerta y fatiga, la gran carga laboral, el estrés emocional por tensión



interpersonal y los efectos del asilamiento y el confinamiento. La disminución del rendimiento en estos estados puede resultar en un cambio de patrón de activación psicológica a una región que no es óptima para el rendimiento eficiente, o a un desempeño compensador ajustado al acoplamiento con el estrés y la carga laboral aplicando una estrategia de menor esfuerzo.<sup>37</sup>

Las alteraciones de rendimiento ocasionado por estos cambios incluyen la pérdida de la precisión de los movimientos voluntarios, o un desaceleramiento de los cambios cinéticos durante la ejecución de estos movimientos en comparación a condiciones de gravedad 1.<sup>38-41</sup>

Existen pocos estudios que consideren el impacto de las misiones prologadas en el rendimiento cognitivo, psicomotor y perceptual. Durante una misión de 438 días a bordo del MIR se realizó el monitoreo del rendimiento de un cosmonauta ruso,<sup>39</sup> como resultado se vio una resistencia extraordinaria de las funciones cognitivas, motoras y perceptuales elementales al impacto de los estresores relacionados al vuelo espacial, aun durante misiones de larga duración. Ya que la adaptación del sistema sensorial y motor en ambientes de microgravedad inducidos se puede lograr en poco tiempo en el espacio, este decremento cognitivo está limitado a la fase temprana del vuelo.<sup>39</sup>

Aun así, el mantener la eficiencia de operaciones y habilidades complejas se ha convertido en un problema serio en las misiones. Un ejemplo reportado es el de Salinski<sup>40</sup> el cual investigó el nivel de rendimiento de cosmonautas en una maniobra de acoplamiento (unión de la nave a la estación) manual simulado durante su estancia en el espacio, encontró una pérdida considerable de la habilidad posterior a un periodo de 3 meses en el espacio, la cual fue atribuida a la falta de entrenamiento en órbita bajo condiciones de microgravedad.

Otra área de preocupación es el proceso cognitivo en la toma de decisiones durante misiones espaciales, en este rubro no se encuentran estudios publicados a la fecha.<sup>41,42</sup> Conforme las agencias espaciales del mundo preparan el primer viaje a Marte, existe una real preocupación con respecto al efecto de la exposición al espectro altamente energético de los rayos cósmicos y galácticos. Los estudios en modelos murinos han demostrado una gran sensibilidad de las neuronas maduras dentro del tejido cerebral a las partículas espaciales. La autonomía del astronauta durante un viaje espacial es crítico y amerita un manejo planeado a eventos no anticipados, actividades que podrían quedar comprometidas conforme estas partículas atraviesan el tejido cerebral. Las investigaciones en modelos murinos expuestos a radiación continua por 6 semanas presentaron disfunción cognitiva con cambios en el rendimiento de las funciones normadas por la corteza y el hipocampo. Se encontró un decremento de la complejidad dendrítica de la médula espinal así como de las neuronas de la corteza prefrontal la cual dicta nuestro comportamiento. Se encontró también un aumento de la densidad postsináptica de la proteína 95 (PSD-95) lo cual reveló alteraciones mayores inducidas por radiación en la integridad sináptica.<sup>43</sup>

En conclusión, los vuelos espaciales producen cambios estructurales en el cerebro en desarrollo. Sin embargo, no sabemos si las alteraciones de los circuitos corticales que hemos localizado son patológicas o si representan cambios plásticos permanentes para una mejor adaptación a un nuevo medio ambiente. Se debe considerar la sensibilidad del sistema nervioso central a la exposición a la radiación espacial, y tomar en cuenta que este daño a la estructura neuronal puede predisponer a los astronautas a decrementos en la función cognitiva y en el rendimiento en las funciones críticas durante una misión e incluso esperar una secuela neurocognitiva a largo plazo.

Con la evidencia actual con respecto a las alteraciones en la PIC que presentan los astronautas, aun meses después de su regreso de una misión, es imperativo que se caracteriza la adaptación intracraneana a la microgravedad y sus consecuencias al regreso a la Tierra.

# Referencias

1. Crampton GH (ed). Motion and space sickness. Boca Raton: CRC Press, 1990.
2. Clément G, Reschke MF. Neurosensory and sensory-motor functions. En: Moore D, Bie P, Oser H (ed). Biological and medical research in space: An overview of life sciences research in microgravity. Heidelberg: Springer-Verlag; 1996: Chapter 4, pp. 178-258.
3. Hargens AR, Watenpaugh DE. Cardiovascular adaptation to spaceflight. *Med Sci Sports Exercise*. 1996;28:977-82.
4. Frey MAB, Mader TH, Bagian JP, Charles JB, Meehan RT. Cerebral blood velocity and other cardiovascular responses to 2 days of head-down tilt. *J Appl Physiol*. 1993;74:319-25.
5. Leach CS, Alfrey CP, Suki WN, Leonard JI, Rambaut PC, Inners LD, et al. Regulation of body fluid compartments during short-term spaceflight. *J Appl Physiol*. 1996;81(1):105-16.
6. Lakin WD, Stevens SA, Penar PL. Modeling intracranial pressures in microgravity: the influence of the blood-brain barrier. *Aviat Space Environ Med*. 2007;78:932-6.
7. Polk JD (2009) "Flight surgeon perspective: Gaps in human health, performance, and safety," presentation to Committee of the Decadal Survey on Biological and Physical Sciences in Space, August. National Research Council, Washington, D.C., USA.
8. Chiquet C, Custaud MA, Le Traon AP, Millet C, Gharib C, Denis P. Changes in intraocular pressure during prolonged (7-day) head-down tilt bed rest. *J Glaucoma*. 2003;12:204-8.
9. NASA (2011) The Visual Impairment and Intracranial Pressure Summit Report.
10. Kramer LA, Sargsyan AE, Hasan KM, Polk JD, Hamilton DR. Orbital and intracranial effects of microgravity: findings at 3-TMR imaging. *Radiology*. 2012;263:819-27.
11. Mader TH, Gibson C, Pass AF, Kramer LA, Lee AG, Fogarty J, et al. Optic disc edema, globe flattening, choroidal folds, and hyperopic shifts observed in astronauts after long-duration space flight. *Ophthalmology*. 2011;118:2058-69.
12. Zuj KA, Arbeille P, Shoemaker JK, Blaber AP, Greaves DK, Xu D, et al. Impaired cerebrovascular autoregulation and reduced CO<sub>2</sub> reactivity after long duration spaceflight. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2012;302:H2592-98.
13. Blaber AP, Goswami N, Bondar RL, Kassam MS. Impairment of cerebral blood flow regulation in astronauts with orthostatic intolerance after flight. *Stroke*. 2011;42:1844-50.
14. Bagian JP, Hackett P. Cerebral blood flow comparison of ground-based and spaceflight data and correlation with space adaptation syndrome. *J Clin Pharmacol*. 1991;31:1036-40.
15. Iwasaki KI, Levine BD, Zhang R, Zuckerman JH, Pawelczyk JA, Diedrich A, et al. Human cerebral autoregulation before, during and after spaceflight. *J Physiol-London*. 2007;579:799-810.
16. Arbeille P, Fomina G, Roumy J, Alferova I, Tobal N, Herault S. Adaptation of the left heart, cerebral and femoral arteries, and jugular and femoral veins during short- and long-term head-down tilt and spaceflights. *Eur J Appl Physiol*. 2001;86:157-68.
17. Blaber AP, Zuj KA, Goswami N. Cerebrovascular autoregulation: lessons learned from spaceflight research. *Eur J Appl Physiol*. 2013;113(8):1909-17.
18. Heyes C. Four routes of cognitive evolution. *Psychological Review*. 2003;110(4):713-27.
19. Pearlin LI, Schooler C. The structure of coping. *Journal of Health and Social Behavior*. 1978;19:2-21.
20. Ritscher JB, Kanas N, Gushin VI, Saylor S. Cultural differences in patterns of mood states on board the International Space Station. *Acta Astronautica*. 2007;61:668-71.
21. Kozerenko OP, Gushin VI, Sled AD, Efimov VA, Pystinikova JM. Some problems of group interaction in prolonged space flights. *Human Performance in Extreme Environments*. 1999;4:123-7.
22. Sandal GM. Coping in Antarctica: is it possible to generalize results across settings? *Aviat Space Environ Med*. 2000;71:A37-A43.
23. Sandal GM, Bergan T, Warnche M, Værnes R, Ursin H. Psychological reactions during polar expeditions and isolation in hyperbaric chambers. *Aviat Space Environ Med*. 1996;67:227-34.
24. Chidester TR, Helmreich RL, Gregorich E, Geis CE. Pilot personality and crew coordination: implications for training and selection. *International Journal of Aviation Psychology*. 1991;1:25-44.
25. Sandal GM, Endresen IM, Værnes R, Ursin H. Personality and coping strategies during submarine missions. *Military Psychology*. 1999;11:381-404.
26. Palinkas L, Gunderson EKE, Holland AW. Predictors of behavior and performance in extreme environments: the Antarctic space analogue program. *Aviat Space Environ Med*. 2000;71:619-25.
27. Kanas N, Manzey D. *Space psychology and psychiatry*. 2nd ed. Microcosm Press, El Segundo, CA, and Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2008.
28. Kelly AD, Kanas N. Leisure time activities in space: a survey of astronauts and cosmonauts. *Acta Astronautica*. 1994;32:451-7.
29. Ihle EC, Ritscher JB, Kanas N. Positive psychological outcomes of spaceflight: an empirical study. *Aviat Space Environ Med*. 2006;77:93-101.
30. Suedfeld P. Invulnerability, coping, salutogenesis, integration: four phases of space psychology. *Aviat Space Environ Med*. 2005;76:B61-6.
31. Suedfeld P, Weiszbeck T. The impact of outer space on inner space. *Aviat Space Environ Med*. 2004;75(7):C6-9.
32. Connors MM, Harrison AA, Akins FR. Living aloft: Human requirements for extended spaceflight. NASA SP-483, NASA, Washington, DC, 1985.

33. Kanas N. Psychological, psychiatric, and interpersonal aspects of long-duration space missions. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1990;27:457–63.
34. Isay RA. The submariners' wives syndrome. *Psychiatric Quarterly*. 1968;42:647–52.
35. Kanas N. Psychosocial support for cosmonauts. *Aviat Space Environ Med*. 1991;62:353–5.
36. Kanas N, Salnitskiy V, Gushin V, Weiss DS, Grund EM, Flynn C, et al. Asthenia does it exist in space? *Psychosomatic Medicine*. 2001;63:874–80.
37. Bock O. Problems of sensorimotor coordination in weightlessness. *Brain Research Reviews*. 1998;28: 155–60.
38. Hockey GR. Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: a cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*. 1997;45:73–93.
39. Bock O, Fowler B, Comfort D. Human sensorimotor coordination during spaceflight: an analysis of pointing and tracking responses during the "Neurolab" space shuttle mission. *Aviat Space Environ Med*. 2001;72:877–83.
40. Manzey D. Monitoring of mental performance during spaceflight. *Aviat Space Environ Med*. 2000;7: A69–75.
41. Salnitski VP, Myasnikov VI, Bobrov AF, Shevchenko LG. Integrated evaluation and prognosis of cosmonaut's professional reliability during space flight. *Aviakosmicheskaia i Ekologicheskaia Medits*. 1999;33:16–22.
42. Kanasa N, Sandalb G, Boydc JE, Gushind VI, Manzeye D, Northf R, et al. Psychology and culture during long-duration space missions. *Acta Astronautica*. 2009;64: 659–77.
43. Parihar VK, Allen B, Tran KK, Macaraeg TG, Chu EM, et al. What happens to your brain on the way to Mars. *Sci Adv*. 2015;1:e1400256.

# 12. Sistema respiratorio

Manuel A. Díaz Carrillo, Irma Ayala Cruz, Karla I. Campos Olivares, Sonia A. Hernández Hernández, Francisco J. Huepa Sanabria, Carlos A. Mañón Valdez, J. de Jesús Medina Vázquez, Jovita Mondragón Díaz, Laura P. Olivares Fonseca, Erika Sánchez Fernández

## ■ Introducción

A pesar de lo poco frecuente que la población en general podrá experimentar situaciones de microgravedad, existen ciertos órganos en especial que son altamente susceptibles al cambio gravitacional. Los pulmones representan uno de los ejemplos de dichos órganos debido tanto a su baja densidad como a su composición basada en múltiples interfaces entre tejido y aire, lo cual les confiere su propiedad de alta distensibilidad.

Dentro de la capacidad residual funcional (CRF), el pulmón está compuesto por aproximadamente 1 L de sangre y tejidos y 3 L de aire, dándole una densidad baja (25 % de la densidad de la mayoría de otros órganos en el cuerpo). Mientras que el hecho de contar con esta baja densidad podría argumentar un efecto limitado de la gravedad, su intrincada estructura con las numerosas interfaces de aire-tejido le otorga la capacidad de deformarse bajo su propio peso. Así, el pulmón normal es altamente afectado por la gravedad.<sup>1</sup>

La respuesta pulmonar secundaria al cambio en la distribución de la fuerza gravitacional ha constituido uno de los pilares terapéuticos ante la presencia del síndrome de insuficiencia respiratoria aguda (SIRA).<sup>2</sup> Es por esto que los cambios del sistema respiratorio ante las modificaciones en la gravedad son de suma importancia en el entendimiento de medidas terapéuticas de la medicina actual y la aplicabilidad de su estudio no se limita a la exposición de seres humanos en ambientes de microgravedad durante viajes espaciales.

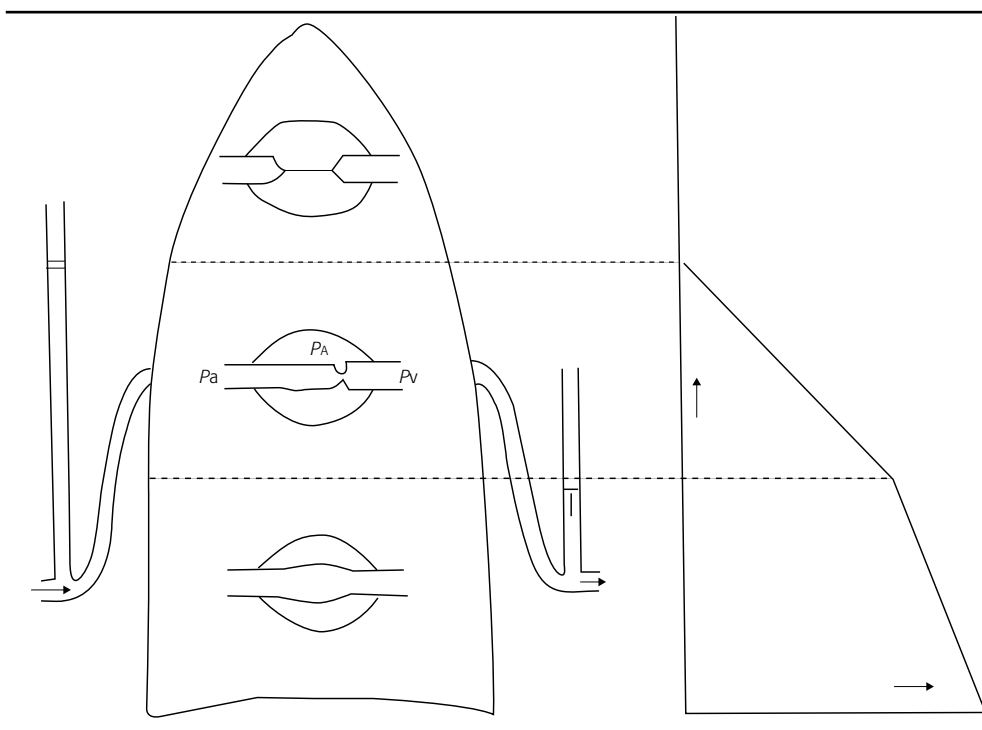
Se debe tomar en cuenta que el concepto de “gravedad cero” no es correcto y que la gravedad sobre la superficie terrestre es medida mediante aceleración y conocida con el nombre de 1G (9.80665 m/s<sup>2</sup>), considerando esta medición como gravedad estándar cualquier fuerza por debajo de este valor de aceleración es considerada microgravedad 1.

## Conceptos básicos de fisiología pulmonar

### Zonas de West

A partir de la década de los 60 surgió el modelo de las diferentes zonas que constituyen al pulmón con base en sus diferencias entre los procesos de ventilación, perfusión y presión hidrostática.<sup>3,4</sup>

Como se muestra en la Figura 12.1, en las regiones pulmonares que se someten a un mayor grado de gravedad, el flujo sanguíneo depende de la diferencia de presión entre los conductos arteriales y venosos de la vasculatura pulmonar, una situación con la que todos estamos familiarizados. El flujo sanguíneo varía poco con la altura en esta región, con un pequeño aumento en las partes más bajas, generalmente atribuido a la distensión de los capilares pulmonares ya que las presiones aumentan. Esto se denomina la zona 3. En contraste, en la parte superior de los pulmones, las presiones vasculares pulmonares bajas junto con los efectos hidrostáticos pueden dar lugar a presiones que caen debajo de la presión alveolar, y debido a que los capilares pulmonares son de paredes delgadas y sin soporte éstos se cierran ocasionando oclusión del flujo (zona 1).<sup>5</sup> La región que se encuentra entre estos dos extremos, en la que la presión arterial pulmonar es superior a la presión alveolar y esta última es superior a la presión pulmonar venosa conforma la zona 2, el flujo sanguíneo no se determina por la diferencia entre la presión arterial y venosa, sino por la diferencia entre las presiones arterial y alveolar.<sup>6</sup>

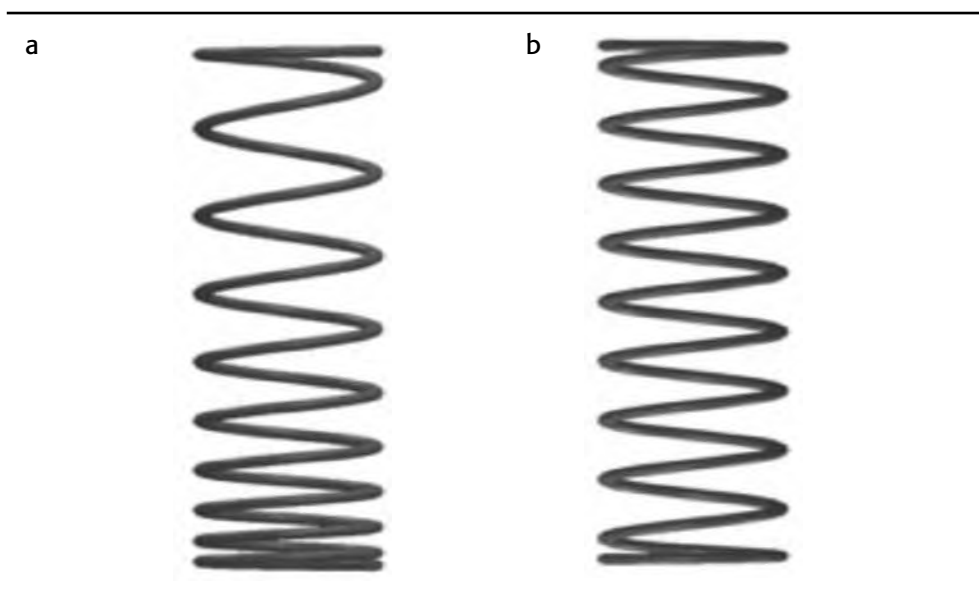


**Figura 12.1.**

Modelo de West de las zonas pulmonares. La perfusión regional depende de los valores relativos de la presión arterial pulmonar ( $P_a$ ), la presión venosa pulmonar ( $P_v$ ) y la presión alveolar ( $P_A$ ). En la zona 1,  $P_A$  excede las presiones vasculares y no hay flujo. En la zona 3, ambas presiones vasculares exceden  $P_A$  y así el flujo se determina por la diferencia de presión arterial-venosa. Entre éstos es la zona 2, en la que  $P_v$  (pero no  $P_a$ ) es de menos de  $P_A$ , formando un efecto de resistencia de Starling en el que el flujo se determina por la diferencia de presión arterial-alveolar.

## “El resorte”

Esta analogía permite explicar el efecto de la gravedad sobre la distensibilidad del parénquima pulmonar. Aunque no es un modelo perfecto, el comportamiento de un resorte es en muchos aspectos similar al del pulmón. Si el resorte es estirado las espirales en la parte más alta se encuentran separadas y las espirales de abajo se encontrarán próximas entre sí. Esto es análogo al tamaño alveolar, con alvéolos en la parte superior del pulmón de mayor tamaño que los de la parte inferior. Si se estiran con mayor fuerza los espirales (imitando la inspiración), éstos tendrán una distribución más uniforme debido al dominio de las fuerzas elásticas del resorte y el grado en que las espirales se separan en la parte inferior de éste es relativamente mayor que en la parte superior (Figura 12.2) [por lo tanto, la ventilación es mayor en las regiones declives al ser éstas las que se deforman en mayor grado]. Por último, si imaginamos que la sangre fluye a través de las espirales del resorte observaríamos mayor flujo en la parte declive del resorte, aunque el flujo de sangre por cada elemento en la espiral es el mismo. Si se eliminan los efectos de la gravedad, el resultado será la presencia de un patrón uniforme entre el tamaño alveolar, la ventilación y la perfusión.<sup>7</sup>



**Figura 12.2.**

Modelo de “resorte”. **a**, La distancia es menor entre las espirales más declives del resorte al ser estirado en condiciones de 1G. **b**, Al ser sometido a tensión en un ambiente de microgravedad la distancia entre las espirales del resorte se vuelve homogénea.

# El pulmón en microgravedad

## Volúmenes pulmonares y flujo espiratorio

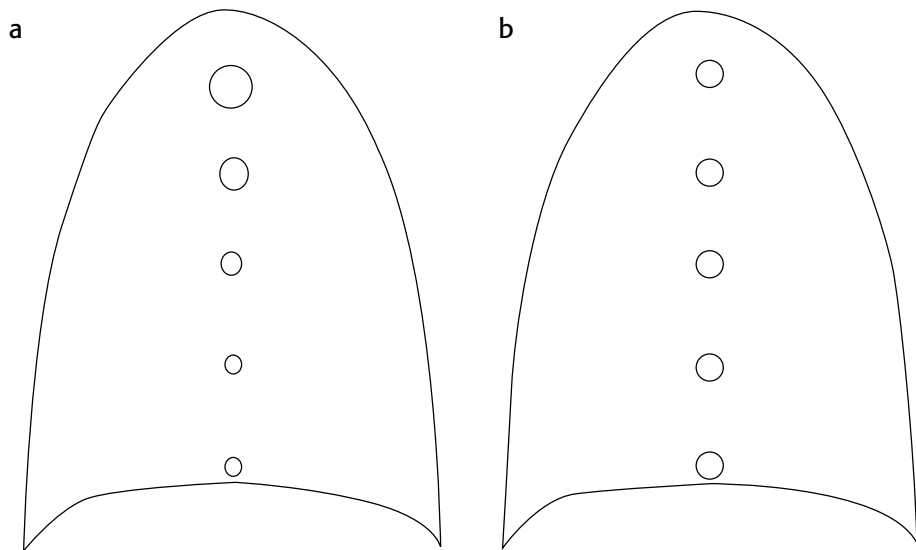
La capacidad vital es posiblemente el parámetro más común en la medición de la función pulmonar y los trajes empleados para dicha medición proporcionan una gran cantidad de información. La capacidad vital mostró una pequeña reducción inicial (0.5 %) cuando se midió por primera vez después de 1 día en condiciones de microgravedad en comparación con la medición de pie medido en 1G, pero esta reducción fue de corta duración.<sup>8</sup> Durante el día 4 de vuelo, la capacidad vital había regresado a los valores prevuelo y se mantuvo sin cambios a partir de entonces. La explicación más verosímil de este cambio fue la translocación inicial de sangre de las extremidades inferiores en el tórax temprano en vuelo, con una reducción subsiguiente al reducirse el volumen plasmático.<sup>9,10</sup>

La capacidad residual funcional depende de la relación de fuerzas entre la retracción pulmonar y la expansión hacia el exterior de la caja torácica. Incluso antes de que se hicieran mediciones, había predicciones claras sobre el efecto de la eliminación de la gravedad.<sup>11</sup> En comparación con la posición de pie, se esperaba que la eliminación de la gravedad restringiría la fuerza inspiratoria generada por el peso del contenido abdominal, y así se esperaba que la CRF disminuyera. Eso es precisamente lo que se observó, con una caída de la CRF de 500 mL, llegando a ser un valor intermedio entre la bipedestación y la posición supina.<sup>8</sup> A diferencia de la capacidad vital, no hubo ningún cambio en la CRF en función del tiempo en condiciones de microgravedad.

A diferencia de la capacidad vital o la CRF, las cuales se modifican ante los cambios de postura, el volumen residual es muy resistente al cambio, de la posición vertical a la posición supina.<sup>12,13</sup> Sin embargo, sorprendentemente, el volumen residual en microgravedad fue inferior a la de la posición vertical por 310 mL, una reducción de 18 %, e inferior a la supina por 220 mL.<sup>8</sup> La explicación probable de esto proviene de la expansión alveolar uniforme que está presente sólo en microgravedad. Bajo la gravedad, las regiones declives del pulmón alcanzan su volumen residual local antes que todo el pulmón y por lo tanto el gas queda atrapado en estas regiones, mientras que las regiones superiores no se desinflan en la misma medida. Sin embargo, en condiciones de microgravedad, la expansión alveolar uniforme permite un vaciado en general más uniforme del pulmón y un volumen residual total inferior (Figura 12.3).

Ningún análisis de la función pulmonar en microgravedad podría considerarse completo sin la realización de espirometría forzada y esto fue incluido como una parte estándar de los estudios realizados por el laboratorio espacial.<sup>8</sup> Al igual que las medidas de la capacidad vital, la capacidad vital forzada se redujo a principios de vuelo y posteriormente se recuperó.<sup>14</sup> Cuando se realizó un examen cuidadoso de la parte de esfuerzo independiente de la curva de flujo-volumen espiratorio máximo (FVEM), hubo cambios observados al inicio del vuelo consistente con el aumento de la congestión vascular que posteriormente disminuyó. Tales cambios ya se habían observado en las curvas FVEM realizadas en estudios durante vuelos parabólicos,<sup>15</sup> una situación en la que se produce una rápida translocación de sangre en la cavidad torácica. En contraste con los resultados de vuelos parabólicos, los cambios observados en microgravedad sostenida fueron mínimos.

Aunque sólo existieron cambios sutiles en casi todos los parámetros de la espirometría forzada, el flujo espiratorio máximo se redujo sustancialmente durante los primeros 4 días de



**Figura 12.3.** Un modelo teórico del pulmón durante el volumen residual en: **a**, 1G y **b**, microgravedad.

vuelo (12 % antes de volver a la línea de base en posición vertical). No existe una clara explicación fisiológica para esto y dicha reducción no fue evidenciada en los estudios durante vuelo parabólico cuando los sujetos fueron asegurados en un asiento. La especulación consistió en que los sujetos tenían dificultades para lograr un flujo espiratorio máximo en la ausencia de una plataforma adecuada como soporte.

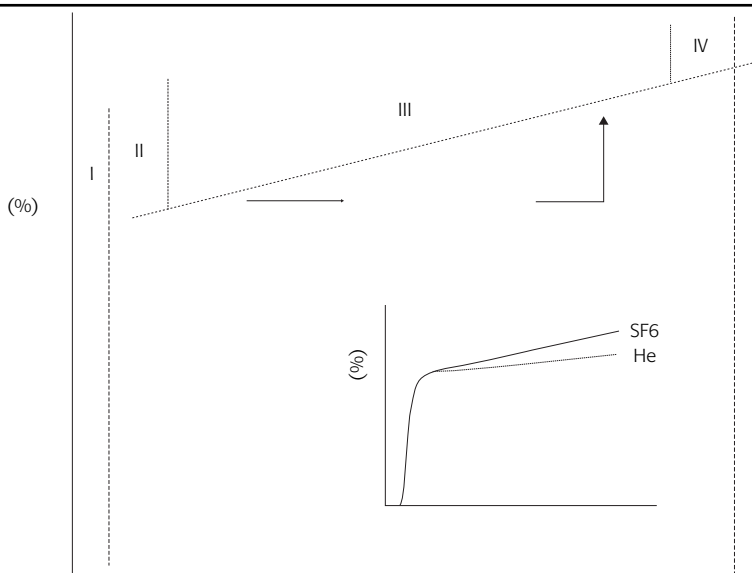
Ante la disminución en la gravedad la respuesta esperada sería la presencia de alteraciones significativas sobre la pared torácica y abdominal, sin embargo no se han realizado estudios en vuelos espaciales en los que se hayan medido las presiones esofágicas o gástricas, aunque se documentó un aumento en la contribución abdominal para el mantenimiento del volumen corriente, que pasó de 31 a 58 % en condiciones de microgravedad.<sup>16</sup> Esto es consistente con los resultados de los estudios realizados en vuelos parabólicos, donde se evidenció un aumento en la distensibilidad de la pared abdominal, pero no en la distensibilidad de la caja torácica<sup>17</sup> la cual únicamente presentó pequeños cambios en la forma, haciéndola un poco más circular.<sup>18,19</sup> Los cambios en la forma parecen ser el resultado de los cambios en la longitud del diafragma y en la activación de la musculatura respiratoria,<sup>19</sup> un proceso conocido como compensación de la longitud operativa.<sup>20</sup> El efecto relativamente pequeño sobre la caja torácica también es consistente con los pequeños cambios en la presión esofágica que se observan en sujetos sentados en vuelo parabólico.<sup>21</sup>

## Ventilación

Gran parte del conocimiento de las diferencias regionales en la ventilación proviene de estudios de imagen,<sup>22</sup> pero debido a las limitaciones para realizar estudios de imagen durante los vuelos



espaciales éstos no han sido realizados en órbita. Como tal, nuestro conocimiento se deriva de mediciones indirectas, como las pruebas de aliento (Figura 12.4) mediante la medición de gases exhalados o inhalados ya sean simples o múltiples. La prueba habitualmente se efectúa por medio de la inspiración de una capacidad vital de  $O_2$  y posteriormente la exhalación controlada del valor de una capacidad vital para la medición de gases exhalados.<sup>23</sup> Durante la inspiración, el nitrógeno contenido en los pulmones se diluye en una cantidad dependiente de la ventilación regional relativa, y de ese modo la concentración de nitrógeno es un marcador indirecto de la ventilación. Durante la exhalación, las oscilaciones cardiogénicas son marcadores de las diferencias en la ventilación entre las regiones pulmonares tanto cercanas como distales al corazón, y la deflexión terminal del nitrógeno funciona como marcador de las diferencias de la ventilación (en 1G) entre las regiones declives y no declives del pulmón ante la presencia del cierre de la vía aérea.<sup>24</sup> La administración de un bolo de argón inhalado igual al volumen residual proporciona



### Figura 12.4.

Ejemplo de concentración de gas inerte exhalado en prueba de aliento representada frente al volumen pulmonar después de una respiración igual a la capacidad vital. El espirograma resultante se divide en 4 fases: I, el gas del espacio muerto; II, la transición entre el espacio muerto alveolar y la concentración de gas; III (también conocido como la "meseta alveolar"), el vaciado de gas alveolar puro; IV, el gas exhalado después de la aparición del cierre de las vías respiratorias. La pendiente de fase III se obtiene por la línea de mejor ajuste a través de la meseta alveolar y es un índice de la falta de homogeneidad ventilatoria. No se muestran en la meseta alveolar (fase III) las oscilaciones cardíacas frecuentemente presentes.

(CTP, capacidad pulmonar total; VR, volumen residual. Recuadro: ejemplos de la fase III de la pendiente (%/L) para el hexafluoruro de azufre (SF6) y helio (He). El SF6 exhibe una pronunciada pendiente de fase III debido a la diferencia en las propiedades de difusión de cada gas.)

un marcador sensible adicional del cierre de las vías respiratorias. Los lavados múltiples de inhalación, en los que se respira el oxígeno durante varios ciclos, proporcionan información acerca del volumen tidal así como de la CFR.<sup>25</sup> Numerosos índices se derivan de estas pruebas, pero en lugar de centrarse en los valores específicos, en este capítulo nos limitamos a comentarlos y sugerir la lectura de los artículos citados para mayor información.

Basado en el modelo de “resorte” antes mencionado, la expectativa sería que la ventilación pulmonar debe ser completamente uniforme en condiciones de microgravedad. Sin embargo, cuando se realizaron pruebas de un solo aliento primero en vuelo parabólico<sup>26</sup> y después en los vuelos espaciales,<sup>27</sup> todas las señales de heterogeneidad ventilatoria persistieron en algún grado. La continuidad de su presencia en los estudios vuelo parabólico razonablemente podría haber sido atribuido al periodo de hipergravedad anterior al periodo de microgravedad, pero este argumento falla en los estudios de vuelos espaciales. El aumento de terminal en la concentración de nitrógeno (fase IV) en un lavado de exhalación de nitrógeno,<sup>24</sup> generalmente se considera un marcador de las diferencias en la ventilación entre las partes superior e inferior del pulmón, valor que se reduce en gran medida en la microgravedad, a 20 %, que es en gran medida coherente con el modelo de “resorte”. Esto resulta al alcanzar el punto de cierre regional de las vías respiratorias y, con base en los datos derivados de las pruebas de argón inhalado en el volumen residual, el volumen pulmonar durante esta prueba no obtuvo diferencia entre la microgravedad y 1G. Por lo tanto el volumen global pulmonar al que algunas unidades de pulmón alcanzaron su punto de retracción elástica fue independiente de la gravedad. La persistencia de una fase IV es evidencia que independientemente de la gravedad, las diferentes regiones del pulmón tienen ventilación diferente, tal vez debido a diferencias morfológicas regionales del parénquima pulmonar.

Otro punto importante entre las diferencias regionales en la ventilación son las oscilaciones cardiogénicas. Contrario a lo esperado, éstas persistieron en cerca de 50 % de su tamaño en 1G. Las oscilaciones cardiogénicas son resultado de la acción física del corazón a medida que se expande durante la diástole en el pulmón adyacente, y por lo tanto el hecho de que las oscilaciones persistan implica diferencias en la ventilación entre las regiones pulmonares cercanas y lejanas al corazón.

El otro elemento dominante en las pruebas de aliento es la pendiente de la meseta alveolar, o fase III. Está bien establecido que la fase III aumenta en la enfermedad temprana de pulmón<sup>28</sup> pero la falta de especificidad de este cambio ha conducido a abandonar la prueba como auxiliar diagnóstico. A diferencia de los otros marcadores de heterogeneidad ventilatoria, la pendiente de fase III es bien conocido que se produce en gran parte debido a una compleja interacción entre los procesos convectivos y difusivos cerca de la entrada acinar, y depende fundamentalmente de la geometría de la región pulmonar (la razón de la alta sensibilidad de cambios en este parámetro con enfermedad pulmonar temprana).<sup>29</sup> En relación con esto, la pendiente de fase III en las mediciones con nitrógeno cambió sólo ligeramente en microgravedad, cayendo a 75 % de la medición realizada en 1G.

Otro estudio realizado en vuelo parabólico incorporó la administración de helio y hexafluoruro de azufre en las mezclas de gas respirado durante las pruebas de aliento. Estos dos gases difieren ampliamente en el peso molecular (4 frente a 146 Da) por lo que su difusividad en fase gaseosa se diferencia por un factor de 6 (escalas de difusividad como el inverso de la raíz cuadrada del peso molecular). Debido a esta diferencia en la difusividad, la interacción con el flujo de convección es diferente en la periferia del pulmón para estos dos gases y, como resultado, el hexafluoruro de azufre presenta una pendiente de fase III mucho más pronunciada en comparación con el helio. Curiosamente, hubo un gran cambio en la pendiente de fase III durante la exposición a microgravedad; ambos cayeron, como fue el caso para el nitrógeno, pero los cambios eran tales que las pendientes del helio y del hexafluoruro de azufre se igualaron en condiciones de microgravedad, algo que no se ve en 1G<sup>30</sup>. Basándose en estos datos solamente, no fue posible determinar si la pendiente de helio

había caído menos o la pendiente hexafluoruro de azufre bajado más en microgravedad. Sin embargo, cuando el experimento se repitió en vuelo parabólico, incluyendo mediciones en uno de los mismos sujetos del estudio de los vuelos espaciales, la diferencia entre las pendientes persistió, y estaba claro que el cambio se había producido en el comportamiento del helio. Dado que la interacción entre difusión y convección para el helio se produce aproximadamente a la entrada acinar, la implicación es que la geometría de las vías respiratorias había cambiado en microgravedad. Dada la limitación física de las estructuras implicadas, es difícil imaginar un efecto gravitacional directo causando esto de una manera coordinada y la especulación es que existió cierto grado de edema pulmonar debido al aumento de la filtración capilar. Sin embargo, no hay todavía otros estudios que hayan confirmado o refutado este concepto.<sup>31</sup>

Los resultados en las pruebas de aliento mostraron una fuerte persistencia de la heterogeneidad ventilatoria. Sólo hubo cambios muy modestos en los índices de estas pruebas (aunque hubo claros aumentos en la heterogeneidad en la posición supina).<sup>32</sup> Estos resultados fueron comparados por un análisis innovador de los datos obtenidos por reinhalación,<sup>33</sup> que llegó a una conclusión similar, a saber, que los principales determinantes de la falta de homogeneidad ventilatoria durante la respiración corriente en la postura erguida no eran principalmente de origen gravitatorio. Por lo tanto, parece que las propiedades elásticas del pulmón dominan efectos gravitacionales durante la respiración corriente.

## Intercambio gaseoso y relación ventilación–perfusión

Dado que la absorción global de oxígeno y la producción de dióxido de carbono está determinada por las necesidades metabólicas del cuerpo, se espera que los cambios en estos parámetros sean mínimos o incluso ausentes durante la exposición a microgravedad y, que de hecho fue el caso.<sup>34</sup> Mientras que el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono se mantuvo inalterada, hubo algunos cambios en cómo se logró. El principal cambio fue que la ventilación alveolar se redujo ligeramente y la  $PCO_2$  al final de la espiración aumentó significativamente en 2 mm Hg. La valoración posterior de los vuelos espaciales de larga duración<sup>35</sup> demostró un aumento de 2 mm Hg en la  $PCO_2$  final de la espiración, sin embargo se desconoce si este efecto fue secundario al aumento de los niveles de dióxido de carbono de la cabina o a un cambio en el control de la ventilación.

El patrón de respiración que conduce a la ventilación alveolar presentó cambios. Hubo una reducción sustancial en el volumen corriente en reposo de 15 % y un aumento concomitante en la frecuencia respiratoria de 9 %, una reducción de la ventilación total de 7 %.<sup>36</sup> Esto estuvo acompañado por una reducción en el espacio muerto fisiológico, consistente con una distribución más uniforme del flujo de sangre pulmonar, lo que dio lugar a la pequeña reducción en la ventilación alveolar. La "selección" de un volumen tidal más bajo y un aumento de la frecuencia respiratoria probablemente es el resultado de la eliminación del peso del contenido abdominal y cintura escapular posicionando a los músculos inspiratorios en una configuración diferente. No hubo evidencia de cambios significativos en el impulso respiratorio, con el tiempo inspiratorio como fracción de la duración de la respiración manteniéndose ligeramente elevado en microgravedad (3 %) y el promedio del flujo de inspiratorio se redujo en 10 %.

La poca practicidad de los métodos convencionales para la medición de la relación ventilación–perfusión durante los vuelos espaciales hace necesaria la utilización de métodos indirectos como en muchas de las situaciones al valorar la fisiología pulmonar. La relación ventilación–perfusión ( $V'A/Q'$ ) se infiere a partir de una exhalación lenta.<sup>37-39</sup> En esencia la tasa de in-

tercambio respiratorio en cualquier punto dentro de la exhalación es un reflejo de la  $V'A/Q'$  de base. Dado que el grado de heterogeneidad de la ventilación y la perfusión en el pulmón se redujeron en gran medida en microgravedad, una inferencia razonable podría ser que la  $V'A/Q'$  en el pulmón en microgravedad se mantendría disminuida. Sin embargo, este no fue el caso. Mientras que hubo una reducción en el intervalo de  $V'A/Q'$  presentado después de la aparición del cierre de las vías respiratorias (fase IV), secundario a la supresión de los gradientes de arriba hacia abajo en la ventilación y la perfusión, sobre la mayor parte de la exhalación (fase III, antes del cierre de las vías respiratorias) la  $V'A/Q'$  se mantuvo sin cambios.

Un estudio posterior de las relaciones entre las fases y las oscilaciones cardiogénico presenta una explicación.<sup>40</sup> En 1G, éstos mostraron que las áreas de alta ventilación coincidían con las zonas de alta perfusión y zonas de escasa ventilación de igual forma con las zonas de baja perfusión. El efecto neto es hacer que las distribuciones subyacentes de la ventilación y la perfusión se correlacionen entre sí, lo cual permite reducir la heterogeneidad de la distribución resultante de  $V'A/Q'$ . Sin embargo, en condiciones de microgravedad, la correlación se rompió, así que a pesar de las reducciones en la heterogeneidad de la ventilación y de la perfusión, la heterogeneidad de  $V'A/Q'$  no se redujo. En pocas palabras, la gravedad impone efectos comunes tanto en la ventilación como en la perfusión que sirven para mantener una alta eficiencia en el intercambio de gases en el pulmón.

## Conclusión

Los pulmones son los órganos mayormente afectados por la gravedad en el organismo. El conocimiento de los modelos teóricos tanto de las zonas de West como el modelo del “resorte” facilita el entendimiento de las consecuencias al aplicar gravedad sobre el sistema respiratorio y permite inferir la respuesta ante la reducción de esta fuerza. En los últimos años se han desarrollado mediciones indirectas para esclarecer la relación entre microgravedad y pulmón, las cuales han permitido comprobar lo sensible que este órgano es a la gravedad y que los cambios ante la reducción de ésta no provocan consecuencias irreversibles o relevantes en su funcionamiento habitual.

## Referencias

1. Prisk GK. Microgravity and the respiratory system. *Eur Respir J*. 2014;43:1459-71.
2. Gattinoni L, Taccone P, Carlesso E, Marini JJ. Prone position in acute respiratory distress syndrome. Rationale, indications, and limits. *Am J Respir Crit Care Med*. 2013;188:1286-93.
3. West JB. *Respiratory physiology – the essentials*. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins; 2012.
4. West JB, Dollery CT, Naimark A. Distribution of bloodflow in isolated lung: relation to vascular and alveolar pressures. *J Appl Physiol*. 1964;19:713-24.
5. Glaister D. The effect of positive centrifugal acceleration upon the distribution of ventilation and perfusion within the human lung, and its relation to pulmonary arterial and intraoesophageal pressures. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*. 1967;168:311–34.
6. West JB. Pulmonary gas flow and gas exchange. En: West JB (ed). *Respiratory physiology: people and ideas*. New York: Oxford Press; 1966: pp. 140-96.
7. Hopkins SR, Henderson AC, Levin DL, Yamada K, Arai T, et al. Vertical gradients in regional lung density and perfusion in the human lung: the Slinky effect. *J Appl Physiol*. 2007;103:240-8.

8. Elliott AR, Prisk GK, Guy HJ, West JB. Lung volumes during sustained microgravity on Spacelab SLS-1. *J Appl Physiol.* 1994;77:2005-14.
9. Alfrey CP, Udden MM, Leach-Huntoon C, Driscoll T, Pickett MH. Control of red blood cell mass in spaceflight. *J Appl Physiol.* 1996;81:98-104.
10. Leach CS, Alfrey CP, Suki WN, Leonard JI, Rambaut PC, et al. Regulation of body fluid compartments during short-term spaceflight. *J Appl Physiol.* 1996;81:105-16.
11. Agostoni E, Mead J. Statics of the respiratory system. En: Fenn WO, Rahn H (ed). *Handbook of physiology.* Washington: American Physiological Society; 1964;387-428.
12. Agostoni E, Gurtner G, Torri G, Rahn H. Respiratory mechanics during submersion and negative-pressure breathing. *J Appl Physiol.* 1966;21:251-8.
13. Tenney SM. Fluid volume redistribution and thoracic volume changes during recumbency. *J Appl Physiol.* 1959;14:129-32.
14. Elliott AR, Prisk OK, Guy HJB, Kosonen J, West JB. Forced expirations and maximum expiratory flow-volume curves during sustained microgravity on Spacelab SLS-1. *J Appl Physiol.* 1996;81:33-43.
15. Guy HJB, Prisk GK, Elliott AR, West JB. Maximum expiratory flow-volume curves during short periods of microgravity. *J Appl Physiol.* 1991;70:2587-96.
16. Wantier M, Estenne M, Verbanck S, Prisk GK, Paiva M. Chest wall mechanics in sustained microgravity. *J Appl Physiol.* 1998;84:2060-65.
17. Edyvean J, Estenne M, Paiva M, Engel LA. Lung and chest wall mechanics in microgravity. *J Appl Physiol.* 1991;71:1956-66.
18. Michels DB, Friedman PJ, West JB. Radiographic comparison of human lung shape during normal gravity and weightlessness. *J Appl Physiol.* 1979;47:851-7.
19. Estenne M, Gorini M, Van Muylem A, Ninane V, Paiva M. Rib cage shape and motion in microgravity. *J Appl Physiol.* 1992;73:946-54.
20. Green M, Mead J, Sears TA. Muscle activity during chest wall restriction and positive pressure breathing in man. *Respir Physiol.* 1978;35:283-300.
21. Videbaek R, Norsk P. Atrial distension in humans during microgravity induced by parabolic flights. *J Appl Physiol.* 1997;83:1862-66.
22. Bryan AC, Milic-Emili J, Pengelly D. Effect of gravity on the distribution of pulmonary ventilation. *J Appl Physiol.* 1966;21:778-84.
23. Buist AS, Ross BK. Predicted values for closing volumes using a modified single breath nitrogen test. *Am Rev Respir Dis.* 1973;107:744-52.
24. Nichol GM, Michels DB, Guy HJB. Phase V of the single-breath washout test. *J Appl Physiol.* 1982;52:34-43.
25. Lewis SM, Evans JW, Jalowayski AA. Continuous distributions of specific ventilation recovered from inert gas washout. *J Appl Physiol.* 1978;44:416-23.
26. Michels DB, West JB. Distribution of pulmonary ventilation and perfusion during short periods of weightlessness. *J Appl Physiol.* 1978;45:987-98.
27. Guy HJB, Prisk OK, Elliott AR, Deutschman RA III, West JB. Inhomogeneity of pulmonary ventilation during sustained microgravity as determined by single-breath washouts. *J Appl Physiol.* 1994;76:1719-29.
28. Buist AS, Vollmer WM, Johnson LR, McCamant LE. Does the single-breath N2 test identify the smoker who will develop chronic airflow limitation? *Am Rev Respir Dis.* 1988;137:293-301.
29. Paiva M, Engel LA. The anatomical basis for the sloping N2 alveolar plateau. *Respir Physiol.* 1981;44:325-37.
30. Prisk GK, Lauzon AM, Verbanck S, Elliott A, Guy H, et al. Anomalous behavior of helium and sulfur hexafluoride during single-breath tests in sustained microgravity. *J Appl Physiol.* 1996;80:1126-32.
31. Lauzon AM, Prisk GK, Elliott AR, Verbanck S, Paiva M, et al. Paradoxical helium and sulfur hexafluoride single-breath washouts in short-term vs. sustained microgravity. *J Appl Physiol.* 1997;82:859-65.
32. Prisk GK, Guy H, Elliott A, Paiva M, West J. Ventilatory inhomogeneity determined from multiple-breath washouts during sustained microgravity on Spacelab SLS-1. *J Appl Physiol.* 1995;78:597-607.
33. Verbanck S, Linnarsson D, Prisk GK, Paiva M. Specific ventilation distribution in microgravity. *J Appl Physiol.* 1996;80:1458-65.
34. Prisk GK, Elliott AR, Guy HJ, Kosonen JM, West JB. Pulmonary gas exchange and its determinants during sustained microgravity on Spacelabs SLS-1 and SLS-2. *J Appl Physiol.* 1995;79:1290-98.
35. Prisk GK, Fine JM, Cooper TK, West JB. Vital capacity, respiratory muscle strength and pulmonary gas exchange during long-duration exposure to microgravity. *J Appl Physiol.* 2006;101:439-47.
36. Prisk GK, Elliott AR, Guy HJ, Kosonen JM, West JB. Pulmonary gas exchange and its determinants during sustained microgravity on Spacelabs SLS-1 and SLS-2. *J Appl Physiol.* 1995;79:1290-98.
37. West JB, Fowler KT, Hugh-Jones P, O'Donnel TV. Measurement of the ventilation-perfusion ratio inequality in the lung by the analysis of a single expire. *Clin Sci.* 1957;16:529-47.
38. Guy HJ, Gaines RA, Hill PM, Wagner PD, West JB. Computerized noninvasive tests of lung function. A flexible approach using mass spectrometry. *Am Rev Respir Dis.* 1976;113:737-44.
39. Prisk GK, Guy HJ, West JB, Reed JW. Validation of measurements of ventilation-to-perfusion ratio inequality in the lung from expired gas. *J Appl Physiol.* 2003;94:1186-92.
40. Lauzon AM, Elliott AR, Paiva M, West JB, Prisk GK. Cardiogenic oscillation phase relationships during single-breath tests performed in microgravity. *J Appl Physiol.* 1998;84:661-8.

# 13. Rehabilitación en microgravedad

Juan Manuel Guzmán González, María Elva García Salazar

■ Miles de años antes de que se realizaran, la humanidad ha soñado con viajes espaciales. Desde los textos babilónicos, encontramos pruebas de ello, alrededor del año 4000 a.C.

Dédalo e Ícaro, antiguos mitos griegos, también representan el deseo universal de volar. Ya en el siglo II d.C. el escritor griego Luciano escribió sobre un imaginario viaje a la Luna. A principios del siglo XVII, el astrónomo alemán Johannes Kepler escribió una sátira científica sobre un viaje a la Luna. El filósofo y escritor francés Voltaire cuenta en su obra *Micromegas* (1752) los viajes de unos habitantes de Sirio y de Saturno. Y en 1865, el escritor francés Jules Verne describe un viaje espacial en su famosa novela *De la Tierra a la Luna*. El sueño del vuelo espacial continuó en el siglo XX, especialmente en los escritos del inglés H. G. Wells, que en 1898 publicó *La guerra de los mundos* y en 1901 *Los primeros hombres en la Luna*. En los últimos tiempos la ciencia ficción ha desarrollado nuevas fantasías en torno a los vuelos espaciales.

Lo que pocos se imaginaban, son los cambios que sufre el cuerpo humano al permanecer en estado de ingravidez, ya que se afectan órganos y sistemas que describimos de manera detallada en este capítulo; sin embargo, sólo por mencionar algunos datos, los astronautas se vuelven más altos, ya que los tripulantes ganan un 3% más de estatura durante los primeros seis meses que pasan en la estación, esto se debe a la falta de la fuerza de gravedad; sin embargo, al cabo de unos meses de regresar a la Tierra vuelven a su estatura normal.

Pierden masa muscular, utilizamos los músculos para diferentes tareas, muchas de las cuales requieren fuerza para vencer la resistencia que provoca la gravedad; si estás en el espacio, tus músculos trabajan menos y disminuye su masa.

Piernas delgadas y rostro edematizado, la falta de gravedad hace que el líquido abandone los miembros pélvicos y sube hasta la parte superior del cuerpo lo que genera edema facial.

Huesos frágiles, a pesar de que los astronautas se alimenten de manera equilibrada al permanecer en el espacio el esqueleto deja de cargar peso lo que genera osteopenia y osteoporosis. Por cada mes que el astronauta permanece en el espacio los huesos pierden alrededor de 1% de su densidad.

El ambiente sin gravedad del espacio genera adaptaciones fisiológicas específicas en los astronautas sanos. A su regreso a la Tierra, estas adaptaciones se manifiestan como alteraciones físicas que requieren un periodo de rehabilitación. Los cambios fisiológicos son el resultado de la permanencia en condiciones de microgravedad y altamente correlacionados con los observados en poblaciones de pacientes relativamente inmóviles terrestres tales como lesionados de la médula espinal, geriátricos, o pacientes en cama por periodo prolongado. Los principales cambios que presentan después del vuelo que requieren intervención de rehabilitación incluyen: intolerancia ortostática, desmineralización ósea, atrofia muscular y síntomas neurovestibulares. Las agencias espaciales se están preparando para las misiones de permanencia prolongada, incluyendo

la colonización de la Luna y la exploración interplanetaria de Marte. Estos vuelos de mayor duración pueden producir discapacidad severa y prolongada, potencialmente más allá del punto de retorno seguro a la Tierra. En este capítulo se analizan y discuten los planes de rehabilitación de espacio existentes para los principales impedimentos posteriores al vuelo, intervenciones de rehabilitación basados en la evidencia son imprescindibles no sólo para facilitar el retorno a la Tierra, sino también para extender la duración segura de exposición a un ambiente de microgravedad fisiológicamente hostil al ser humano.

El ambiente sin gravedad en el espacio obliga a la adaptación fisiológica en todos los sistemas del cuerpo humano. Un periodo de incapacidad posterior a los vuelos espaciales puede durar de días a semanas, ya que el cuerpo se tiene que readaptar a la plena gravedad. La adaptación fisiológica a la microgravedad depende del periodo de exposición, con mayores niveles de discapacidad previstos en volver a casa de las misiones más largas. Las adaptaciones fisiológicas de los astronautas para el medio ambiente extremas del espacio provocan discapacidad y puede no estar totalmente invertido en el retorno a la Tierra. Hasta la fecha, la medicina espacial se ha centrado principalmente en la preparación previa al vuelo y potenciales problemas agudos de los vuelos espaciales; sin embargo, el conocimiento y la comprensión de las consecuencias de la ingravidez, combinado con la experiencia de especialistas en Medicina Física y rehabilitación, pueden lograr que mejoren las condiciones para extender la duración de la misión espacial.

La discapacidad después de un vuelo espacial depende de tres factores principales:

- cantidad de tiempo que pasó en el espacio
- la adaptación individual a la ingravidez
- la eficacia de las medidas tomadas

Debido a que las agencias espaciales se están preparando para las misiones de duración más larga que antes, son inevitables mayores niveles de discapacidad después del vuelo. Actualmente estamos en condiciones de predecir la adaptación individual de ingravidez, y por lo tanto podemos preseleccionar astronautas que se adaptan con relativa facilidad a diferentes ambientes gravitacionales. Contraindicaciones integradas han sido de gran beneficio en vuelo espacial de larga duración, pero son dependientes de cumplimiento y no del todo eficaz. Por consiguiente, se necesita diseñar programas de rehabilitación basados en la evidencia científica para la readaptación de los astronautas a la Tierra después de los vuelos de larga duración.

Se define un vuelo de corta duración al menor de 30 días, las misiones de los transbordadores típicos duran de 10 a 17 días. La mayoría de los datos sobre la fisiología del espacio se han derivado de estancias de corta duración en el espacio.

Las misiones de larga duración incluyen una estancia promedio de 6 meses en las Estaciones Espaciales Internacionales, existen diferencias importantes en cuanto a la duración de los vuelos en lo que respecta al énfasis en las medidas que se deben tomar para evitar estos cambios. Por supuesto, se va a necesitar establecer programas específicos para los viajes espaciales de duración ultralarga que corresponda al tiempo requerido para la colonización lunar extendida o de viaje interplanetario a Marte (aproximadamente 3 años) o más allá. A la fecha, la exposición al espacio más larga ha sido de 437 días (cosmonauta Valery Polyakov).

El tiempo acumulado más largo en el espacio era 747 días e incluyó tres vuelos (Cosmonauta Sergei Avdeyev).

La rehabilitación de los astronautas para volver a 1G (gravedad de la Tierra) después de años de viaje espacial por supuesto será más difícil.

Los datos sobre la adaptación y rehabilitación en el espacio son escasos y se han derivado principalmente de estudios limitados sobre los astronautas y de los modelos basados en estado de ingravidez en la Tierra. El ideal del estudio con frecuencia se ve comprometido por las limitaciones de tiempo disponible de los miembros de la tripulación para realizar proyectos científicos a bordo, ya que deben realizar múltiples tareas de alta prioridad. Además, una gran cantidad de datos sobre rehabilitación no se ha recopilado para su publicación. Como resultado, los estudios de vuelos espaciales existentes carecen de valor estadístico (muestras pequeñas), los grupos control y las intervenciones cegadas que proporcionan los astronautas son limitados en cuanto a la práctica basada en la evidencia. Sin embargo, los estudios existentes proporcionan la base para futuras investigaciones.

El modelo de reposo en cama, que se utiliza para imitar la ingravidez humana, constituye un vínculo directo con la Medicina Física y Rehabilitación. En los estudios de reposo en cama, los sujetos siguen un estricto protocolo de acostarse en cama a 6 grados de inclinación cabeza abajo durante días o meses. Los especialistas en Medicina Física y Rehabilitación proporcionan atención a las personas que por sus condiciones limitan su movilidad o están confinados en cama, algunas de estas poblaciones como los pacientes con lesión medular, pobre condición física, deficiencia nutricional, adultos mayores, que experimentan cambios fisiológicos que se correlacionan altamente con los observados en los astronautas. Los fisiatras tratan habitualmente con problemas similares a los dos modelos de reposo en cama, incluyendo la pérdida de acondicionamiento cardiovascular, cambios de líquidos, la atrofia muscular y la pérdida de condición, problemas nutricionales, desmineralización ósea, anemia, inmunosupresión, alteraciones endocrinas, y la disfunción vestibular neurosensorial y espacio.

Es el médico especialista en Medicina Física y Rehabilitación el personaje idóneo para desarrollar estrategias de rehabilitación óptimas para el retorno de los astronautas.

Por otra parte, los pacientes de rehabilitación se beneficiarán de la investigación espacial. El énfasis inicial del desarrollo espacial estaba enfocado en la física, ingeniería, y desarrollo de *hardware*, más que en las ciencias biológicas. Hasta el momento, muchos de los adelantos tecnológicos que se han desarrollado a través de los vuelos espaciales han beneficiado directamente a las personas con discapacidad que asisten a los servicios de rehabilitación, mediante la transferencia de estas tecnologías.

Recientemente, la NASA identifica al ser humano como el elemento esencial dentro de los sistemas de los vuelos espaciales, generando mayor atención a la biología y la fisiología de los vuelos espaciales tripulados.

En este capítulo se examinan las adaptaciones fisiológicas relacionadas con el espacio en tres secciones:

- cardiovasculares
- musculoesqueléticas, subdivididos en los músculos y huesos
- neurovestibular

Otros sistemas afectados (p. ej., gastrointestinales, hematológicas, renales, etc.) son menos susceptibles de rehabilitación y no se revisan aquí.



# Cardiovascular

El desacondicionamiento cardiovascular que se presenta en los vuelos espaciales incluye la disminución del volumen sanguíneo circulante, disminución de la presión arterial diastólica, disminución de la masa muscular ventrículo izquierdo, y disminución del volumen ventricular. Estas alteraciones dependen del tiempo de exposición a un ambiente de microgravedad y pueden ocasionar mareos, taquicardia, palpitaciones, o reducción de la capacidad de ejercicio. Las arritmias no se presentan habitualmente durante o después del vuelo.

La manifestación más inmediata y molesta para el astronauta al retorno a la Tierra es la intolerancia ortostática posvuelo [postvuelo] (PSOI; *space-flight orthostatic intolerance*).

La intolerancia ortostática posvuelo es causada por perfusión insuficiente del cerebro y se presenta como síncope o presíncope (mareo, vértigo, sudoración, presión arterial sistólica por debajo de 70 mm Hg).

El primer caso documentado plenamente fue después de 34 horas del vuelo Mercurio en 1963, ocurrió la tolerancia ortostática posvuelo en 20 a 64 % de los astronautas cuando regresaron.

Algunos astronautas están predisuestos a esta condición después del vuelo y nunca desarrollan resistencia en vuelos subsiguientes. Las mujeres son particularmente susceptibles a esta condición. En los vuelos espaciales de larga duración aumenta en gran medida la incidencia de PSOI en comparación con la de las misiones cortas

El mecanismo de PSOI es multifactorial, aunque aún no está completamente entendido. Extensas revisiones de este tema han sido publicadas.

Algunas hipótesis mencionan que son factores de naturaleza mecánica los que contribuyen a la aparición de esta intolerancia, entre los que se incluyen:

- a. la pérdida de líquidos y la disminución del volumen por vasoconstricción arterial
- b. pérdida de masa muscular
- c. alteración cardiorrespiratoria, rendimiento
- d. aumento de la presión venosa central

Hipótesis más recientes incluyen

- e. alteraciones vestibulares por cambios morfológicos de los otolitos y plasticidad neurológica con el control cardiovascular alterado
- f. respuesta hipoadrenérgica posvuelo o deterioro del enlace adrenérgico
- g. deterioro de los barorreceptores y arcorreflejos

Además, la anemia de los vuelos de corta y larga duración pueden contribuir a la oxigenación cerebral insuficiente. Medidas preventivas: solución salina por vía oral inmediatamente antes del aterrizaje, inicia los procedimientos de readaptación.

Aditamentos para generar presión negativa en la parte inferior del cuerpo y simular temporalmente la distribución de la sangre como si estuviera en la gravedad normal

Sin embargo, a pesar de los resultados obtenidos en datos experimentales tempranos, los dispositivos de presión negativa aplicados a la parte inferior del cuerpo, aún no se han demostrado los efectos de total protección contra PSOI para justificar su uso rutinario en el espacio. Durante el regreso, los astronautas usan trajes antigravedad y prendas de refrigeración líquida.

El traje antigraedad consta de vejigas inflables en las piernas y el abdomen, y en las prendas de enfriamiento líquido circula agua enfriada termoeléctricamente que se distribuye a través de una red de tubos que cubren el cuerpo.

Estos trajes ofrecen protección cardiovascular transitoria mediante el apoyo a la presión arterial y limitar los aumentos en la frecuencia cardiaca. A los pocos minutos de regreso a 1G, el programa de rehabilitación médica incluye, además de la reposición de líquidos, en pocas ocasiones el uso de agentes inotrópicos para regular la fuerza de las contracciones cardiacas. Fludrocortisona, un mineralocorticoide, se ha demostrado que mejora el volumen del plasma, pero no reduce los síntomas de PSOI, lo que sugiere que el volumen de líquido reducido por sí solo no es responsable de PSOI. Midodrina, un agonista alfa-1, puede limitar PSOI.

Es importante la actuación del equipo médico durante el aterrizaje debido a que cualquier descuido puede poner en riesgo la vida y la misión, ya que los sistemas de soporte de vida se deben configurar de inmediato durante este periodo crítico. La recuperación de la PSOI, con la desaparición de la hipotensión y presíncope, suele ser completa de tres días a dos semanas después del aterrizaje.

Se espera que la recuperación de la frecuencia cardiaca, la presión arterial, el volumen sistólico, la masa del ventrículo izquierdo, y las respuestas cardiorrespiratorias se consigan durante la rehabilitación.

## Musculoesquelético

La realización de actividades de la vida diaria en el espacio, como en la Tierra, depende de la suficiente masa muscular funcional. Sin embargo, la fuerza necesaria para ejecutar estas actividades se reduce en el espacio. La atrofia muscular progresiva en condiciones de ingravidez ha sido consistentemente documentada.

En ausencia de medidas específicas, la masa muscular disminuye en aproximadamente dos tercios de la masa inicial después de aproximadamente 270 días. Se necesita la integridad muscular por maniobras de emergencia, actividades de alto rendimiento, tales como las actividades extravehiculares (p. ej., los paseos espaciales), el uso de herramientas, la movilidad y, posiblemente, para limitar el grado de PSOI a su regreso a la Tierra. La pérdida de masa muscular y fuerza, patrones reflejos anormales y el aumento de la fatigabilidad de los vuelos espaciales corresponde en muchos aspectos a la falta de condición física que sufren los pacientes de reposo en cama y pacientes de edad avanzada en la Tierra.

La ingravidez real y la simulada han demostrado que la atrofia es mayor en los músculos posturales antigravitatorios. La pérdida en el volumen muscular es mayor en flexores plantares del tobillo, seguido de flexores dorsales, extensores de la rodilla, flexores de la rodilla y músculos de la columna lumbosacra. Los resultados en los vuelos espaciales de corta duración indican que hay disminución de la fibra de la sección transversal pero ningún cambio en el número de fibras.

A diferencia de los modelos animales, donde las fibras de tipo II se atrofian, en los seres humanos en condiciones de microgravedad se produce atrofia de las fibras tipo I y tipo II.

La atrofia está más determinada por la función muscular que por la composición de la fibra, debido a que la atrofia de ambos tipos es más grande en los músculos posturales, predominantemente en los de contracción lenta y más leve en su mayor parte, los músculos de contracción rápida que no mantienen la postura. Esta atrofia se ha atribuido a un desequilibrio entre el aumento de la degradación de las proteínas en los miofilamentos y disminución de la síntesis cuando se expone a la microgravedad. Sin embargo, más que los cambios en la estructura

de la masa muscular, importa la disminución de la fuerza y la energía, las cuales se han medido en el espacio.

A pesar del uso de las medidas preventivas, la fuerza máxima se redujo 45 % de los valores de comprobación previa al cabo de 180 días. Además, los músculos después del vuelo han perdido poder de respuesta explosiva, muy superior a la moderada pérdida de masa muscular; las pérdidas musculares funcionales pueden ser atribuibles a cambios en la activación neuronal. La velocidad de conducción en las terminales del axón se reduce con el vuelo espacial, y las uniones neuromusculares se someten a la remodelación estructural significativa en los músculos posturales expuestos a la microgravedad.

La discordancia entre la masa y la fuerza también puede ser atribuible a las propiedades biomecánicas alteradas de los músculos en condiciones de microgravedad. Se ha reportado rigidez musculotendinosa después de los vuelos espaciales, dependiendo de las técnicas de medición empleadas. Los ejercicios de resistencia del timón detiene la disminución, pero no impide que se presente la rigidez del tendón durante el reposo en cama.

El deterioro del control de la relación longitud-tensión durante la contracción muscular puede contribuir a la debilidad funcional y predisponer a las lesiones.

La eficacia de las medidas preventivas para la atrofia muscular (ejercicios aeróbicos en ergómetro, banda sin fin, bicicleta, ejercicios de resistencia, y dieta rica en leucina) no se conoce, ya que los protocolos no han sido estandarizados y estudiado.

Extrapolación de los datos de reposo en cama y las medidas preventivas de resistencia muscular: sería ideal incluir ejercicios de impacto de alta intensidad isométricos e isotónicos. Contracción excéntrica con el dispositivo de resistencia del cicloergómetro para conservar la masa muscular de los extensores de rodilla (cuadriceps), evitar la pérdida de masa muscular de flexores plantares (gemelos), hipertrofia muscular sin carga, y la pérdida ósea atenuada en los estudios de reposo en cama, contracciones musculares rápidas regulares durante el vuelo pueden prevenir déficits de fuerza explosiva visto en el retorno a la Tierra.

Debido a que las medidas preventivas no pueden preservar los músculos, los astronautas requieren readaptación neuromuscular a la gravedad y actualmente reciben terapia física similar a un régimen de pérdida de condición generalizada. La restauración de la masa muscular y la fuerza se produce a una velocidad similar a, o posiblemente más corta que, la tasa de atrofia inicial. No hemos podido encontrar estudios que comparan la eficacia de diversos protocolos de rehabilitación aplicadas a los astronautas después de misiones de larga duración.

Una última preocupación particular es el persistente dolor muscular posterior al vuelo reportado por los astronautas hasta meses después del regreso a la Tierra. La causa exacta de este dolor es desconocido, pero podría estar relacionado con daños en las fibras atrofiadas durante la ingravidez y posteriormente, expuestas a carga excéntrica. Las biopsias musculares de ratas que eran normales en vuelo demostraron extensa interrupción del sarcómero y edema pocas horas después de regresar a 1G. El corolario clínico más cercano a esta condición es que se puede retrasar el dolor muscular que aparece después de actividades atléticas excesivas, o los reportados por los pacientes de rehabilitación después de un periodo de ejercicios sin pesas. Las modalidades de Termoterapia y Electroterapia, los medicamentos antiinflamatorios no esteroides y los masajes pueden proporcionar alivio sintomático. El dolor muscular puede limitar la intensidad de los ejercicios de rehabilitación y el uso de actividades excéntricas agresivos.

# Neurovestibular

Los astronautas experimentan una serie de síntomas vestibulares y sensoriales durante y después del vuelo, incluyendo la ataxia postural, déficits propioceptivos periféricos, contemplan la inestabilidad, oscilopsia, orientación espacial alterada, ilusiones visuales de convección, y los problemas de planificación de motor funcionales. Las exhaustivas pruebas pueden detectar síntomas vestibulares complejos en todos los astronautas dentro de unas pocas horas después de aterrizar.

El mareo por el movimiento en el espacio ha sido comparado pero es diferente a la enfermedad del movimiento terrestre, es causada por la exposición al movimiento de provocación real o aparente y se estima que afecta a 80 a 90 % de todos los miembros de la tripulación cuando se cambian campos gravitacionales. Trastornos neurovestibulares se han atribuido a la integración alterada de las señales central y periférica de varios sistemas sensoriales. Cambio de marcos de referencia visuales, descarga de órganos otolitos y déficits propioceptivos periféricos en microgravedad se cree que juegan un papel clave.

Los trastornos neurovestibulares son comunes en los astronautas después de un vuelo espacial como sistemas sensoriales para readaptarse a la gravedad. Los síntomas más comunes son la torpeza (reportado por 69 % de los astronautas), dificultad para caminar en línea recta (66 %), la persistencia de secuelas de sensaciones (60 %), vértigo al caminar (32 %), vértigo mientras está de pie (29 %), náusea (15 %), dificultad para concentrarse (10 %) y vómito (8 %).

Aunque los síntomas se describen generalmente como leves o moderados, pueden ser suficientes para afectar el bienestar o la seguridad de los astronautas de la misión. En el espacio, problemas de rendimiento neuromotor pondría en peligro a la tripulación durante las salidas de emergencia de un orbitador o podría retrasar los objetivos planificados de construcción con misiones planetarias. Estos síntomas no se han disminuido con las medidas preventivas que se han utilizado hasta la fecha.

Los síntomas son generalmente autolimitados a unas pocas semanas de duración, pueden repetirse de forma intermitente e impredecible durante este tiempo. Estos trastornos paroxístmicos aumentan el riesgo de caídas durante la rehabilitación o en tareas de rutina, como conducir, correr o maniobrar escaleras, acciones motoras que están totalmente automatizadas antes del vuelo pueden requerir una mayor conciencia cognitiva y estímulos visuales para lograr un resultado de motor similar durante readaptation; se deben prescribir programas de ejercicios de rehabilitación necesarios para dar cabida a estas limitaciones impredecibles.

Se están realizando investigaciones para guiar la rehabilitación neurovestibular. El entrenamiento previo al vuelo y medidas preventivas a bordo de los estados duales adaptados están siendo probados. No se conocen medicamentos preventivos. Al igual que en PSOI, situaciones potenciales de alto riesgo se pueden evitar al volver a la Tierra, pero la prevención podría no ser posible en suelos lunares o marcianas en ausencia de personal de rescate en tierra.

## Los riesgos de radiación y rehabilitación

La radiación espacial a bordo plantea amenazas graves e irreversibles a los astronautas actualmente y puede dar lugar a riesgos considerables en misiones interplanetarias. La exposición durante larga duración puede contribuir a formación de catarata, la disfunción del sistema

inmunológico, la esterilidad, daños en el sistema nervioso central, la mutación genética, y algunos tipos de cáncer. Los efectos de la radiación persistente en un astronauta durante la fase de rehabilitación es desconocido hasta la fecha.

Las estrategias para la mitigación de riesgos giran alrededor de blindaje, porque no hay intervenciones de rehabilitación que puedan revertir exposición a la radiación.

## **Estrategias de rehabilitación después del vuelo en curso**

En 1997, la NASA desarrolló un plan de rehabilitación después del vuelo de los tripulantes que regresan de misiones de larga duración. Este documento se basa en los vuelos de corta duración y antes habitados de la Estación Espacial Internacional (EEI). El plan describe personal, equipos, instalaciones y horarios para la rehabilitación. El apoyo médico es supervisado por el cirujano de tripulación y podría implicar la consulta con la medicina física y especialistas en rehabilitación, según sea necesario. En la actualidad, los equipos internacionales que regresan de la EEI inician las actividades de rehabilitación en el lugar de destino, independientemente de su ubicación. Astronautas estadounidenses continúan su rehabilitación lo más pronto posible en Houston, Texas, y los cosmonautas rusos vuelven a Star City, Rusia; vamos a revisar la antigua en detalle. Los astronautas tienen 2 horas/día de tiempo de rehabilitación protegida para los primeros 45 días, durante los cuales las interrupciones de rehabilitación de tiempo (por las apariencias, entrevistas, etc.) deben ser aprobados por las operaciones médicas. El plan de rehabilitación está dividido en cuatro fases.

*Fase 0*, la fase de aterrizaje/regreso, las actividades de las tasas de incorporación de la apertura de transporte de la eclosión hasta la llegada a la base espacial. Esto ocurre generalmente en su totalidad en el día de aterrizaje (volver: 0 días), pero puede incluir al día siguiente (volver: 1 día), dependiendo del sitio ING paisajes terrestres. Las medidas inmediatas están dirigidas a un tratamiento sintomático de la intolerancia ortostática y disfunción vestibular.

*Fase 1*. Sigue del regreso hasta 3 días y se ocupa de los efectos agudos de la readaptación. Las prioridades de esta fase incluyen reposo, tiempo de la familia, apoyo psicológico, evaluación física, el ajuste del ritmo circadiano y la prevención de lesiones. Las actividades físicas comienzan con ejercicios de estiramiento, masajes y marcha asistida según la tolerancia.

*Fase 2*. De los 4 a los 14 días, se centra en el incremento acondicionado físico. Masaje de estiramiento y continúa, en el fortalecimiento progresivo se introduce el uso de dispositivos de resistencia. Los astronautas reciben entrenamiento físico cardiovascular con el uso de banda sin fin y cicloergómetros. La hidroterapia se utilizó al principio y, con base en la profundidad del agua, proporciona niveles graduales de carga de las extremidades inferiores. La fatiga es un problema común durante esta fase y puede requerir periodos de descanso frecuentes. Los astronautas que regresan de los vuelos de corta duración a menudo sienten que han regresado a los niveles basales en la finalización de esta fase.

*Fase 3*. De los 14 a 45 días. El objetivo de esta fase final es la obtención de niveles de verificación previa de la aptitud en la preparación para el estado de retorno al vuelo. La supervisión médica continúa, pero es menos intensa. Las actividades aeróbicas y anaeróbicas siguen, con un mayor énfasis en el entrenamiento propioceptivo y agilidad. El uso de una plataforma de vibración se ha iniciado recientemente para estimular la formación de hueso, aunque su eficacia en la población astronauta necesita ser establecido.

El cirujano a cargo de la tripulación podrá ampliar el programa de rehabilitación en estrecha comunicación con el médico especialista en Medicina Física y Rehabilitación. Cada fase de este plan de rehabilitación se basa en la experiencia de la misión a corto plazo. Cada programa debe ser personalizado para el estado y las preferencias de formación médica de la tripulación. Al inicio de los vuelos, astronautas y médicos especializados en Medicina Física y Rehabilitación pensaron que estos ejercicios y la duración de la rehabilitación eran suficientes para el pleno retorno a la condición física previa al vuelo. Sin embargo, sólo recientemente se han captado las medidas de resultados estandarizadas de fuerza, agilidad, y todo exceso de aptitud antes y después de vuelos de larga duración. Hasta el momento, el número de astronautas que regresan de la EEI ha sido pequeño para extraer conclusiones sólidas. Esperemos que estos datos, aún escasos, con el tiempo se utilicen para establecer un programa de rehabilitación después del vuelo basado en la evidencia.

## **Adaptación a los ambientes cambiantes gravitacionales**

Como se mencionó previamente, parte de este plan de rehabilitación, en cada fase, se basa en la experiencia de misiones a corto plazo. En la aplicación práctica, se personaliza para el estado y las preferencias de formación médica de la tripulación.

Los datos fisiológicos reportados en los vuelos espaciales sugieren que es más difícil volver a la gravedad que adaptarse a la microgravedad. Esto es notable, ya que significa que después de miles de años en la Tierra, los seres humanos pueden adaptarse rápidamente a un entorno excepcionalmente diferente. Sin embargo, después de sólo unas semanas, los seres humanos requieren periodos prolongados y una rehabilitación para la readaptación de vuelta a casa. Los requisitos físicos más exigentes de los viajes espaciales se producen en la transición entre los campos gravitacionales.

Esto tiene implicaciones obvias, no sólo al volver a la Tierra, sino también para establecer colonias en Marte, donde existe la gravedad parcial después de un viaje espacial sin peso. La investigación en la rehabilitación después de un vuelo espacial debería tratar de delinear la aparente plasticidad asimétrica del sistema nervioso humano y capacidad de adaptación homeostática para maximizar el rendimiento funcional de los astronautas durante las transiciones entre tales fuerzas gravitacionales.

Aunque la inversión en medidas tanto en el tiempo y el equipo no puede ser gratificante para los vuelos de corta duración, las medidas preventivas parecen indispensables en vuelos de larga duración. El cumplimiento por el ejercicio de medidas preventivas por el individuo puede correlacionarse con la variabilidad observada en la discapacidad después del vuelo, pero esto debe ser verificado en misiones futuras.

Inevitablemente, eventos médicos inesperados, como lesiones, fracturas o enfermedad médica grave (es decir, requiriendo la intervención quirúrgica), ocurrirán en el espacio. En la órbita baja de la Tierra, los astronautas pueden regresar a tierra para el tratamiento médico y rehabilitación. Esta rehabilitación debe abordar con soltura tanto el problema agudo, como las complicaciones de la readaptación después del vuelo.

Durante la exploración interplanetaria, puede ser necesaria la rehabilitación después de una lesión aguda antes de su reincorporación al servicio activo de vuelo. Podría decirse que esta rehabilitación durante el vuelo será aún más apremiante que su contraparte terrestre debido a

la confianza de la misión de cada miembro de la tripulación. Aunque la redundancia entre los miembros de la tripulación está integrada en todas las operaciones esenciales, cada astronauta aporta habilidades especiales a la misión; la discapacidad de una sola persona entre un pequeño equipo podría tener graves consecuencias en la experimentación científica, pilotaje o, potencialmente, la propia seguridad de la misión. Abortando o rescatar a una misión daría lugar a retrasos y costos extremos. Por estas razones, la estrategia de rehabilitación debe ajustarse con base en el deterioro físico y potencial curativo en condiciones de microgravedad.

Los protocolos de rehabilitación deben estar basados en la evidencia. Las recomendaciones actuales han evolucionado a partir de extrapolaciones de experiencia clínica terrestre con los pacientes y sujetos de reposo en cama. La investigación de la rehabilitación de larga duración de vuelo espacial amplifica las dificultades de la investigación de rehabilitación visto en la Tierra: los tamaños de muestra mínimos (sólo unas pocas personas al año), las intervenciones médicas y terapéuticas variables, las medidas de resultado no estandarizadas, y la disponibilidad limitada de los resultados debido a los problemas de confidencialidad. Los estudios de simulación utilizando modelos basados en la Tierra para imitar la ingravidez (reposo en cama o inmersión en agua) sólo capturan algunas de las adaptaciones fisiológicas de los viajes espaciales.

## Referencias

- Antonutto G, di Prampero PE. Cardiovascular deconditioning in microgravity: Some possible countermeasures. *Eur J Appl Physiol.* 2003;90:283–91.
- Charles JB, Yelle J, Sawin CF. Lessons from operational cardiovascular studies in space. *Med Sci Sports Exerc.* 1996;28(10 suppl):S18–22.
- diPrampero PE, Narici MV. Muscles in microgravity: From fibres to human motion. *J Biomech.* 2003;36:403–12.
- Fitts RH, Riley DR, Widrick JJ. Functional and structural adaptations of skeletal muscle to microgravity. *J Exp Biol.* 2001;204:3201–8.
- Holick MF. Microgravity-induced bone loss—will it limit human space exploration? *Lancet.* 2000;355:1569–70.
- Lambertz D, Perot C, Kaspranski R, Goubel F. Effects of long-term spaceflight on mechanical properties of muscles in humans. *J Appl Physiol.* 2001;90:179–88.
- NASA. Postflight Rehabilitation Plan. Document JSC 27050. Johnson Space Center, NASA, 1997
- NASA, Charles JB. NASA Critical Path Roadmap. National Aeronautics and Space Administration. Disponible en: <http://bioastroroadmap.nasa.gov/index.jsp>
- Payne MWC, Williams DR, Trudel G. Review: space-flight rehabilitation. *Am J Phys Med Rehabil.* 2007;86:583–91.
- Perhonen MA, Franco F, Lane LD, et al. Cardiac atrophy after bed rest and spaceflight. *J Appl Physiol.* 2001;91:645–53.
- Reeves ND, Maganaris CN, Ferretti G, Narici MV. Influence of 90-day simulated microgravity on human tendon mechanical properties and the effect of resistive countermeasures. *J Appl Physiol.* 2005;98:2278–86.
- Tesch PA, Trieschmann JT, Ekberg A. Hypertrophy of chronically unloaded muscle subjected to resistance exercise. *J Appl Physiol.* 2004;96:1451–8.

# 14. Líquidos, electrolitos y función renal en el Espacio

Manuel Antonio Díaz de León Ponce, Armando Alberto Moreno Santillán, Jesús Carlos Briones Garduño

## ■ Introducción

El balance de líquidos y electrolitos en el organismo está regulado por diversos sistemas, donde los riñones juegan un papel fundamental en esta regulación. El estudio de este equilibrio en ambientes de gravedad cero ha sido motivo de estudio e investigación desde el inicio de la era espacial.<sup>1</sup>

## Historia

Otto H. Gauer (1909-1979) [Figura 14.1] y James P. Henry (1914-1996) son considerados los padres del estudio de la composición de líquidos y la regulación renal en el espacio. Ambos investigadores trabajaron en el Wright Air Development Center de Daytona, Ohio, donde después de la Segunda Guerra Mundial se creó un centro de especialización en cohetes, biotecnología, aviación y biomedicina del espacio.



---

**Figura 14.1.**  
Otto H. Gauer



Ambos investigadores pensaron que los viajes espaciales podrían ser considerados una extensión de los vuelos aeronáuticos con ausencia de fuerzas G. En sus estudios predijeron que la ausencia de gravedad del espacio tendría efectos fisiológicos similares a los presentes en inmersión acuática. Los dos principales efectos hemodinámicos son: redistribución del líquido de las extremidades inferiores a los extremos superiores del cuerpo y aumento del volumen de llenado de la circulación intratorácica.<sup>1-3</sup>

Acorde a estos postulados, los cambios en el volumen de agua por redistribución central sería suprimida en el espacio, por lo tanto habría una disminución de la liberación de vasopresina (hormona antidiurética) e indirectamente de aldosterona lo que aumentaría la uresis y la excreción de sodio, con baja del sodio y de la osmolaridad plasmática al disminuir la reabsorción de agua y sodio para dar un balance hídrico negativo.<sup>4,5</sup>

Posteriormente el doctor Oleg G. Gazenko, director del Instituto de Problemas Biomédicos en Moscú, experto, estudió la función renal y el balance hídrico en los astronautas rusos cuyos estudios comenzaron con Yuri Gagarin con los vuelos espaciales del programa Vostok (1961-1963). Una de las principales observaciones del doctor Gazenko fue la incapacidad de los cosmonautas para concentrar orina a largo plazo por pérdida de la osmolaridad plasmática y aparente retención hídrica para mantener el volumen sanguíneo total, lo cual estaría en duda en la actualidad por solo una vuelta orbital y las posteriores de muy poca estancia en el espacio y con el conocimiento actual en la Estación Espacial Internacional.<sup>6,7</sup>



**Figura 14.2.**  
Feto intrauterino

En la etapa embrionaria, los riñones fetales juegan un papel importante en la regulación del volumen de líquido amniótico. La producción de orina inicia entre las cinco a seis semanas de gestación, al desarrollarse el metanefros a partir del pronefros y mesonefros. La nefrogénesis continúa hasta la semana 35, después sólo aumenta el volumen del parénquima renal, mas no se forman nuevas nefronas. La velocidad de filtración glomerular se incrementa conforme avanza la edad intrauterina de manera que de 0.5 a 1 mL/min/m<sup>2</sup> de superficie corporal aumenta de 5 a 10 mL/min/m<sup>2</sup> de superficie corporal en el recién nacido a término. Por ejemplo, la filtración glomerular de un adulto normal de 70 kg de peso y 1.70 m de estatura es de 120 a 140 mL/min. El peso del feto a término en nuestro país es de 2.9 a 3 kg, con 2.4 a 2.5 litros de agua total, o sea de 80 a 90 % de su peso y a las 48 h disminuye hasta 500 g el peso por aumento de diuresis y la excreción de solutos.<sup>8</sup>

Es decir, durante la etapa intrauterina inicial y debido al ambiente proporcionado por el líquido amniótico, el embrión se encuentra en un estado físico similar a la gravedad cero, por lo que podríamos afirmar que desde la etapa embrionaria nos preparamos para la vida en gravedad cero (Figura 14.2), igual que un astronauta en su traje espacial (Figura 14.3).

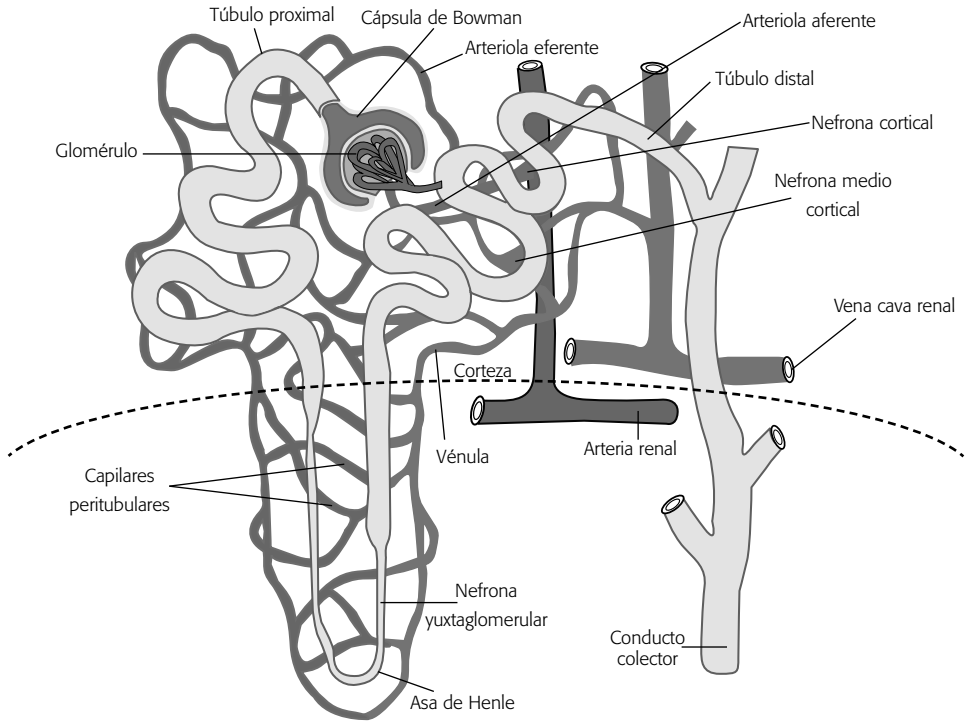
Por otra parte cuando se inició el estudio de los líquidos y electrolitos y la función renal, se desconocía lo que se descubrió en los dos últimos decenios del siglo pasado que anatómicamente en el riñón había tres tipos de nefronas: las corticales que representaban 60 a 70 %; de 10 a 15 % de nefronas medio corticales y el resto de nefronas yuxttaglomerulares (Figura 14.4).

Además, el riñón autorregulaba su flujo sanguíneo en estas nefronas lo cual se estudió con radioisótopos Xe y Kr encontrando que a nivel cortical el flujo podía ser de cero y en cambio en las nefronas medio corticales y yuxttaglomerulares podían mantener normal o mayor a lo previamente existente en caso de baja del volumen sanguíneo o del gasto cardiaco (Figuras 14.5 y 14.6).

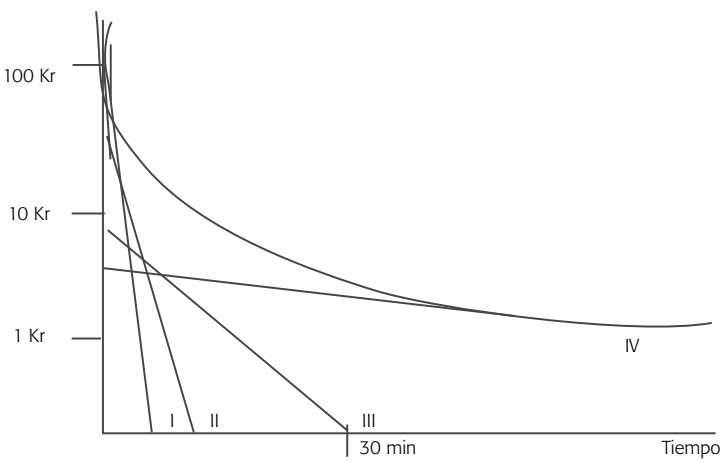


---

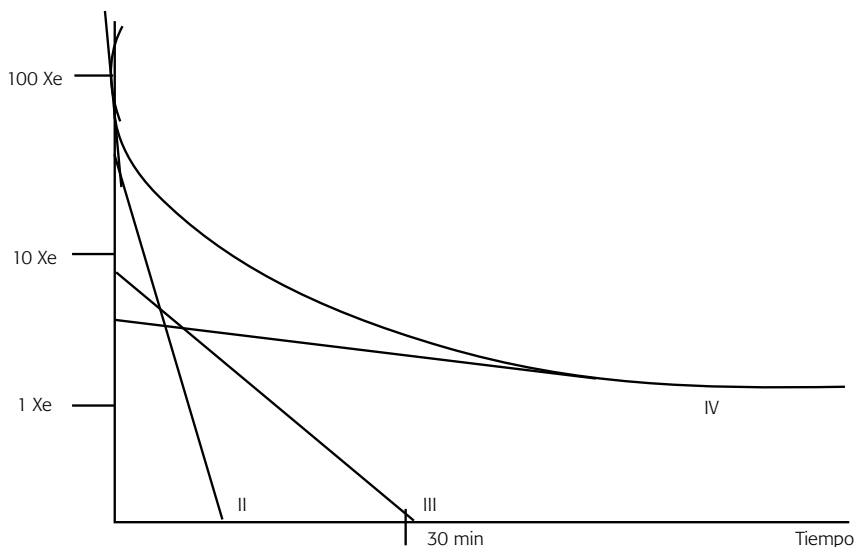
**Figura 14.3.**  
Astronauta en el espacio



**Figura 14.4.**  
Nefronas.



**Figura 14.5.**  
Flujo en un riñón normal con Kr que muestra cuatro zonas.



**Figura 14.6.**  
Flujo en un riñón anormal que muestra ausencia del flujo I que corresponde a las nefronas corticales.

Por otra parte el riñón, para mantener sus funciones, que son cuatro: filtración, excreción, secreción y reabsorción, necesita a su vez tres funciones hemodinámicas: gasto cardiaco adecuado entre 4.5 a 5 L/min, un volumen sanguíneo de 4.5 a 5 L/min y una saturación de  $O_2$  de 90 % o más. En gravedad cero poco se afectan estas funciones y el riñón las puede soportar por lo ya referido, por su estructura y autorregulación. Aunque se ha especulado mucho sobre alteraciones del metabolismo del calcio, del sodio y otros elementos, ningún astronauta ha desarrollado litiasis renal, osteoporosis y sólo hay discreta pérdida de masa muscular por disminución de la fuerza, pero se ha visto que con ciertos ejercicios se logra una mejoría adecuada.<sup>9,10</sup>

La regulación de los líquidos y electrolitos en los humanos está modulada por las fuerzas gravitacionales a través de una compleja interacción de las respuestas cardiovasculares, variables neuroendocrinas, factores físicos y la función renal. El concepto de cómo la gravedad y la falta de peso afecta la regulación de líquidos y su relación con los componentes sanguíneos ha sido motivo de estudio desde el inicio de los viajes espaciales, sin embargo, hasta nuestros días no se han entendido por completo los mecanismos de regulación fisiológica.

Durante los viajes espaciales de larga duración se han observado fluctuaciones diarias del volumen sanguíneo, a medida que el eje del cuerpo cambia de posición. Estas fluctuaciones afectan las tasas de excreción de sodio urinario.<sup>11-13</sup>

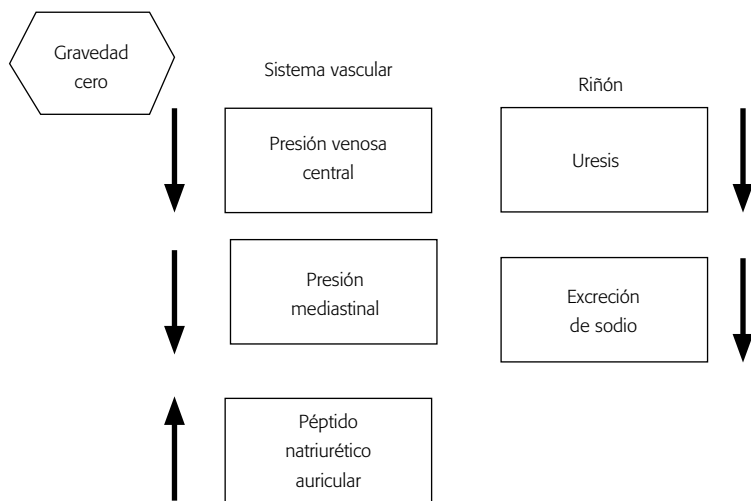
La concentración de electrolitos en la sangre y los tejidos determina su tasa de excreción urinaria. Si la concentración de electrolitos es elevada, esto será percibido por los receptores osmolares en el hipotálamo, lo que provocará un aumento en la ingesta de agua y la consecuente reducción en su excreción renal; este mecanismo se presenta a la inversa si las concentraciones de electrolitos disminuyen. Los sistemas de regulación osmolar son sensibles a los cambios

gravitacionales.<sup>14,15</sup> En sistemas libres de gravedad se da una disminución en la excreción urinaria de agua y sodio, para lograr mantener una adecuada presión sanguínea hacia el cerebro, estos ajustes son mediados por los mecanismos de regulación inducidos por los cambios constantes de posición, debidos a la ausencia de gravedad, que inducen cambios en la excreción de agua y sodio. Los resultados de los estudios en astronautas en viajes espaciales en los últimos 20 años han demostrado que durante la estancia espacial no existe aumento en el volumen urinario, de hecho son menores a los registrados previos a la salida de la misión espacial. Una de las explicaciones para este fenómeno es que la regulación hídrica en el espacio está afectada por la disminución en la evaporación, hidratación oral y excreción renal.

Aunque en los últimos años se ha avanzado en la investigación biomédica del espacio, las características de la función renal no han sido del todo entendidas. Algunos estudios han demostrado que contrario a lo esperado, la excreción urinaria de albúmina se encuentra disminuida en un 27% en comparación con las condiciones previas al vuelo.<sup>14,16</sup>

A pesar de que es necesario realizar más estudios para entender el comportamiento de la tasa de filtración glomerular, los cambios en la presión hidrostática glomerular y la selectividad glomerular a la filtración de las macromoléculas, al día de hoy podemos entender algunos conceptos básicos de la fisiología renal en los vuelos espaciales: la producción de orina no se encuentra aumentada, la excreción de sodio está disminuida, la respuesta fisiológica a los péptidos natriuréticos se encuentra atenuada y la actividad del sistema nervioso parasimpático está aumentada.

En la adaptación renal en las primeras horas de vuelo espacial se ha documentado una disminución de la uresis y de la excreción de sodio, con un balance hídrico y de sodio negativos. Además hay una reducción del volumen plasmático de 17%, y un estado de vasodilatación sistémica con cambios fluctuantes en la permeabilidad vascular<sup>16,17</sup> (Figura 14.7)



**Figura 14.7.**  
Adaptación renal en las primeras horas del vuelo.

## Nuevos horizontes

En el área de la investigación biomédica en el espacio siempre existen nuevas interrogantes y horizontes por descubrir. En el ámbito de la función renal se necesitan nuevos simuladores que nos permitan entender aspectos básicos de la fisiología renal en ambientes libres de gravedad. Las principales incógnitas que representan un reto inmediato para la investigación de la función renal en el espacio son:

*¿Por qué el organismo activa los mecanismos de retención hídrica y de sodio durante los vuelos espaciales?*

*¿Por qué las respuestas renales a los estímulos de electrolitos y agua están modificadas?*

La contestación estaría que esto no sucede porque genéticamente el ser vivo que se desarrolló en el planeta azul y cuando emergió del agua para transformarse en *homo sapiens*, se ha preparado para emigrar a otros mundos pero esperamos que así como se adaptó a nivel renal lo haga mentalmente, como puede ser sublime en el arte (Figura 14.8), no cometa las mismas atrocidades de que es capaz<sup>10</sup> (Figura 14.9).



**Figura 14.8.**  
Capilla Sixtina.



**Figura 14.9.**  
Bomba atómica de Hiroshima.

## Referencias

1. Henry JP, Gauer OH, Reeves JL. Evidence of the atrial location of receptors influencing urine flow. *Circ Res.* 1956;4:85-90.
2. NASA. Medicine, machines, and manned flight. [www.history.nasa.gov/SP-4213/ch1.htm](http://www.history.nasa.gov/SP-4213/ch1.htm). 2003.
3. Graveline DE, McCally M. Body fluid distribution: implications for zero gravity. *Aerosp Med.* 1962;33:1281-90.
4. Leach CS, Alexander WC, Johnson PC. Endocrine, electrolyte, and fluid volume changes associated with Apollo missions, Chap. III-1. En: Johnston RS, Dietlein LF (ed). *Biomedical results of Apollo*. Washington DC: US Government Printing Office; 1975; pp. 163-84.
5. Leach CS, Rambaut PC. Biochemical responses of the Skylab crewmen: an overview. Chap. 23. En: Johnston RS, Dietlein LF (ed). *Biomedical results from Skylab*. Washington DC: US Government Printing Office; 1977: pp. 204-16.
6. Grigoriev AI, Morukov BV, Vorobiev DV. Water and electrolyte studies during long-term missions onboard the space stations SALYUT and MIR. *Clin Investig.* 1994;72:169-89.
7. Natchin Y, Grigoriev AI, Noskov VB. Mechanism of post-flight decline in osmotic concentration of urine in cosmonauts. *Aviat Space Environ Med.* 1991;62:1037-43.
8. Muñoz AR, Morales MJ, Madeiros DM. Fisiología renal del feto y el recién nacido. *Bol Med Hosp Infant Mex.* 1998;55(3):156-63.
9. Díaz de León PM, Briones GJC, Aristondo MG. Síndrome de insuficiencia renal aguda. México: Ed. Prado; 2015: pp. 3-17.
10. Díaz de León PM. Conferencia de la función renal en gravedad cero 1º congreso Mexicano de medicina espacial 2015. 13,14 agosto 2015, San Luis Potosí, SLP. México.
11. Heer M, De Santo NG, Cirillo M, Drummer C. Body mass changes, energy, and protein metabolism in space. *Am J Kidney Dis.* 2001;38:691-5.
12. Drummer C, Hesse C, Baisch F. Water and sodium balances and their relation to body mass changes in microgravity. *Eur J Clin Invest.* 2000;30:1066-75.
13. Drummer C, Norsk P, Heer M. Water and sodium balance in space. *Am J Kidney Dis.* 2001;8:684-90.
14. Cirillo M, De Santo NG, Heer M. Low urinary albumin excretion in astronauts during space missions. *Nephron Physiol.* 2003;93:102-5.
15. Kramer HJ, Heer M, Cirillo M, De Santo NG. Renal hemodynamics in space. *Am J Kidney Dis.* 2001;38:675-8.
16. Leach CS, Alfrey CP, Suki WN. Regulation of body fluid compartments during short-term spaceflight. *J Appl Physiol.* 1996;81:105-16.
17. Norsk P, Christensen NJ, Drummer C. Unexpected renal responses in space. *Lancet.* 2000;356:1577-8.

# 15. Nutrición en el Espacio

Adriana Denise Zepeda Mendoza, Raúl Carrillo Esper

## ■ Nutrición y microgravedad

La alimentación de los primeros astronautas de la NASA es un testimonio de su fortaleza. John Glenn fue el primer hombre de Norteamérica que comió en un estado de microgravedad, lo cual no fue nada fácil, además de contar con un menú limitado; él, al igual que los astronautas de la expedición Mercury tuvieron que basar su alimentación en cubos del tamaño de un bocado, polvos liofilizados y dietas semilíquidas envasadas en tubos de aluminio. La mayoría de los alimentos eran poco apetecibles, los alimentos liofilizados eran difíciles de rehidratar y los polvos en microgravedad quedaban pegados por la nave, desde entonces se han desarrollado múltiples tecnologías y estudios sobre los requerimientos calóricos de los astronautas y conservación de los alimentos.

En los últimos 40 años los seres humanos se han adaptado bien a los vuelos espaciales, existe mayor comprensión de los cambios fisiológicos que ocurren durante y después del vuelo y esto ha favorecido la investigación en la ciencia de los alimentos, como parte integral de muchos otros aspectos de la medicina espacial, incluida salud psicológica, el sueño y su relación con el ciclo circadiano, exposición a la radiación, cambios en los líquidos corporales, cicatrización de heridas, cambios en los sistemas musculoesquelético, neurosensorial, gastrointestinal, hematológico, e inmunológico, entre otros. Estos estudios se han encaminado en asegurar la salud humana y la supervivencia durante vuelos espaciales, sobre todo los de larga duración.

A lo largo de la historia hemos sido testigos de la evolución de la nutrición en el espacio, con un gran trabajo en equipo y un esfuerzo sobresaliente, el proyecto Mercurio fue el primer programa espacial de Estados Unidos que envió seres humanos al espacio, Alan Shepard fue el primer estadounidense en el espacio. Su viaje duró tan sólo 15 minutos y 28 segundos, este primer vuelo fue suborbital; menos de 1 mes después del vuelo de Yuri Gagarin, primer astronauta ruso en el espacio.

A pesar de que se estaba en el espacio por un corto periodo (108 minutos, para ser exactos), esto fue un gran paso que abrió el camino para los futuros programas espaciales. El programa Mercurio finalizó con el astronauta Gordon Cooper, realizando 22 órbitas alrededor de la Tierra y permaneciendo en el espacio durante todo un día (un poco más de 34 horas), ya para este tiempo era necesario llevar alimento a los vuelos cuyo diseño del envase cubrió los requisitos en ese tiempo y no permitió que ningún alimento contaminara la cabina. Sin embargo, el consumo de alimentos de los tubos no permitía a los astronautas ver ni oler la comida mientras se consumía y la textura de los alimentos se limitó a papillas que pudieran ser introducidas a través del orificio del tubo (Figura 15.1).





**Figura 15.1.**  
Forma de empaquetar los alimentos en el proyecto Mercurio, con base en dietas líquidas o semilíquidas en tubos.



**Figura 15.2.**  
Alimentos utilizados en las primeras misiones con base en papillas y pequeños bocados con alto valor calórico.

Además de los alimentos en tubo, se incluyeron los alimentos en cubos para estas misiones. Los cubos eran del tamaño de un bocado, eran una mezcla rica en calorías a base de proteínas, grasas, carbohidratos y frutos secos (Figura 15.2).

El proyecto Géminis fue creado por la NASA con el objetivo de llegar a la Luna. Éste incluía dos astronautas por misión y durante este proyecto, debido a que los viajes eran cada vez mas largos, su dieta consistía en 2 500 kcal por día, se restringió en peso y volumen; por lo tanto, se hizo hincapié en alimentos concentrados. Se incluye por primera vez alimentos como coctel de camarón deshidratado, papillas de pollo y vegetales y puré de manzana<sup>1</sup> (Figura 15.3).

Sin duda alguna el proyecto Apolo cambió el rumbo de la historia en 1969, cuando la tripulación del Apolo 11 aterrizó en la Luna, el 20 de julio de 1969. Neil Armstrong transmitió por radio las primeras palabras desde la Luna: “Houston, aquí base en tranquilidad; el águila ha aterrizado”. Un poco menos de 7 horas después, se dieron los primeros pasos fuera del módulo lunar y proclamó: “Este es un pequeño paso para el hombre, pero un gran salto para la humanidad”.

Los astronautas del Apolo fueron los primeros en tener agua caliente para hidratar sus alimentos en el espacio y la variedad de alimentos aumentaron. En la Navidad de 1968, la tripulación del Apolo 8 comió pavo y salsa de carne y por primera vez comieron con cucharas, así como rebanadas de pan con crema para untar y pastas de queso cheddar e incluso salchichas y jugos de fruta también se añadieron al menú<sup>1</sup> (Figura 15.4).

El proyecto Skylab fue la primera estación construida por Estados Unidos, donde uno de los objetivos era crear un lugar donde los astronautas pudieran vivir por largos periodos y realizar experimentación científica. El Skylab incluyó el estudio más costoso sobre el metabolismo que hasta la actualidad sigue siendo vigente para el cálculo nutricional de los astronautas, cuenta con una área de cocina con mesa, refrigerador y congelador para almacenar los alimentos por lo cual su menú de alimentación aumentó hasta tener 72 diferentes alimentos, incluidos carne y helado de vainilla (Figura 15.5).

Ya en el transbordador espacial las misiones tienen una duración de 5 a 16 días, con por lo menos 8 astronautas. Cuentan con una área de baño y cocina, los astronautas preparan su propia comida, cuenta con un dispensador de agua caliente o fría, pueden calentar sus alimentos y hasta hornear sus propias galletas.



**Figura 15.3.** Ya para el proyecto Géminis se agregan alimentos hidratables y mayor variedad.



**Figura 15.4.**  
Alimentos del proyecto Apolo, se observan ya alimentos empaquetados como sándwiches.



**Figura 15.5.**  
Alimentos de Skylab, con latas en un dispositivo que genera calefacción para su consumo, observamos a los astronautas consumiendo sus alimentos en Skylab.

Los astronautas elegían un menú de 7 días, éste incluía alimentos de uso común, que son empaquetados de forma especial y pueden utilizarse después de ser reconstituidos con agua, lo cual les permite una mayor duración y variedad. Además de agregar popotes unidireccionales que evitan que debido a la microgravedad salga el líquido cuando no lo están consumiendo (Figura 15.6).

El programa Mir fue una serie de misiones espaciales realizadas de 1994 a 1998. Se componía de 11 astronautas en el transbordador, rusos y estadounidenses, cuyos objetivos eran aprender cómo trabajar con socios internacionales, adquirir experiencia de vivir en el espacio durante largos periodos y estudiar los cambios fisiológicos de la microgravedad así como experimentos científicos relacionados con la biología y el medio ambiente de la Tierra.

Los miembros de la tripulación a bordo del Mir podían seleccionar entre comida estadounidense o rusa. El astronauta Andy Thomas describió la comida de esta manera:

*«Los alimentos rusos eran realmente buenos, las sopas rusas eran simplemente excepcionales. Fue en realidad una buena selección de comida, en verdad la comida enlatada y los alimentos rehidratables son los que se pueden utilizar en un viaje de campamento».*

La Estación Espacial Internacional (EEI) es un entorno gigante que se construyó para vivir y trabajar en el espacio. La EEI (ISS en inglés) fue construida en secciones denominadas “módulos”. El primer módulo se puso en marcha en 1998 y la construcción de la EEI se terminó en 2011, desde noviembre de 2000, astronautas de diferentes países viven ahí y sus alimentos son rehidratables, termoestables o en forma natural.

Los miembros de la tripulación de la EEI comen alimentos internacionales, como ellos provienen de diferentes países, la mitad de los alimentos a bordo son alimentos estadounidenses y



**Figura 15.6.**

En el transbordador espacial los astronautas eligen sus alimentos antes de los vuelos, son empaquetados en charolas para su consumo.



**Figura 15.7.**

Los alimentos que comen los tripulantes a bordo de la Estación Espacial Internacional no son misteriosos, son alimentos preparados en la Tierra. Los astronautas seleccionan sus propios menús a partir de una gran variedad de productos alimenticios.

la mitad son alimentos rusos, japoneses, europeos y canadienses, actualmente tienen más de 300 artículos de comida para elegir (Figura 15.7).

Preparar la comida en microgravedad es un reto, no está permitido que queden migajas, ya que pueden flotar por la cabina y podrían dañar el ojo o la nariz de algún astronauta o tapan las salidas de aire. Además, la comida no debe salir volando mientras un astronauta está tratando de comer, por lo que los paquetes y los alimentos están diseñados para hacer de este un problema menor. Otro reto para los desarrolladores de sistemas en nutrición es la generación de basura. Los envoltorios y envases vacíos deben ser compresibles para reducir al mínimo la cantidad de basura en la nave espacial. De hecho, la basura se elimina sólo cuando los vehículos espaciales, como el transbordador espacial, las cápsulas Soyuz y otros vehículos de carga, visitan la EEI, esto ocurre aproximadamente una vez al mes, e incluso estos vehículos tienen espacio disponible

limitado, por lo que la basura debe ser lo más compacta posible. Estos son sólo algunos de los desafíos del desarrollo de alimentos espaciales.

El almacenamiento de alimentos es un gran problema para los viajeros espaciales. Hasta hace poco, la EEI no tenía congeladores o refrigeradores para alimentos, así que la comida ha tenido que ser “estable” y no se debe descomponer (“echarse a perder”) por lo menos durante 6 a 12 meses. Para la misión del viaje a Marte el almacenamiento de los alimentos tendrá que ser estable durante un máximo de 5 años. Recientemente, un pequeño refrigerador-congelador conocido como MERLIN (por sus sigas en inglés del experimento de incubación e investigación en microgravedad) fue trasladado a la EEI y se puede utilizar para almacenar una pequeña cantidad de alimentos frescos y bebidas. Esto es especialmente útil para las bebidas, que hasta ahora habían estado a temperatura ambiente.

El sabor y la textura de los alimentos son muy importantes para los astronautas. Múltiples pruebas de sabor se llevan a cabo en tierra cuando los alimentos nuevos se están desarrollando para emplearse en el espacio, ya que debido a la adaptación que sufre el cuerpo durante los vuelos espaciales, algunos astronautas han informado que sus gustos cambian y que en el espacio algunas veces presentan congestión nasal similar a cuando se tiene un resfriado, lo cual es problemático sólo los primeros días de vuelo, ya que después de una o dos semanas, desaparece.

Antes de cada misión, los astronautas seleccionan sus alimentos favoritos de los productos disponibles en vuelo. La comida espacial más popular es el coctel de camarones, en parte debido a la salsa picante, lo cual ayuda a disminuir la congestión nasal. Otro reto en el desarrollo de alimentos espaciales es asegurarse de que son sabrosos, tienen un adecuado contenido de nutrientes y puedan prepararse fácilmente.

Los científicos del Laboratorio de Alimentos y Sistemas del Centro Espacial Johnson, han desarrollado tortillas especiales que mantienen buen sabor después de casi un año. Con las tortillas en el espacio se pueden preparar sándwich en rollo (un sándwich regular con dos rebanadas de pan tomaría tres manos para prepararlo o de lo contrario una rebanada flotaría lejos). Los científicos mantienen estas tortillas frescas por un almacenaje especial que incluye un eliminador de oxígeno que impide el crecimiento de moho.

Algunos alimentos espaciales son radiados para su conservación. Estos alimentos son envasados y luego expuestos a una fuente de radiación que mata cualquier bacteria en la comida, permitiendo que sea seguro para comer durante un largo tiempo. Existen formas de radiación cósmica, que llegan a través de la pared de la nave espacial lo cual, además de ser una preocupación para la salud de los astronautas, también es una preocupación por la comida, ya que esta radiación puede afectar a las vitaminas y los nutrientes de los alimentos antes de que sean consumidos, lo que podría modificar su sabor o que aportaran menor cantidad de beneficios de lo habitual. Por lo que se tendrá que encontrar la manera de blindar mejor los alimentos, ya sea por sistema de almacenamiento en forma individual o haciendo contenedores protectores grandes, que podrían utilizarse para muchos productos alimenticios.

## Requerimientos nutricionales y cambios fisiológicos en microgravedad

La exposición a microgravedad produce efectos fisiológicos sobre múltiples sistemas. Los líquidos corporales sufren un cambio compartimental de las extremidades inferiores hacia el tórax y

cabeza, existe pérdida de masa corporal, desmineralización ósea, disminución de hematocrito que condiciona cambios en el metabolismo de múltiples nutrientes, cambios endocrinos que afectan al sistema nervioso simpático, pérdida de líquidos y electrolitos que generan disminución del apetito y de los requerimientos calóricos calculados.<sup>1</sup>

Los requerimientos energéticos son estimados con base en los requerimientos basales de energía (RBE) para misiones espaciales, se calculan desde 2002 por el Instituto de Referencia e Informes de Ingesta Dietética, usando un factor de corrección de 1.25 de acuerdo con edad, masa corporal y altura con las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned} \text{Mujeres: } & 354 - 6.91 \times \text{edad} + 1.25 \times (9.36 \times \text{peso}) + 726 \times \text{altura}(m) \\ \text{Hombres: } & 622 - 9.53 \times \text{edad} + 1.25 \times (15.9 \times \text{kg}) + 539.6 \times \text{altura}(m) \end{aligned}$$

Basados en la actividad del astronauta se estima que sus requerimientos energéticos son de 2 300 a 3 200 kcal/día. Agregando 500 kcal/día por cada día de actividad fuera de la nave<sup>2</sup> (Cuadro 15.1)

El sistema de alimentación de la Estación Espacial Internacional es un menú cíclico de 6 a 10 días, antes de la misión los astronautas participan en una sesión de sabor y los nutriólogos planean su dieta de acuerdo con sus gustos y necesidades nutricionales para el viaje. Ya en la misión los astronautas realizan semanalmente un cuestionario de frecuencia de comida, diseñado para obtener en tiempo real un estimado de lo que consumen en energía, proteínas, agua, sodio, calcio, hierro y vitaminas. La masa muscular es medida antes, durante y después del viaje así como la composición mediante biomarcadores de laboratorio para saber si el astronauta está recibiendo los nutrimentos necesarios ya que se calcula que consumen sólo de 60 a 70 % de los requerimientos energéticos indispensables y podría reducirse aún más la masa muscular de los astronautas en los viajes.<sup>3</sup>

## Sistemas de almacenamiento

Numerosas publicaciones sobre los sistemas de alimentación en el espacio han documentado la evolución de la comida espacial desde los primeros viajes hasta la actualidad. Existen varios tipos de alimentos y bebidas envasadas que se han utilizado en los programas espaciales de la NASA, pero el sistema de almacenamiento ha sido casi constante. Con excepción de Skylab, no se contaba con algún sistema de refrigeración o congelador para el almacenamiento de alimen-

### Cuadro 15.1.

Requerimientos nutricionales para una misión de traslado típica y como se realiza la distribución para viajes mayores a 30 días

Nutriente	Cantidad	Viajes mayores a 30 días
Proteínas	0.8 g por día por kilogramo	10 - 25 g/día
Carbohidratos	350 g por día	12 - 15%
Lípidos	Lípidos 77- 103 g por día (menos de 30% de calorías)	30- 35 %
Kilocalorías	2 300 - 3 100	Líquidos: 1.5 mL/kcal (> 2 L/día)

tos. Por lo tanto, la comida se proporcionaba en una forma estable para su almacenamiento a temperatura ambiente. Para asegurar la estabilidad la comida debe pasar por inactivación de los microorganismos durante procesos de esterilización y empaquetamiento que proporcionen un sistema de inocuidad de los alimentos, este nivel de procesamiento puede reducir la calidad de la comida, incluyendo el contenido nutricional y aceptabilidad.<sup>4</sup>

Las principales vías por las que se logra este almacenamiento de los alimentos se describen en seguida.

- *Termoestabilización*: en este proceso se calientan los alimentos a una temperatura que sea libre de microorganismos patógenos, esporas y la actividad enzimática. Los alimentos incluyen sopas, rebanadas, postres, budines y colaciones
- *Radiación*: no suele utilizarse de forma rutinaria para la conservación de alimentos de tipo comercial, sin embargo la FDA autorizó su uso para la conservación de comida en el espacio
- *Deshidratación*: por medio de secado por congelamiento los alimentos pueden ser rehidratados en las naves usando agua potable, por ejemplo: ejotes, pan de elote o cereales
- *Forma natural*: localizados en estantes fijos se puede llevar almendras, nueces, *brownies*, fruta seca, la cual es sometida a un proceso de reducción de agua e inhibición de crecimiento bacteriano para su almacenamiento
- *Cereales de almacenamiento prolongado*: como bisquet, waffles, tortillas o bolitas de pan, pueden ser almacenados para una duración de 18 meses
- *Comida fresca*: incluye frutas y vegetales que se pueden consumir las primeras semanas del viaje
- *Bebidas*: pueden contener agua potable, café, te, limonada o naranjada, las mezclas de bebidas se pesan y luego son selladas al vacío dentro de una bolsa con popote para su almacenamiento

Actualmente las misiones se extienden cada vez más, por lo que el sistema de almacenamiento debe evolucionar para que los astronautas cuenten con un sistema que dure entre 3 a 5 años, conservando el valor nutricional y el sabor hasta el día de su consumo, en contraste con el sistema actual que permite un almacenamiento promedio de 18 meses.

Estos cambios de basan en 5 puntos importantes:

- densidad nutricional por grupo de alimentos
- estabilidad para almacenamiento prolongado
- alimentos que permitan su cocción en microgravedad, con el mínimo riesgo de contaminación
- alimentos duraderos que conserven su valor nutricional
- desarrollo de sistemas de empaquetamiento con material que genere una buena barrera y mínimo espacio<sup>5</sup>

## Manejo de agua en el espacio

Durante los viajes espaciales el agua debe ser procesada para que se utilice ya sea como agua potable o para higiene personal, ésta se obtiene por condensación atmosférica o por el proceso de recuperación del agua de desecho mediante destilación y filtración.





**Figura 15.8.** Astronautas de la Estación Espacial Internacional tomando agua obtenida mediante el sistema de purificación. (NASA.)

La NASA ha creado un sistema que ha sido diseñado durante años el cual permite reciclar la orina de los astronautas transformándola en agua potable.

Para llevar a cabo el proceso y lograr la purificación se deben de eliminar todas las bacterias y virus que contenga el agua.

El proceso consta de tres etapas que se mencionan a continuación.

1. En la primera el flujo de agua atraviesa un filtro para retener las partículas de mayor tamaño
2. Posteriormente, atraviesa unos lechos que poseen en su superficie sustancias capaces de retener diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos
3. Finalmente el agua se trata en el interior de un reactor de oxidación catalítica donde son destruidos los virus y las bacterias

De esta manera es como se obtiene agua potable, que por inverosímil e impresionante que



**Figura 15.9.**  
El astronauta Koichi Wakata, cerca de alimentos y bebidas envasadas que se encuentran flotando libremente en la Estación Espacial Internacional. (NASA.)

parezca, esta agua que consumen los astronautas es más limpia que la que bebemos la mayoría de la gente en la Tierra<sup>6</sup> (Figuras 15.8 y 15.9).

Una adecuada nutrición es importante para la salud en tierra como en el espacio, las próximas misiones tendrán una duración de años por lo que los alimentos que se diseñen deben ser nutritivos, de poco volumen, de sabor agradable y factibles de reducir la generación de basura, para minimizar los efectos de la microgravedad, mantener la salud y evitar la desnutrición durante estos largos viajes.

# Referencias

- Bourland CT, Smith MC. Selection of human consumables for future space missions. *Waste Manage Res*. 1991;9:339-44.
- Drummer C, Gerzer R, Baisch F, Heer M. Body fluid regulation in microgravity differs from that on Earth: an overview. *Pflugers Arch*. 2000;441:66-72.
- Institute of Medicine. Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein, and amino acids (macronutrients). Washington, DC: National Academy Press; 2002.
- Perchonok M, Bourland C. NASA food systems: past, present, and future. *Nutrition*. 2002;18:913-20.
- Stoklosa A. Packaged food mass reduction trade study. Washington, D.C: NASA Advanced Capabilities Division Research & Technology Task Book. 2010.
- Zwart SR, Launius RD, Coen GK, Morgan JLL, Charles JB, Smith SM. Body mass changes during long duration spaceflight. *Aviat Space Environ Med*. 2014;85:897-904.

# 16. Medicina reproductiva y microgravedad

Jesús Carlos Briones Garduño, Berenice Zavala Barrios,  
Manuel Antonio Díaz de León Ponce, Ángel Augusto Pérez Calatayud

*La gravedad es una parte tan asumida de nuestras vidas, que raramente pensamos en ella, a pesar que afecta todo lo que hacemos.*

## ■ Antecedentes

El concepto de Salud sexual y reproductiva se define por el Fondo de Población de Naciones Unidas como un “Enfoque integral para analizar y responder a las necesidades de hombres y mujeres respecto a la sexualidad y la reproducción”.

Por definición, la Medicina Reproductiva es

*“estado general de bienestar físico, mental y social y no de mera ausencia de enfermedad o dolencia, en todos los aspectos relacionados con el sistema reproductivo y sus funciones y procesos. Entraña además la capacidad de disfrutar de una vida sexual satisfactoria y sin riesgos, y de procrear, y la libertad para decidir hacerlo o no hacerlo, cuándo y con qué frecuencia”<sup>1</sup>*

Gracias a las técnicas de reproducción asistida, se ha logrado conocer acerca de métodos naturales y artificiales para regular la fertilidad.<sup>2</sup> Desde métodos biomédicos naturales como la deposición de semen en la vagina, progresión de los espermatozoides a través de las vías genitales femeninas, la capacitación de los espermatozoides después del eyaculado, fertilización del óvulo por el espermatozoide, etcétera, han revolucionado la tecnología de manipulación biológica.

El espacio es un lugar muy hostil para el ser humano y hablando de microgravedad se requeriría viajar lo suficientemente lejos al espacio exterior a fin de mantener en cero el peso para evaluar todos los aspectos que se implican en la reproducción en gravedad cero.

En la actualidad, existen resultados de sólo seis experimentos de vuelos espaciales con *Arabidopsis thaliana*, una planta de la que se pretende generar flor y fruta en órbita. La morfogénesis de órganos genitales normalmente se produce en condiciones de microgravedad, pero a diferencia del control en tierra, los brotes y las flores contienen elementos estériles del androceo y gineceo que degeneran en diferentes etapas de desarrollo en condiciones de microgravedad. Se sugiere como hipótesis para explicar el desarrollo reproductivo anormal en microgravedad:

1. la deficiencia nutricional
2. la insuficiencia de luz

3. la intensificación de la influencia de los factores mencionados por la microgravedad
4. las perturbaciones de naturaleza hormonal
5. la ausencia de polinización y la fertilización

Una de las líneas de investigación actuales de los biólogos espaciales es encontrar la manera de probar estas hipótesis y la obtención de semillas viables en condiciones de microgravedad.<sup>3</sup>

## Microgravedad y reproducción en mamíferos

A lo largo de la filogenia del desarrollo de las especies, su estructura celular y función, el desarrollo de sistemas de órganos, e incluso el comportamiento de regulación de la expresión de genes de mamíferos, tiene implicaciones significativas para la procreación exitosa en un entorno extraterrestre.

Un estudio realizado con modelos murinos sobre la reproducción de los mamíferos en condiciones de microgravedad demostró que a pesar de que el feto se desarrolla adecuadamente, una vez expuesto a la gravedad normal, los productos que fueron criados en condiciones de microgravedad carecían de la capacidad de enderezarse.<sup>4</sup> Se estudiaron los efectos de la simulación de la microgravedad en la maduración de ovocitos de ratón, los cuales se cultivaron *in vitro* con microgravedad simulada por un biorreactor recipiente de pared giratorio y se midió la tasa de maduración. La conclusión de este estudio menciona que la microgravedad simulada por el modelo inhibe la maduración de los ovocitos en ratas.<sup>4</sup>

En otro estudio se examinó la fertilización de embriones de ratón en condiciones de microgravedad. Aunque ambos grupos resultaron en ratones sanos, una vez implantado en la gravedad normal, los autores observaron que la tasa de fertilización fue menor para los embriones fecundados en condiciones de microgravedad que para los de la gravedad normal.<sup>5</sup>

La progresión de la profase durante la primera división meiótica puede obtenerse en cultivo mediante el tratamiento de espermatoцитos de ratones, con el ácido okadaico, un inhibidor de la fosfatasa de serina/treonina. El estudio de Di Agostino<sup>6</sup> demostró que con el uso de este medicamento, la activación de la vía de MAPK, la cual causa la activación del Nek-2 y la fosforilación de la cromatina arquitectónica de la proteína Hmg2, podría lograr la progresión de los espermatoцитos al liberar el bloqueo que inhibe a los mismos de avanzar a través de la profase en la unidad de gravedad.

## Microgravedad y reproducción en humanos

Es imperativo para estudiar cómo el entorno espacial afecta a las fases críticas de la reproducción y el desarrollo de los mamíferos, así como los eventos que rodean la fertilización, la embriogénesis, el embarazo, el nacimiento, la maduración posnatal, y cuidado de sus padres.<sup>7</sup>

Un estudio realizado en varones demuestra que la simulación de microgravedad puede inducir la apoptosis de las células de la espermatogénesis y el daño del DNA de los espermatozoides con la subsecuente disminución de la fertilidad masculina en el entorno espacial. Estos hallazgos pueden proporcionar una base científica para la protección de los astronautas y la salud y seguridad del viajero del espacio.<sup>8</sup>

Los datos sistemáticos con respecto a la historia reproductiva de hombres y mujeres astronautas son deficientes. Aunque muchos astronautas masculinos han producido niños después de los vuelos espaciales, la información sobre las concepciones y los resultados del parto a su regreso desde el espacio no están disponibles. La incidencia de infertilidad después de los vuelos espaciales prolongados en hombres y mujeres y la incidencia de complicaciones en el embarazo en las mujeres no son conocidos. En mujeres astronautas que han retrasado el embarazo, será difícil de analizar los efectos de los viajes espaciales (microgravedad, exposición a la radiación) de los efectos naturales del envejecimiento.<sup>9</sup> Mujeres astronautas que experimentan trastornos hipertensivos del embarazo pueden requerir monitoreo adicional para las enfermedades cardiovasculares, ya que en la Tierra estos trastornos están asociados con un mayor riesgo de futuros eventos cardiovasculares adversos, como el derrame cerebral y el infarto de miocardio.<sup>10</sup>

## **Efectos del vuelo espacial en la reproducción humana**

El efecto de los vuelos espaciales sobre disminución de la espermatogénesis se ha estudiado, observándose que hay una disminución significativa de los niveles de testosterona, consecuentemente con una disminución del volumen testicular.<sup>11</sup>

Esta desregulación ocurre a nivel de hipotálamo-hipófisis donde se estimula la secreción de hormona luteinizante y hormona folículo-estimulante ocasionando disminución de los niveles de testosterona y las repercusiones sobre la reproducción a futuro.<sup>12,16</sup>

En modelos animales se ha concluido que no existen modificaciones a nivel ovárico, no obstante es bien conocido que el eje hipotálamo-hipófisis-ovario ante el estrés modifica su ciclo.<sup>13,16</sup> Sin embargo no se ha documentado sobre el comportamiento del ciclo menstrual en mujeres astronautas. En ratas se ha demostrado la supresión de la ovulación mediante inhibición de la hormona luteinizante y leve aumento de la hormona folículo-estimulante, y posterior a la fecundación reduce la implantación.<sup>14,16</sup>

## **Efectos de alteraciones en la gravedad sobre la fertilidad**

En sólo un estudio fue analizada la capacidad de apareamiento en el entorno espacial, se describió el acoplamiento con éxito, aunque no hubo progenie viable.<sup>15,16</sup> Sin embargo, otro estudio reportó ratas macho expuestas a microgravedad, 2.5 a 3 meses después se aparearon y obtuvieron descendencia sana, descendencia viable.

A medida que la Estación Espacial Internacional nos acerca a la realidad de la colonización del espacio, se hace cada vez más importante para entender los efectos de la gravedad sobre la fisiología alterada de la reproducción de los mamíferos y su función. Con base en los datos existentes, hay evidencia de cambios inducidos en los procesos reproductivos masculinos y femeninos. Aún no existen datos precisos acerca de la reproducción en humanos en ambiente de microgravedad pero es un tema apasionante y necesario si se quiere iniciar la era de la colonización planetaria.

# Referencias

1. Glasier A, Gülmezoglu M, Schmid GP, García-Moreno C, Van Look PF. Sexual and reproductive health: a matter of life and death. *The Lancet*. 2006;368(4-10):1595-1607.
2. Marco-Bach J. Métodos de regulación de la fertilidad humana. *Cuadernos de Bioética*. 1991;6:27.
3. Kordyum EL. Plant reproduction systems in microgravity: experimental data and hypotheses. *Adv Space Res*. 1998;21(8-9):1111-20.
4. Jennings RT, Santy PA. Reproduction in the space environment: Part II. Concerns for human reproduction. *Obstetrical & Gynecological Survey*. 1990;45(1):7-17.
5. Wakayama S, Kawahara Y, Li C, Yamagata K, Yuge L, Wakayama T. Detrimental effects of microgravity on mouse preimplantation development in vitro. *PLoS One*. 2009;4(8):e6753.
6. Di Agostino S, Botti F, Di Carlo A, Sette C, Geremia R. Meiotic progression of isolated mouse spermatocytes under simulated microgravity. *Reproduction*. 2004 Jul; 128(1):25-32.
7. Ronca E. Desarrollo de los mamíferos en el espacio 2003; 9:217-51.
8. Li HY, Zhang H, Miao GY, Xie Y, Sun C, Di CX, et al. Simulated microgravity conditions and carbon ion irradiation induce spermatogenic cell apoptosis and sperm DNA damage. *Biomed Environ Sci*. 2013;26(9):726-34.
9. Wu C, Li L, Wei H, Wu Z, Jiang Q, Zhang S. Tail-suspended model simulating mouse oocytes maturation inhibited with microgravity. 2012 Aug;29(4):687-96.
10. Ronca AE, Baker ES, Bavendam TG, Beck KD, Miller VM, Tash JS, et al. Effects of sex and gender on adaptations to space: reproductive health. *J Womens Health*. 2014;23(11):967-74.
11. Sapp W, Philpott D, Williams C, Kato K, Stevenson J, Vasquez M, et al. Effects of spaceflight on the spermatogonial population of rat seminiferous epithelium. *FASEB J*. 1990;4:102-4.
12. Strollo F, Riondino G, Harris B, Strollo G, Casarosa E, Mangrossa N, et al. The effect of microgravity on testicular androgen secretion. *Aviat Space Environ Med*. 1998;69:133-6.
13. Peyser M, Ayalon D, Harell A, Toaff R, Cordova T. Stress-induced delay of ovulation. *Obstet Gynecol Surv* 1973;42:667-71.
14. Gharbi N, El Fazaaz S, Fagette S, Gauquelin G, Gharib C, Kamoun A. Cortico-adrenal function under simulated weightlessness during gestation in the rat—effects on fetal development. *J Gravit Physiol*. 1996;3:63-8.
15. Serova L, Denisova L. The effect of weightlessness on the reproductive function of mammals. *Physiologist*. 1982;25(suppl):S9-S12.
16. Tou J, Ronca A, Grindeland R, Wade C. Models to study gravitational biology of mammalian reproduction. *Biology of Reproduction*. 2002;67:1681-87.

# 17. Adaptación del sistema inmune en el Espacio

Martín de Jesús Sánchez Zúñiga, Herlinda Sánchez Pérez.

## ■ Introducción

El ser humano es capaz de vivir en la vastedad de la Tierra, en diferentes medios ambientes. El Universo representa la última frontera y un verdadero desafío a la capacidad de adaptación del hombre. Será acaso ésta, la razón final de nosotros mismos.<sup>1,2</sup>

En Estados Unidos, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) envió al espacio el 5 de mayo de 1961 a Alan B. Shepard a bordo de la cápsula “Mercurio libre 7”, en tanto que en ese mismo año Rusia envió a Yuri Gagarin. Para ese entonces, el aspecto médico para los vuelos espaciales no formaba parte de las principales consideraciones en la planificación de la misión o del viaje espacial. El vuelo de Shepard duró 15 minutos y 28 segundos, apenas el tiempo necesario para cualquier tipo de complicación médica debido al vuelo.

Posteriormente la NASA comenzó a experimentar con una mayor duración en los vuelos espaciales. La misión Gemini VII tuvo una duración de vuelo de 13 días, 18 horas, 35 minutos y un segundo.

El presidente John F. Kennedy desafió a la ingeniería de Estados Unidos a finales de la década de los 60 con el objetivo de tocar la superficie lunar con una huella humana. Neil Armstrong logró ese objetivo en julio de 1969, a bordo del Apolo 11, “Un pequeño paso para el hombre, un gran paso para la humanidad”. Con el inicio no sólo del nuevo siglo, sino del nuevo milenio la humanidad extiende su vista en busca de vida en otros planetas. A partir de 1960, el programa espacial de Estados Unidos dirigido por la NASA ha tenido cuantiosas pruebas y un sin fin de sinsabores.

A partir del Mercurio libre 7, el aspecto médico en las misiones espaciales ha sido una parte esencial. El cuidado de la salud en el espacio es fundamental como en la Tierra, pero mucho más complejo y desafiado por alteraciones creadas por microgravedad y la inmensidad del espacio mismo.<sup>3,5</sup>

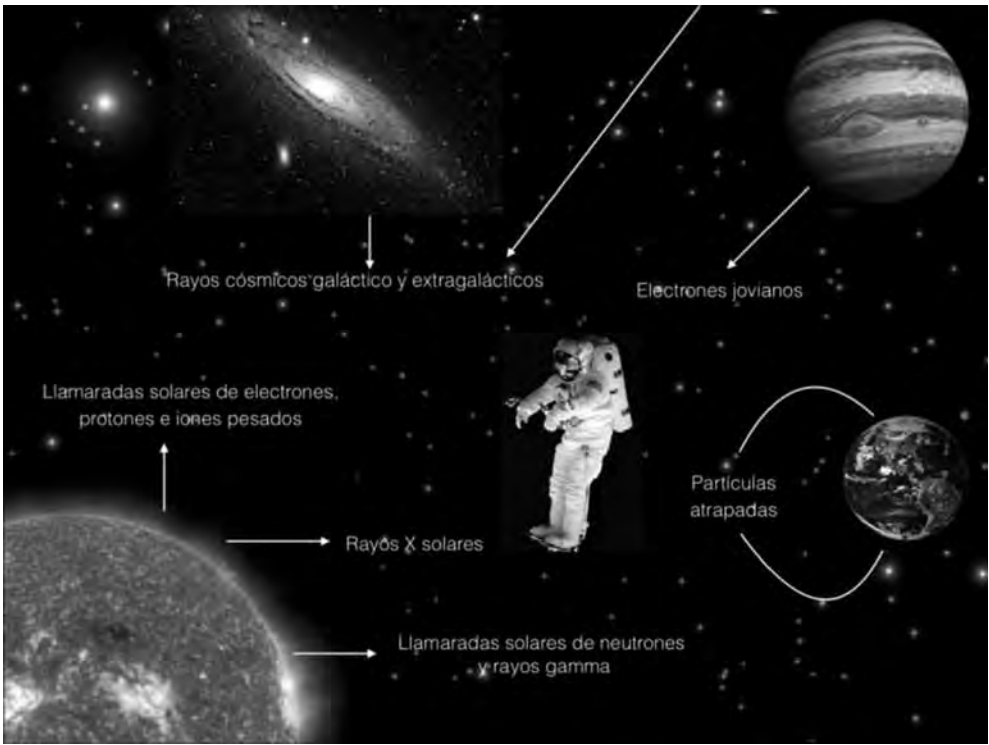
Durante los próximos decenios, es probable que el hombre estará expuesto a diferentes escenarios fuera de la Tierra. Los seres humanos, por supuesto, que pueden tomar sus propias decisiones, cuando se trata de la interpretación de los datos. Esto es crucial, debido a que la transmisión de datos de Marte a la Tierra y viceversa puede tardar hasta 40 minutos. Por lo que en los viajes y misiones espaciales se deben de tomar en cuenta los siguientes factores ambientales: 1) radiación ionizante cósmica y radiaciones secundarias producidas por la interacción de átomos y moléculas de la atmósfera o material de blindaje del propio cuerpo humano, y 2) eventos de partículas solares, que se producen esporádicamente y pueden durar varios días, además de otros aspectos que se abordan más adelante.<sup>3,4</sup>



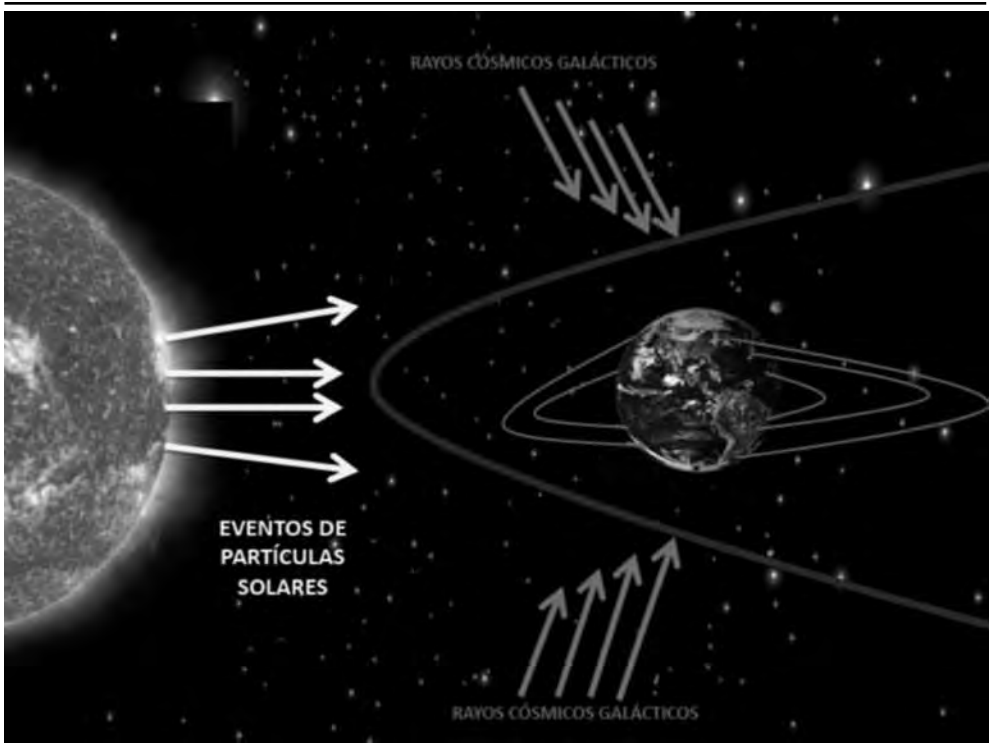
# El campo de radiación en el espacio es excepcional

El espacio exterior se caracteriza por condiciones extremas que involucran reacciones nucleares y atómicas (muy altas temperaturas, partículas subatómicas de alta velocidad y baja densidad), así como radiación electromagnética. El entorno de la radiación ionizante de nuestra galaxia está dominado por los iones y los núcleos altamente penetrantes y energéticos. Estas partículas constituyen el principal peligro de radiación para los seres humanos en el Cosmos. En el espacio interplanetario, los principales componentes del campo de radiación son los rayos cósmicos galácticos y la radiación cósmica solar<sup>4</sup> (Figura 17.1).

El entorno espacial más allá de la órbita terrestre baja (LEO, por sus siglas en inglés) contiene varios tipos de radiación ionizante. La mayor parte de las partículas energéticas que se encuentran en el espacio interplanetario son del viento solar, que producen un flujo constante de radiación de transferencia lineal de energía baja (LET). Para misiones fuera de LEO, la radiación cósmica galáctica (GCR) contribuirá de manera significativa a la dosis de radiación acumulada para los astronautas, los iones de GCR se originan fuera de nuestro sistema solar y contienen en su mayoría protones de alta energía y partículas alfa, con un componente de elevada energía y carga, así como núcleos en movimiento a velocidades relativistas y de alta energía. Además de



**Figura 17.1.**  
Componentes del campo de radiación.



**Figura 17.2.**  
Factores interplanetarios contribuyentes al aumento de la radiación espacial.

GCR, los eventos de partículas solares impredecibles e intermitentes (SPE, por sus siglas en inglés) pueden producir grandes nubes de plasma que contienen protones de alta energía y algunos iones pesados que pueden causar un rápido aumento de la radiación, tanto fuera como dentro de la nave espacial (Figura 17.2).

La falta de conocimiento acerca de los efectos biológicos y de la respuesta a la radiación espacial es el factor más importante que limita la predicción del riesgo de la radiación asociada con la exploración espacial humana.<sup>6</sup>

## Daño de la radiación espacial

La radiación fuera de LEO se compone de un entorno tóxico de GCR y partículas principalmente protones, expulsados por el Sol durante los eventos de partículas solares. Esta mezcla de modalidades de radiación representa el impedimento físico más importante para la exploración espacial humana segura.

## Radiación cósmica galáctica

La radiación cósmica galáctica (GCR) se origina desde fuera de nuestro sistema solar y consiste en partículas relativistas de elevada transferencia lineal de energía baja, que poseen energía suficiente para penetrar cualquier blindaje de la tecnología utilizada en los vehículos actuales; consiste en 98 % de bariones y 2 % de electrones. Los bariones están conformados por 87 % de iones hidrógeno (protones), 12 % de iones helio (partículas alfa), el restante 1 a 2 % son partículas con núcleos HZE con cargas que van desde  $Z = 3$  (litio), aproximadamente, a  $Z = 28$  (níquel).<sup>4,6</sup>

El gran poder de ionización de los iones de la GCR los convierte en una amenaza para la salud de los astronautas y constituye una de las barreras más importantes que impiden planear viajes interplanetarios. Las partículas de la radiación cósmica galáctica son suficientes para penetrar varios centímetros de tejido biológico o de otros materiales orgánicos e inorgánicos.<sup>4</sup>

## Radiación de eventos de partículas solares

Los eventos de partículas solares (SPE) son peligrosos e impredecibles, pueden producir grandes cantidades de protones energéticos con flujos de energía que sobrepasan  $10^9$  protones/cm<sup>2</sup>. Dicha energía consiste en gran parte en LET, con energía que va hasta 1 GeV/n que puede ser protegido con relativa facilidad por los cascos de las naves espaciales. La tasa de dosis de SPE son variables a lo largo del evento, rango de 0 a 100 mGy/h dentro de un vehículo espacial y de 0 a 500 mGy/h para un astronauta expuesto durante una actividad extravehicular en misiones fuera de LEO. La frecuencia de SPE es proporcional a la actividad de las manchas solares y disminuye con la fase solar de 11 años, alcanzando un máximo cuando la actividad solar ecuatorial es más alta. La fase del ciclo solar, sin embargo, no determina la intensidad de la SPE, una parte de los mayores eventos solares medidos se han originado durante los periodos de poca actividad, cuando se ha producido una reducción significativa de las manchas solares observadas.

## Radiación intravehicular

La interacción de protones energéticos SPE y partículas pesadas GCR, con la estructura de la nave espacial pueden producir un gran peligro adicional, secundariamente: radiación intravehicular. Las partículas secundarias producidas en las reacciones de fisión nuclear incluyen protones, partículas alfa, partículas beta, rayos gamma, rayos X, neutrones y partículas pesadas cargadas. Todos estos productos de fisión tienen la capacidad de dañar las estructuras celulares.<sup>4</sup>

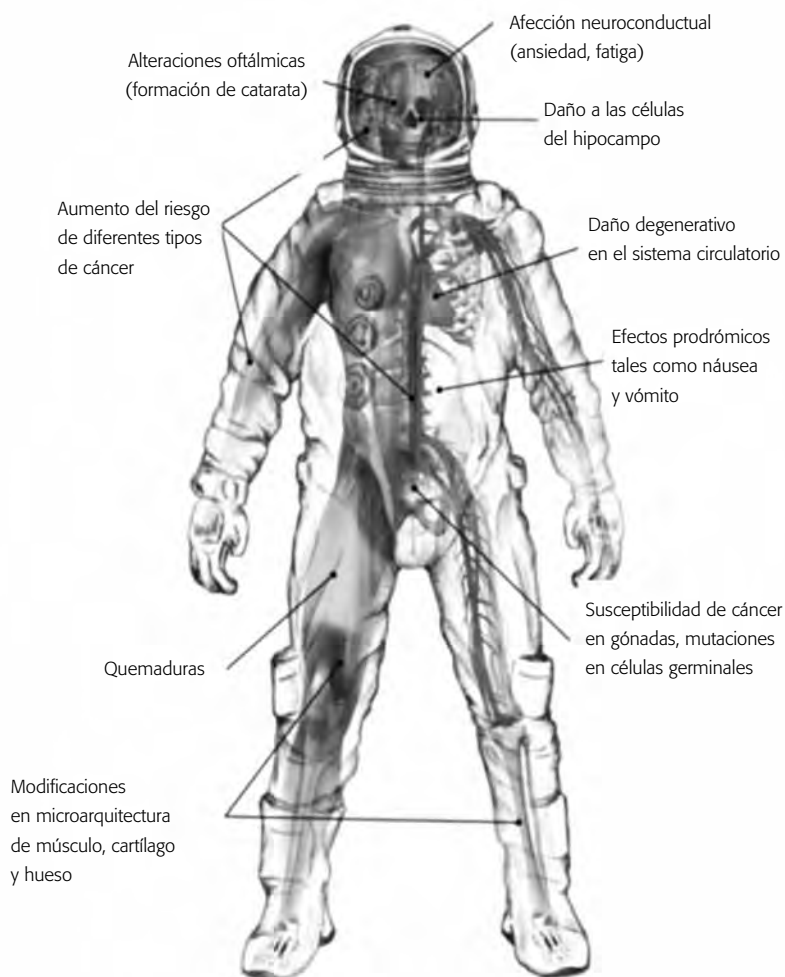
## Consecuencias biomédicas de la exposición a la radiación del espacio

La capacidad de visitar el espacio por largos periodos ha abierto nuevos aspectos de investigación para determinar los efectos de los vuelos espaciales en las numerosas funciones fisiológicas.<sup>7</sup>

Hasta el momento no se encuentra dilucidado si la exposición moderada o de gran magnitud de SPE combinada con GCR, afectará la salud y rendimiento de las tripulaciones de astronautas durante los viajes interplanetarios.

Los SPE tienen una dosis de distribución con respecto a la irradiación de todo el cuerpo. Por ejemplo, la dosis de la piel es de cinco a diez veces mayor que la experimentada por órganos internos, debido a su localización superficial y la susceptibilidad a la absorción en los espectros de baja energía de los protones y los núcleos.

La radiación de SPE y los efectos sinérgicos de los vuelos espaciales pueden colocar al equipo en riesgo significativo de efectos prodrómicos (p. ej., náusea y vómito), lesiones en la piel, cambios hematológicos y disfunción del sistema inmune. El riesgo de muerte es bajo como resultado de un evento solar mayor o el efecto combinado de múltiples SPE. De manera similar, la exposición GCR acumulada a lo largo de las misiones de exploración a Marte, la Luna o un asteroide. La exposición a la radiación espacial afecta a múltiples órganos y sistemas fisiológicos en formas complejas<sup>6</sup> (Figura 17.3).



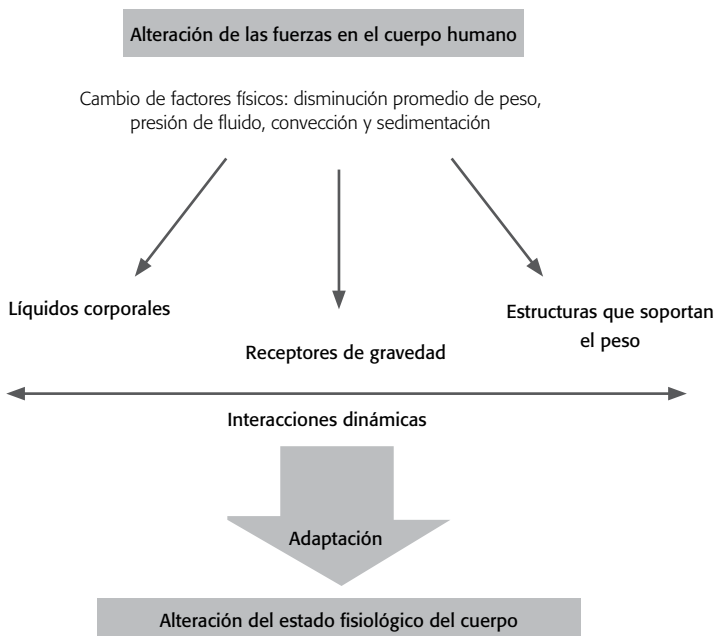
**Figura 17.3.** Principales regiones del organismo humano que son afectadas por la radiación espacial.

Sin embargo, el riesgo de morbilidad y perfiles de toxicidad siguen siendo poco conocidos. Esta comprensión incompleta persiste, a pesar de la existencia de un importante volumen de literatura que describe los efectos de los intervalos anticipados de dosis absorbidas. El cálculo de la exposición a la radiación de los astronautas de una manera detallada y realista es difícil debido a la complejidad del entorno de la radiación, los efectos de protección del vehículo y/o el traje espacial así como la anatomía y fisiología humanas. La integración de las mediciones por microdosimetría con estudios radiobiológicos son esenciales para reducir las incertidumbres en las proyecciones de dosis durante la planificación de la misión, vuelos espaciales y para informar, a la investigación posterior al vuelo, sobre la salud de los astronautas.<sup>6</sup>

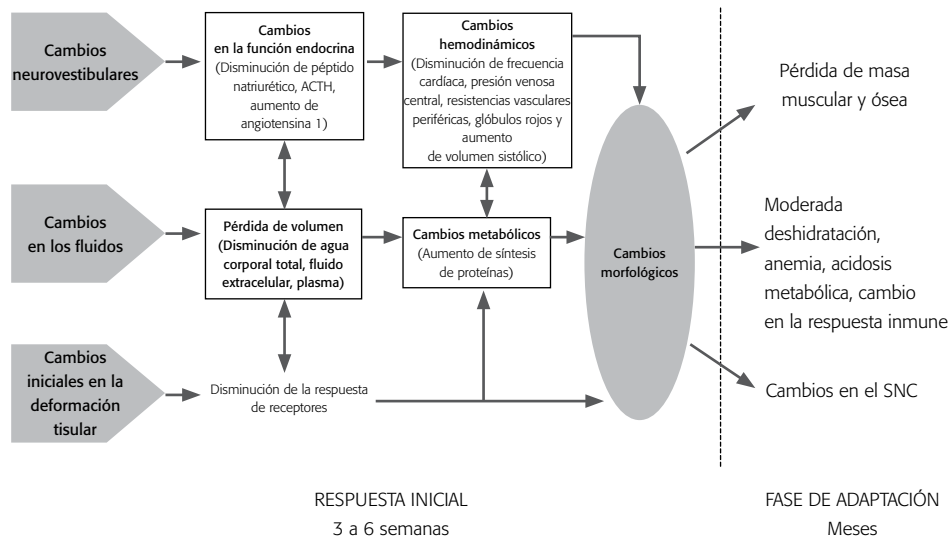
Los vuelos espaciales someterán a los tripulantes a: 1) cambios en las fuerzas físicas sobre y dentro del cuerpo, provocadas por la reducción en el peso de los componentes del cuerpo; 2) cambios psicosociales inducidos por el confinamiento a largo plazo de tales viajes, sin la posibilidad de salida, y 3) cambios en los niveles y tipos de radiación<sup>2</sup> (Figura 17.4).

El 50 % de los astronautas experimentan mareos asociados al vuelo espacial, durante los primeros días de exposición a microgravedad, además de que existen alteraciones en múltiples aparatos y sistemas, por ejemplo, cardiovascular y óseo, además de desórdenes agudos como infecciones, litiasis renal y reacciones alérgicas<sup>5</sup> (Figura 17.5).

La NASA clasifica las consecuencias biomédicas en cuatro zonas de riesgo: 1) Efectos degenerativos de los tejidos expuestos a radiación; 2) Carcinogénesis por radiación; 3) Efectos agudos y crónicos en sistema nervioso central posterior a exposición a radiación, y 4) Síndromes debidos a SPE.<sup>6</sup>



**Figura 17.4 .**  
Alteración de las fuerzas en el cuerpo humano.



**Figura 17.5.**  
Alteraciones fisiológicas asociadas con vuelos espaciales.

En el Cuadro 17.1 se ejemplifica las alteraciones más frecuentes de acuerdo con aparatos y sistemas:<sup>2</sup>

**Cuadro 17.1.**  
Alteraciones fisiológicas por aparatos y sistemas a causa de vuelos espaciales

Aparato o sistema	Alteración
Óseo	Pérdida de masa ósea, incremento de riesgo de fractura, de litiasis renal, lesión en tejido conectivo
Cardiovascular	Intolerancia al ortostatismo posvuelo, atrofia cardíaca, alteraciones del ritmo cardíaco
Sueño/funcionalidad	Errores debido a la falta de sueño y disrupción en el reloj biológico
Inmune/infeccioso	Aumento de riesgo de infección, anemia asociada con vuelos espaciales, cicatrización deficiente
Muscular	Disminución de masa muscular y atrofia
Neurovestibular	Mareos, desorientación corporal, vértigo, inestabilidad postural
Efectos de radiación	Cáncer, daño a sistema nervioso central, catarata y otras enfermedades

## Sistema inmune en el espacio

Una de las más importantes interacciones biológicas afectadas en los vuelos espaciales es la regulación de la respuesta inmune. Estas alteraciones pueden tener profundos efectos en la capacidad del hospedero de resistir a procesos infecciosos, alergia, hipersensibilidad y tumores. Al inicio del programa espacial se reconoció que los vuelos espaciales se asociaban con un aumento en la susceptibilidad a infecciones. Sin embargo, un contacto limitado con los astronautas previo al vuelo y el mantenimiento de la cabina limpia han sido eficaces y los astronautas no han requerido mayor terapéutica. Hasta el momento se desconoce si estas medidas pueden ser eficaces en vuelos de mayor duración. Varios factores pueden contribuir a estos efectos, dentro de los que destacan la microgravedad, el estrés, aislamiento, exposición a radiación, fuerzas de aceleración y desaceleración, disrupción del ciclo circadiano, que resulta en alteraciones del factor de necrosis tumoral alfa e interleucina 6, así como sustanciales cambios en la temperatura y alteraciones en la nutrición.<sup>7-11</sup>

Las alteraciones del sistema inmune han sido documentadas inmediatamente al inicio del vuelo espacial, sin embargo, estas observaciones son influenciadas por las variables de confusión de readaptación a la gravedad terrestre. Existe aún un vacío de información acerca de lo que sucede durante el vuelo.<sup>8,9</sup>

Posterior al vuelo las alteraciones en el sistema inmune son vastas (Cuadro 17.2) e incluyen: disminución de la proliferación de mitógenos de las células mononucleares en sangre periférica, reducción de la blastogénesis de linfocitos y de la producción de citocinas –incluyendo interferón  $\alpha$  y  $\beta$  e interleucinas–, empobrecimiento de la actividad de células asesinas naturales (NK), macrófagos y granulocitos, reducción de la distribución de leucocitos, así como disminución de la señalización intracelular de linfocitos, respuesta neuroendocrina y la proliferación de leucocitos después de la activación.

### Cuadro 17.2.

Principales trastornos inmunológicos asociados con vuelos espaciales

Parámetro inmunológico	Modelo	Tipo de vuelo	Respuesta
Factor estimulante de colonias	Animal	Corto	Inhibido
Hipersensibilidad retardada	Humano	Corto	Inhibido
Producción de interferón	Cultivo celular	Corto	Mejora
	Animal		Inhibido
	Humano		Inhibido
Producción de interleucinas	Cultivo celular	Corto	Mejora
	Animal		Inhibido
	Humano	Largo	Inhibido
Blastogénesis de leucocitos	Cultivo celular	Corto	Inhibido
	Animal		Inhibido
Distribución de leucocitos	Animal	Corto	Inhibido
	Humano		Inhibido
Actividad de NK	Animal	Corto	Inhibida
	Humano	Largo	Inhibida
Inmunoglobulinas séricas	Humano	Largo	Mejora

Sin embargo, estas alteraciones posteriores al vuelo pueden no reflejar las condiciones en el vuelo propiamente. Hay escasez de datos sobre el sistema inmune durante el vuelo. *In vivo*, en condiciones de microgravedad se ha evidenciado reducción de respuesta de hipersensibilidad de tipo retardada. La inmunidad humoral, incluida la actividad de las células B y la producción de inmunoglobulinas totales, parece permanecer sin cambios en los vuelos espaciales, aunque esto todavía no ha sido posible comprobarlo del todo, debido a las múltiples variables a considerar, el Universo en su infinitud y el ser humano como sistema biológico adaptado a un ambiente que permanece aún desconocido para nosotros en su mayoría, sistema biológico y materia interactuando; aunado a que gran parte de la investigación está influenciada por una gran cantidad de variables, muchas de ellas dependientes de la estancia en el espacio, variables que hasta el momento no pueden ser del todo reproducibles en la superficie terrestre.<sup>7,9,11</sup>

Estudios en roedores han indicado que la estancia prolongada en los vuelos espaciales resulta en hipoplasia de órganos linfáticos y alteraciones de factores que actúan en el ciclo celular estimulando la división celular. Estos efectos fueron transitorios y volvieron a la normalidad después de un periodo de recuperación del vuelo efectuado. Aunque dichos datos se deben de tomar con reserva debido a que muestras tomadas de diferentes tripulaciones indicaron que la respuesta blastogénica no había regresado a la normalidad. Otro aspecto importante a destacar es la duración de los viajes “cortos”, definidos como duración menor a 2 semanas, y mayor a 2 semanas el viaje espacial “largo”.<sup>7,12,13</sup>

Quince de los 29 tripulantes de la misión Apolo desarrollaron infecciones bacterianas o virales durante sus misiones o inmediatamente posterior al regreso, durante la primer semana.<sup>7</sup>

Durante el vuelo puede existir reactivación de infección latente por los virus herpes, principalmente pero no exclusivamente, virus Epstein-Barr (VEB), citomegalovirus (CMV) y virus varicela zóster (VVZ), que han sido documentados en vuelos espaciales de corta duración. Otra variable a considerar es el aumento de la virulencia microbiana durante los vuelos espaciales, ya que tiene el potencial de aumentar directamente el riesgo de la tripulación a las enfermedades infecciosas aun en caso de ausencia de disregulación del sistema inmune. Los agentes infecciosos incluyen virus de influenza, *Pseudomonas aeruginosa* y estreptococo  $\beta$  hemolítico.<sup>7,8</sup>

## Alteraciones del sistema inmune en el espacio

La leucocitosis es uno de los hallazgos más consistentes en los astronautas, tanto en vuelos cortos como en los de larga duración (Cuadro 17.3).

El efecto diferencial de los vuelos espaciales en la distribución de los leucocitos en diferentes órganos puede estar mediada en parte por los cambios en las moléculas de adhesión. La proporción de células positivas para LFA-1  $\alpha$  y  $\beta$  incrementan en el bazo pero disminuyen en los ganglios linfáticos. La expresión de L-selectina está disminuida en el bazo y en los ganglios linfáticos.

En astronautas, la expresión de Mac-1 (CD11, subunidad de integrina CR3, proteína de unión a matriz extracelular) en neutrófilos purificados aumentó tres días antes del lanzamiento, pero disminuyó en el día 0. La expresión de L-selectina (CD26L) fue regulada hasta el día 0 y los niveles de CD11 no cambiaron. La unión de los neutrófilos al factor de necrosis tumoral alfa fue significativamente mejor 4 días previos al lanzamiento, comparado con el día 3 posterior al lanzamiento.

En los parámetros funcionales estudiados en los astronautas, poco después del aterrizaje y ocasionalmente durante los vuelos espaciales, se encuentra alteración en la proliferación de linfocitos, hipersensibilidad de tipo retardado, producción de anticuerpos, actividad de NK, así como en la respuesta de las citocinas. Los datos sobre los linfocitos son consistentes e indican



### **Cuadro 17.3.**

La leucocitosis se manifiesta con frecuencia en vuelos cortos y prolongados

<b>Célula</b>	<b>Cambio</b>	<b>Días de vuelo</b>
Polimorfonucleares	Aumento significativo del número de neutrófilos (más de dos veces en promedio)	3-18
Monocitos	Aumento Aumento o disminución, pero reducción significativa de CD14+/CD16* en toda la población de monocitos	4-5 10-18
CD3+	Porcentaje no tiene cambio significativamente estadístico	6-8
CD4+	Porcentaje disminuye significativamente	4-5 10-18
CD8+	Porcentaje disminuye significativamente	4-5 10-18
Células B	Porcentaje no tiene cambio significativamente estadístico	4-5 10-18
NK	Porcentaje disminuye significativamente	4-5

una reducción debido a disminución de la respuesta proliferativa por mitógenos de las células mononucleares de la sangre periférica.

Taylor y colaboradores sugirieron que la respuesta celular disminuye al día 4 con un máximo de supresión a los días 5 y 10. Aunque esta hipótesis es interesante, es importante tener en cuenta de que había un número limitado de sujetos en cada vuelo y hay una considerable variabilidad en sus respuestas.<sup>10</sup>

## **Neutrófilos**

Los neutrófilos son importantes elementos en el cuidado de la salud de los astronautas. Todos los que han pertenecido a alguna tripulación de una misión espacial han presentado cambios sustanciales en el número total de neutrófilos. Estos cambios varían dependiendo de la temporalidad, es decir, previo, durante y posterior al lanzamiento, así como la duración del viaje espacial, ya sea “corto” o “largo. Los neutrófilos incrementan el número hasta en un 100 % durante el viaje espacial. La capacidad de los neutrófilos de internalizar y destruir los microorganismos, se ve disminuida. Dicha disminución puede ser superior a 60 % y permanecer así hasta 3 días posterior al aterrizaje. La fagocitosis y la capacidad de oxidación es significativamente menor. Las funciones fagocíticas y oxidativas de los neutrófilos se ven afectadas por factores asociados con los vuelos espaciales y esta relación puede depender de la duración de la misión.<sup>14</sup>

## **Monocitos**

Kaur y colaboradores evidenciaron una reducción de la desgranulación así como la capacidad oxidativa para llevar a cabo la fagocitosis a los días 5 y 11 del vuelo espacial. Esta disminución

está acompañada de cambios en la expresión de CD32 y CD64, marcadores de superficie involucrados en la fagocitosis.<sup>15</sup>

## Células T

La fuerza de gravedad es un regulador clave en la respuesta inmune mediada por células y la ausencia de ésta impide o bloquea totalmente las vías esenciales para la activación temprana de las células T de señalización. La expresión de objetivos en las señales de cascadas de transducción, así como en los genes implicados en la proliferación, apoptosis y secreción, son reprimidos en ausencia de la fuerza de gravedad. Los factores de transcripción que ejercen mayor control regulador sobre la expresión génica durante la activación temprana de las células T son Rel/NF- $\kappa$ B –factor nuclear kappa-beta–, CREB, SRF, ELK, AP-1 y STAT que representan 59 % de los genes inducidos. Estímulos mecánicos activan estas vías, pero éstas son inhibidas en condiciones de microgravedad. De la misma manera el factor de necrosis tumoral, importante efector es inhibido en situaciones de microgravedad y puede dar lugar a la ineficiencia de la defensa del hospedero frente a patógenos infecciosos durante los vuelos espaciales. La microgravedad es un factor causal de daño de la activación temprana de las células T, lo cual es clave en la respuesta del hospedero ante los microorganismos en los vuelos espaciales.<sup>16,17</sup>

## Células asesinas naturales (*natural killer*)

La actividad de las NK disminuye de manera importante tanto en viajes espaciales “cortos” como “largos” y esta disminución persiste incluso una semana después del aterrizaje, en particular en las misiones espaciales de larga duración. La disminución de la actividad de las NK, en parte se explica por la disminución en cantidad de las mismas, sin embargo existen indicios de que la capacidad de las células NK de unión a las células diana esta deteriorada, por lo que presentan menos actividad citotóxica.

## Citocinas

Los datos sobre la producción de citocinas en los astronautas son asombrosamente limitados, ante la luz de su importancia, no sólo en la regulación y la coordinación de la respuesta inmune, sino también en la remodelación ósea. El TNF- $\alpha$  (factor de necrosis tumoral alfa), la interleucina 1 (IL-1), y la interleucina 6 (IL-6), son citocinas proinflamatorias de fase aguda. El incremento en la secreción de cortisol e IL-6, así como los niveles elevados de fibrinógeno de manera temprana y posterior al lanzamiento, sugieren que ambos están relacionados en una respuesta de fase aguda. La IL-1 $\beta$  también juega un papel importante, al proveer señales de activación de linfocitos, lo que plantea la posibilidad de que la disminución de la respuesta proliferativa de los polimorfonucleares pueda ser debido en parte a la disminución de la síntesis de esta citocina.<sup>10</sup>

Otras citocinas implicadas y no menos importantes son la interleucina 2 (IL-2) y la interleucina 12 (IL-12), las cuales se ha evidenciado tanto en modelos animales como en astronautas que su expresión está disminuida, los mecanismos de afección son múltiples y tan variables como los factores ambientales que pueden afectar la salud de los astronautas en un universo del que desconocemos más, que el conocimiento que se ha ido acumulando desde que el hombre levantó la mirada al cielo.

Aunado a que existe otra limitante de gran peso y es la incapacidad de poder reproducir en la Tierra un ambiente que representa una frontera, tal vez la última para el ser humano.

Todavía existen muchas dudas, las cuales son tierra fértil para la investigación. La exploración en un campo donde interactúa el hombre como ente y la materia pura, el Universo.

## Referencias

1. De la Torre GG. Cognitive neuroscience in space. *Life*. 2014;4:281-94.
2. White RJ, Averner M. Humans in space. *Nature*. 2001;409:1115-18.
3. Ramsey S, Gram N. Healthcare in the space program: The space shuttle, The International Space Station, and the Mars exploration mission. *Journal of Clinical Engineering*. 2002. Winter: 48-62.
4. Hellweg CE, Baumstark CK. Getting ready for the manned misión to Mars: the astronauts' risk from space radiation. *Naturwissenschaften*. 2007;94:517-26.
5. Graebe A, et al. Physiological, pharmacokinetic and pharmacodynamic changes in space. *Journal of Clinical Pharmacology*. 2004;44:837-53.
6. Chancellor JC, Scott GB, Sutton JP. Space radiation: The number one risk to astronaut health beyond low Earth orbit. *Life*. 2014;4:491-510.
7. Sonnenfeld G. The immune system in space and microgravity. *Official Journal of the American College of Sports Medicine*. 2002;34(12):2021-27.
8. Crucian, et al. Immune system dysregulation occurs during short duration spaceflight on board the space shuttle. *Journal Clinical Immunol*. 2013;33: 456-65.
9. Sonnenfeld G. Immune responses in space flight. *Int J Sports Med*. 1998;19:195-204.
10. Borchers AT, et al. Microgravity and immune responses: Implications for space travel. *Nutrition*. 2002; 18:889-98.
11. Ritz BW, et al. Functional recovery of peripheral blood mononuclear cells in modeled microgravity. *The FASEB Journal*. 2005:1-21.
12. Taylor GR. Immune changes during short-duration missions. *Journal of Leukocyte Biology*. 1993;54:202-8.
13. Konstantinova, et al. Immune changes during long-duration missions. *Journal of Leukocyte*. 1993;54: 189-201.
14. Kaur, et al. Changes in neutrophil functions in astronauts. *Brain, Behavior, and Immunity*. 2004;18:443-50.
15. Kaur et al. Changes in monocyte functions of astronauts. *Brain, Behavior, and Immunity*. 2005;19:547-54.
16. Boonyaratanakornkit, et al. Key gravity-sensitive signaling pathways drive T cell activation. *The FASEB Journal*. 2005;19:2020-22.
17. Chang, et al. The Rel/NF- $\kappa$ B pathway and transcription of immediate early genes in T cell activation are inhibited by microgravity. *Journal of Leukocyte Biology*. 2012;92:1133-45.

# 18. Efectos de la microgravedad en el aparato de la visión

José Adrián Rojas Dosal, Luis Armando Martínez Gil,  
Ma. del Rosario Gutiérrez Razo

Los efectos que se presentan en el cuerpo humano cuando es sometido a un ambiente de microgravedad, como ocurre en los viajes en el espacio, se empezaron a conocer desde que se iniciaron los vuelos espaciales tripulados en 1961. Las alteraciones que se pueden manifestar son múltiples y pueden abarcar a casi cualquier órgano de la economía corporal, lo que ha motivado el estudio y la investigación de lo que ocurre y por qué ocurre. Se han descrito diversos cambios en algunas estructuras del cuerpo humano como atrofia muscular, desmineralización de los huesos, modificaciones cardiovasculares, incremento de la presión intracraneal, cambios inmunológicos y nutricionales y también cambios en la esfera sensorial; se han identificado, entre otras más, manifestaciones vestibulares que afectan el equilibrio y la coordinación véstibulo-ocular.<sup>1</sup>

Por lo general, cuando la exposición a la microgravedad es prolongada, la posibilidad de que estas alteraciones se presenten es mayor, lo mismo pasa con la severidad de las mismas ya que cuando el tiempo de exposición es breve, la intensidad es menor y sobre todo la reversibilidad de los cambios y las lesiones es más probable. Esto es sumamente importante ya que existen programas en donde se proyectan vuelos de varios meses en el espacio, sobre todo cuando se habla de exploraciones a asteroides lejanos e incluso al planeta Marte.<sup>2</sup>

Otro factor importante que debe tomarse en cuenta es que no en todos los individuos que son expuestos a condiciones de ingravidez necesariamente desarrollan estos cambios corporales, tal vez existe una capacidad de adaptación cuando no se hacen manifiestos y también a que son tomadas medidas preventivas para evitar en lo posible su desencadenamiento.

No todo se conoce en esta materia y quedan muchas incógnitas que tendrán que irse descifrando conforme se acumulan las experiencias de cada nuevo vuelo en el espacio, así como también la información de los resultados de las investigaciones que diversas disciplinas del conocimiento en esta materia continuamente están aportando.

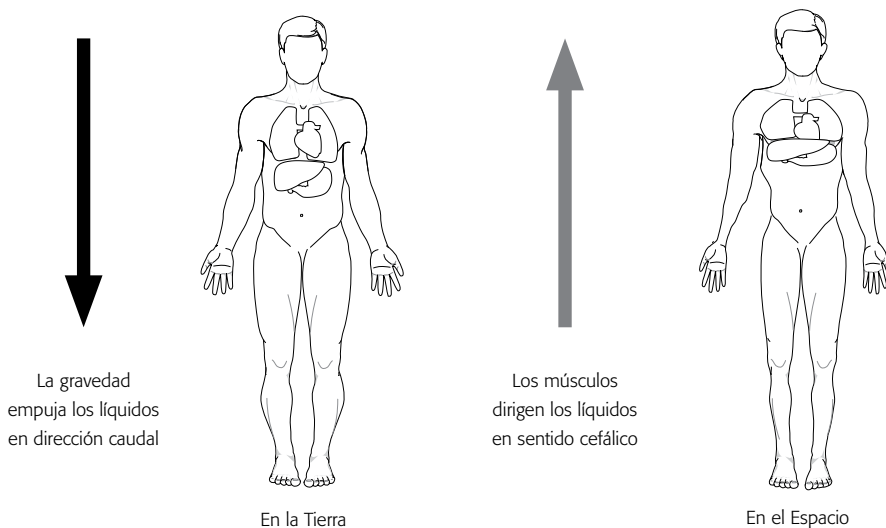
Es indudable que uno de los objetivos primordiales de estos estudios es el de prevenir el desarrollo de problemas en la salud de los miembros de las tripulaciones cuando están sometidos a cambios gravitacionales en su entorno. Una de las consecuencias a las que se pudiera dar lugar es que cuando se identifican condiciones predisponentes en los candidatos para participar en la realización de vuelos espaciales, éstos sean rechazados. Por lo tanto es indispensable ampliar todos estos conocimientos para hacer un perfil más selectivo de los futuros astronautas.

El tema que nos ocupa en este capítulo es la adaptación del aparato de la visión en el espacio, ya que se ha demostrado que la exposición a la microgravedad provoca cambios estructurales y funcionales en el aparato de la visión que obviamente pudieran, en caso de ocurrir, poner en riesgo el éxito y la seguridad de los programas de exploración espacial.<sup>3</sup> Hay diversos estudios enfocados a la identificación de cambios en la visión provocados por la ingravidez a la que

están expuestos los astronautas durante sus vuelos; en un reporte de la American Academy of Ophthalmology se hace el seguimiento de los astronautas con estudios oftalmológicos completos realizados antes del inicio de su misión e inmediatamente después de que ésta finaliza, además de la aplicación de cuestionarios a astronautas que han participado en vuelos de corta y larga duración. Con este tipo de información derivada de estudios cada vez más numerosos en el campo de la oftalmología se tendrá un conocimiento más preciso de los efectos de la microgravedad en el sistema visual, lo que permitirá tomar medidas preventivas que puedan evitarlas.<sup>4</sup>

## Acumulación de líquidos en la parte superior del cuerpo

En condiciones normales, es decir, cuando estamos sujetos a la gravedad terrestre, la acumulación de los líquidos en el organismo se da en la parte inferior del cuerpo, del diafragma hacia abajo. En gravedad cero ocurre lo contrario: los líquidos (sangre, linfa y líquido intersticial) se agolpan en la parte superior del cuerpo. Por definición, un fluido es una sustancia que se deforma cuando le es aplicada una fuerza, en este caso la fuerza es la gravedad y es la que tiende a mantener los líquidos corporales en las áreas inferiores del cuerpo, situación que no se encuentra cuando la fuerza de gravedad no existe o es mínima, entonces los mecanismos fisiológicos cambian y el desplazamiento de estos líquidos se desplaza hacia la parte superior del cuerpo provocando ingurgitación venosa en el tórax, cuello y cráneo,<sup>5</sup> lo que da lugar a un remodelamiento estructural y de autorregulación en órganos tan importantes como el cerebro y los globos oculares<sup>6,7</sup> (Figura 18.1).



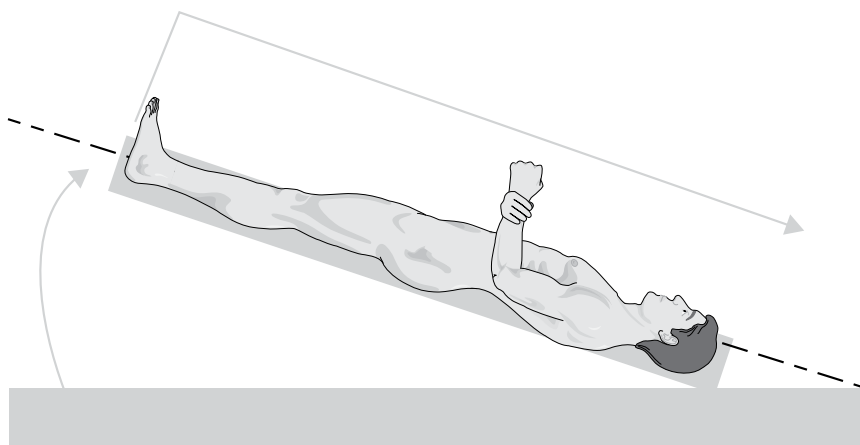
**Figura 18.1.** Representación esquemática de los cambios fisiológicos en el espacio con desplazamiento de líquidos a la parte superior del cuerpo.

Para demostrar que los cambios en la distribución de los líquidos corporales provocan alteraciones en órganos como el cerebro y los ojos, se han llevado a cabo estudios experimentales en los que se intenta simular las condiciones que se presentan en el cuerpo humano cuando se expone a la microgravedad.

El reposo con la cabeza por abajo del plano horizontal en grados variables, por periodos breves o prolongados, reproduce muchas de las modificaciones inducidas por los vuelos en el espacio, en particular la acumulación de líquidos en la cabeza.

Este tipo de estudios tiene ventajas en su implementación en la superficie terrestre sin necesidad de realizarlos necesariamente durante un vuelo espacial, sobre todo cuando se buscan alteraciones provocadas por tiempos de exposición prolongados. Se tienen reportes de estudios en los que se han mantenido a los sujetos que participan en el proceso experimental, con reclinación de la cabeza por 30 días o más.<sup>8</sup> Hay ventajas en la realización de estos estudios experimentales en localización terrestre, una muy importante son los costos; tiene ventajas también porque existe la posibilidad de realizar estos estudios en grupos con un mayor número de participantes, con un mejor control y registro de todas sus constantes y que además al llevarse a cabo en lugares con más comodidades y espacio, permiten una intervención rápida en caso de presentarse alguna descompensación. También permite la participación de grupos multidisciplinarios con diferentes enfoques en los mismos sujetos del estudio. En cuanto a los instrumentos y equipos necesarios para una exploración oftalmológica amplia con documentación de los cambios que se presentan en los tejidos oculares, pueden estar disponibles sin importar su peso o su volumen (Figura 18.2).

En los vuelos parabólicos en donde se reproduce la pérdida de la fuerza de gravedad por algunos minutos durante el trayecto, el inconveniente es la brevedad en la que se obtiene esta respuesta y sólo serviría para estudios agudos, en los que únicamente se presentan algunas modificaciones pero no todas las que pueden ser registradas cuando la exposición es prolongada.



**Figura 18.2.**

Posición de decúbito con la cabeza reclinada hacia abajo, para simular los cambios hemodinámicos que se presentan en los ojos, en un ambiente de microgravedad.

En estos casos el costo es importante ya que hay que mantener en vuelo grandes aeronaves para poder reproducir estos fenómenos, además de que la transportación de equipos de diagnóstico y personal necesario para la realización de los estudios es muy limitado.

De aquí que se prefiera como procedimiento para la simulación de microgravedad de los vuelos espaciales y la presencia de algunas alteraciones en el aparato de la visión, al reposo en decúbito con la cabeza por abajo del plano horizontal en donde se pueden reproducir los cambios que se presentan en vuelos de corta duración o por periodos prolongados.

## Cambios en la presión intraocular

El registro de las manifestaciones en el área visual que se han venido haciendo en las diferentes misiones de vuelos espaciales ha permitido documentar una serie de cambios en las estructuras oculares que se han relacionado con la exposición a la microgravedad y con la duración de la misma, en algunos casos estas manifestaciones visuales se mantienen aun después de haberse reintegrado a condiciones de fuerza de gravedad normal. Una de estas alteraciones es el cambio de la presión intraocular (PIO).

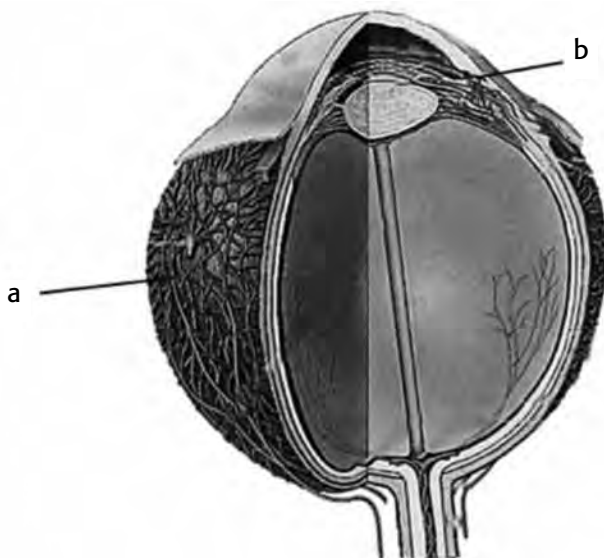
Se ha identificado un aumento de la presión intraocular de los astronautas en los primeros días de exposición a la microgravedad, que progresivamente se reduce y al final llega a normalizarse en los días subsiguientes. En un estudio realizado durante un vuelo parabólico en donde se logró llegar a la ingravidez, en un grupo de sujetos normales, se identificó un aumento de la PIO de 5 mm Hg que fue registrado con un tonómetro de aplanación manual<sup>9, 10</sup>

También, dentro de estudios controlados con individuos colocados en decúbito, para demostrar los cambios en la PIO producidos por la ingurgitación venosa de la circulación en la cabeza, en donde se mantuvo la reclinación cefálica durante 10 minutos, se logró demostrar un aumento de la PIO de 5 mm Hg que volvía a sus niveles de normalidad, previos al estudio, a los pocos minutos de colocarse en posición sedente con elevación de la cabeza. En estudios en donde la posición de la cabeza se mantenía durante más tiempo hacia abajo, después del séptimo día la presión empezaba a reducirse paulatinamente normalizándose al suspender el estudio.<sup>11</sup>

Esta elevación de la PIO se ha relacionado con la disminución de la frecuencia cardiaca y de la presión arterial secundarias a la posición con reclinación de la parte cefálica del cuerpo, que da origen a una ingurgitación venosa de toda esta región y también en el globo ocular, principalmente en la capa coroidea, provocada por modificaciones de la perfusión ocular y aumento del flujo sanguíneo de la coroides.

La ingurgitación de los vasos coroideos provoca una expansión por aumento de su volumen que desplaza el contenido intraocular hacia la parte anterior del ojo debido a que la rigidez de la capa escleral impide su modificación de manera abrupta. De forma simultánea hay aumento de la presión de las venas episclerales a través de las cuales se realiza el drenaje del humor acuoso por la vía trabecular, de la cámara anterior hacia la circulación del exterior del globo ocular, lo cual lo dificulta y lo reduce provocando retención de este líquido en el interior de la cámara anterior del ojo. Estos dos mecanismos pueden explicar el aumento de la PIO<sup>12</sup> (Figura 18.3).

Por supuesto, existen mecanismos autorreguladores, que seguramente son puestos en acción cuando el ojo es sometido a estos cambios, no se presentan de inmediato y pueden tardar algunos días para hacerse manifiestos, con lo que finalmente se compensa y se reduce la PIO. No todos los ojos tienen una respuesta igual y de aquí que no necesariamente es algo que llegue a provocar problemas visuales graves como sería el desarrollo de glaucoma, especialmente en



---

**Figura 18.3.**

Esquema del globo ocular. Se muestra: **a**, Capa vascular o coroides, con abundantes vasos arteriales y venosos; **b**, Venas episclerales que participan en el drenaje del humor acuoso.

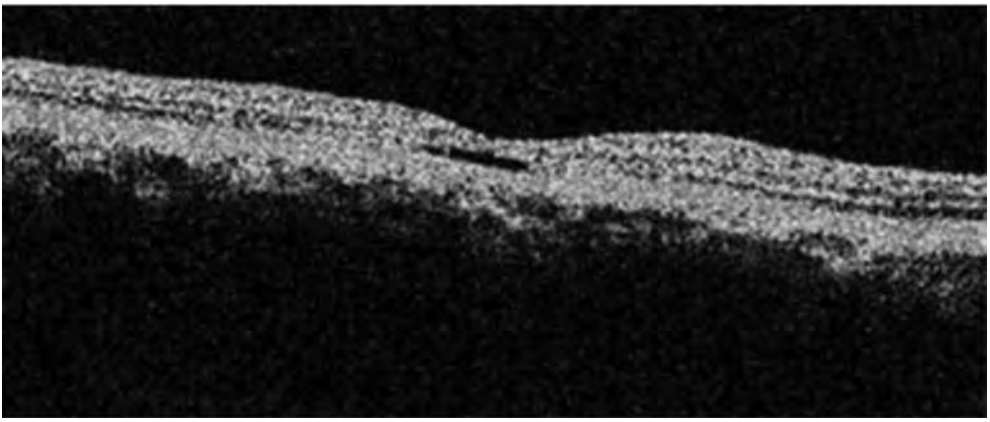
misiones espaciales prolongadas, sin embargo es algo que deberá ser valorado en los astronautas para identificar a los que estén predispuestos a presentar hipertensión intraocular, para administrar medidas que mantengan la PIO en niveles normales o bien para impedirles que se expongan a una situación de riesgo.

## **Aumento de volumen de la coroides subfoveal y de la retina foveal**

En los estudios controlados en los que se simulan los cambios provocados en ambientes de microgravedad en donde hay desplazamiento de líquidos a la parte superior del cuerpo y a la cabeza, y que se reproducen al mantener en decúbito al sujeto en estudio, el ojo queda colocado por abajo del *atrium* cardiaco lo que da lugar a una elevación de la presión venosa al incrementarse la presión hidrostática. Esta elevación de la presión venosa provoca cambios morfológicos en el ojo porque la coroides, que es la capa vascular con vasos venosos abundantes y de mayor tamaño, al retener más cantidad de sangre provoca ingurgitación venosa y aumento de su volumen que se ha expuesto anteriormente, como uno de los mecanismos que provocan elevación de la PIO.

Estos cambios en el espesor de la coroides, en condiciones de simulación de microgravedad, se han documentado por medio de estudios con tomografía de coherencia óptica (OCT) en áreas concéntricas localizadas alrededor de la fovea para identificar estos cambios en la coroides





**Figura 18.4.** Tomografía de coherencia óptica (OCT) donde se muestran las capas de la retina sin alteraciones, con aumento del grosor de la coroides.

perifoveal y subfoveal; estas son localizaciones muy sensibles ya que es el área donde se produce la agudeza visual de mayor definición y precisión por lo que si se desarrollan cambios severos en esta región, tendrían implicaciones importantes en la visión.<sup>13</sup>

En un estudio en circunstancias de simulación de microgravedad por inclinación de la cabeza durante 15 min, se hicieron registros de los cambios en el grosor de la coroides por medio de tomografía de coherencia óptica (OCT) en la región subfoveal y en la retina a nivel de la fovea. Los investigadores demostraron que hubo aumento de volumen de la coroides, pero no hubo cambios en el grosor de la retina.<sup>14</sup> Sugieren que este aumento de volumen en la coroides subfoveal obedece a los cambios de flujo de la circulación arterial del ojo y a la estasis venosa de la capa vascular, por el contrario los mecanismos autorreguladores y con función protectora de la retina no permiten modificaciones importantes de este tejido, a lo que se puede agregar que en esta zona foveal de la retina hay ausencia de vasos, lo que explicaría por qué no se presentó ningún cambio ni aumento de volumen de esta zona vital del tejido retiniano<sup>3,14</sup> (Figura 18.4).

## Edema de papila

Las modificaciones que ocurren en la circulación de la parte cefálica del cuerpo, cuando se encuentra en condiciones de ingravidez, pueden estar implicadas en episodios de hipertensión intracraneal (HIC), con manifestaciones oftalmológicas secundarias.

Hay registros de algunos astronautas que presentaron elevación de la presión intracraneal durante alguna de sus misiones y en los cuales también se hicieron manifiestas alteraciones visuales.<sup>4</sup>

La homeostasis en el flujo del líquido cefalorraquídeo se basa en una relación compleja de múltiples factores, incluyendo mecanismos bioquímicos y neurovegetativos, que al modificarse en condiciones de microgravedad podrían provocar alteraciones de la presión intracraneal. Se ha comparado este tipo de cambios intracraneales que se presentan en ambientes de microgravedad

con los que se presentan en la entidad nosológica conocida como seudotumor cerebral o hipertensión intracraneal idiopática ya que las manifestaciones clínicas son semejantes.<sup>15,16</sup>

El desplazamiento de líquidos corporales hacia la cabeza, durante los vuelos espaciales es algo que ha sido demostrado,<sup>5</sup> se presenta ingurgitación yugular, edema de los tejidos del cuello y de la cara y se considera que cuando menos dos litros de líquidos son desplazados de la parte inferior a la superior del cuerpo.<sup>17</sup> Este cambio está relacionado con la modificación de la presión hidrostática en ambientes de microgravedad, en la Tierra el gradiente de presión hidrostática mantiene a la circulación venosa en la parte inferior sin grandes dificultades para su desalojo de la parte superior del cuerpo y de la base del cráneo hacia la aurícula del corazón.

La dificultad en el retorno venoso de la circulación intracraneal produce ingurgitación venosa y aumento del volumen cerebral que genera una hipertensión intracraneal (HIC) debido a que la pared ósea del cráneo es inextensible por su rigidez. De aquí se derivan otros cambios a nivel intersticial con retención de líquidos y más aumento de la presión intracraneal (PIC), hasta que se ponen en juego mecanismos autorreguladores que pueden modificar la secuencia de procesos y reducir o eliminar la HIC.

Con el fin de identificar todas estas alteraciones circulatorias que provocan el aumento de la PIC se han realizado estudios en sujetos en reposo con la cabeza por debajo del plano horizontal por 30 días, donde se identificaron datos de hipertensión intracraneal en algunos de ellos que fueron determinados por estudios de ultrasonido y de resonancia magnética.

Una incógnita no resuelta hasta el momento es por qué estos cambios de la presión intracraneal y modificaciones en el área visual no se presentan en todos los astronautas, solamente 20% de ellos puede llegar a desarrollarlos, sin tenerse una respuesta precisa de por qué en el restante 80% no se presentan.<sup>4</sup>

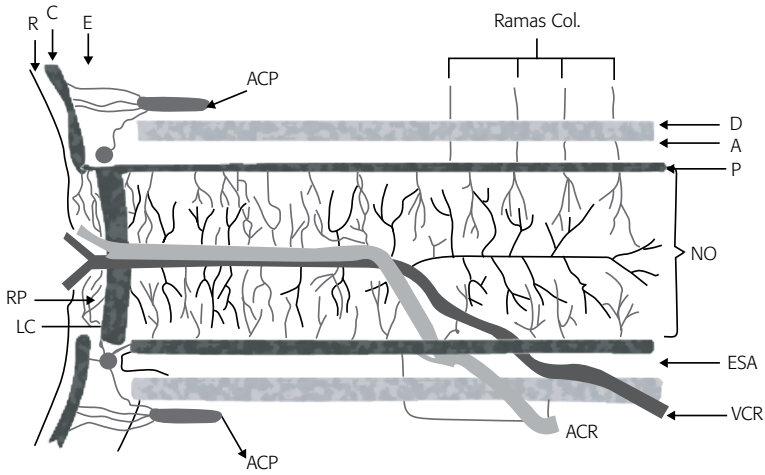
Se ha diseñado un modelo matemático sobre la hemodinamia cerebral para reproducir lo que ocurre en los vuelos espaciales y de esta manera determinar las modificaciones de la PIC con variaciones en los tiempos de exposición y relacionarlos también con cambios en la presión intraocular (PIO), lo que en un futuro podrá incrementar la información que permita prevenir estos riesgos para los astronautas y para el éxito de sus misiones.<sup>18</sup>

En la patología del edema del nervio óptico o papiledema, se conoce la relación existente entre la elevación de la presión intracraneal y el desarrollo de edema de la papila al transmitirse la HIC por las envolturas del nervio óptico, que son una prolongación de las meninges que envuelven el cerebro (Figura 18.5).

Los mecanismos por los cuales finalmente se desarrolla el edema de la papila es por la reducción de la circulación de retorno de la vena central de la retina y por cambios en la dinámica de la circulación y homeostasis a nivel de la lámina cribosa de la esclera en el polo posterior del globo ocular, que es el sitio por el que las prolongaciones axonales de las neuronas retinianas salen y forman el nervio óptico; también es el sitio por donde llega la arteria central de la retina al interior del ojo y por donde sale la vena central, la envoltura del nervio óptico es una prolongación de las meninges cerebrales que lo recubren en todo su trayecto hasta el interior de la cavidad craneal. Todas estas condiciones anatómicas son las que permiten que un aumento de la presión del líquido cefalorraquídeo se transmita al nervio óptico y se produzcan las modificaciones hidrodinámicas que dan origen al edema de la papila secundario a hipertensión intracraneal (Figura 18.6).

Cuando el edema de la papila se mantiene por periodos prolongados pueden generarse lesiones irreversibles de los axones neuronales con atrofia del nervio óptico y severas repercusiones en la visión.

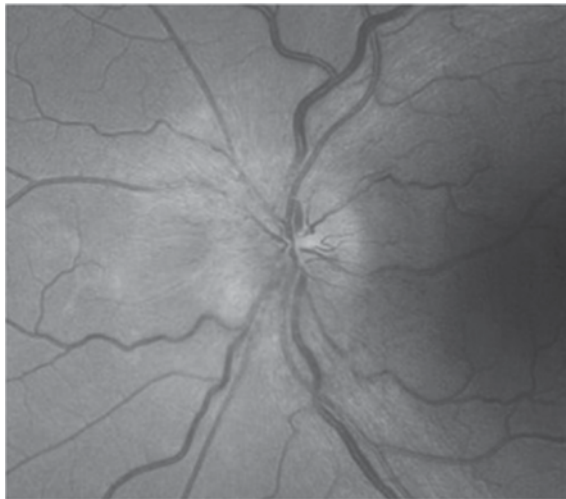
En estos casos se ha propuesto la administración de acetazolamida para la reducción de la presión intracraneal y evitar las consecuencias de mantener un desequilibrio en el flujo del líquido cefalorraquídeo en misiones de larga duración, si esto llegara a presentarse.



**Figura 18.5.**

Esquema del nervio óptico (NO) para mostrar las estructuras anatómicas a nivel de la lámina cribosa en el polo posterior del ojo, hasta donde se extienden las meninges recubriendo el NO y la relación con la arteria y la vena centrales de la retina.

(A, aracnoides; C, coroides; D, duramadre; P, piamadre; R, retina; E, esclera; ACR, arteria central de la retina; VCR, vena central de la retina; Ramas Col., ramas colaterales; NO, nervio óptico; ESA, espacio subaracnoideo; ACP, arteria ciliar posterior; RP, región prelaminar; p LC, lámina cribosa.)



**Figura 18.6.**

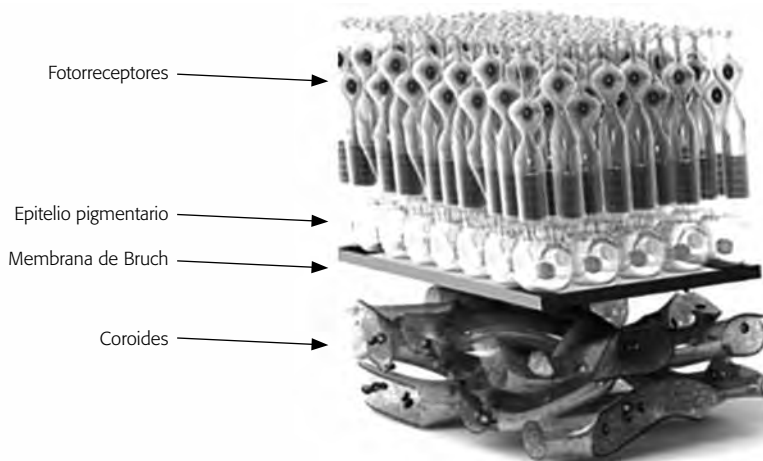
Edema de papila, con borramiento de los bordes y pérdida de la excavación fisiológica del nervio óptico así como ingurgitación de las venas retinianas.

## Daño de las células del epitelio pigmentario de la retina en condiciones de microgravedad

La retina es el tejido más importante y también el más frágil que se encuentra involucrado en el proceso visual. Se sabe con precisión que la exposición a la radiación solar y a la radiación cósmica sin ninguna protección produce daños severos a este tejido que dan como consecuencia deterioro visual importante. Por lo que en estos vuelos cósmicos se han adoptado medidas estrictas para evitar la exposición a estas radiaciones si no se colocan protectores especiales para los ojos. Sin embargo no hay información sobre lo que puede ocasionar la ingravidez en el tejido retiniano.<sup>19</sup>

En un estudio experimental para identificar los posibles daños que pueden desarrollarse en la retina y cuáles podrían ser los mecanismos patogénicos involucrados en la producción de las lesiones en condiciones de microgravedad, eliminando a la radiación como posible causa, se colocaron células cultivadas de epitelio pigmentario de retina humana, en un birreactor que por medio de rotación simuló un ambiente de ingravidez. Después de la exposición a estas condiciones, las células mostraron una respuesta inflamatoria que estuvo mediada por prostaglandinas, el proceso inflamatorio llegó a producir daño en algunas de estas células. Al mantenerse en aislamiento las células durante todo el procedimiento se eliminó la posibilidad de que la respuesta inflamatoria estuviera provocada por agentes químicos exógenos o por exposición a radiación.

En otro grupo de células sometidas al mismo procedimiento pero en las que se colocó en el medio sustancias antiinflamatorias no tóxicas, el proceso fue modificado y se obtuvo una protección de las células que no mostraron ningún deterioro, por lo que se concluye que la ingravidez puede provocar daños en las células pigmentarias de la retina con riesgo importante de la visión en caso de que esto ocurriera, pero también se propone que la administración de fármacos antiinflamatorios previos a la exposición podrían evitar lesiones de esta capa celular de la retina atribuibles a la microgravedad<sup>20</sup> (Figura 18.7).



**Figura 18.7.**

Esquema para identificar las capas de la retina y el epitelio pigmentario así como su relación con la capa corioidea.

La conclusión, aunque no puede considerarse definitiva, es que el epitelio pigmentario de la retina pudiera presentar daño provocado por la microgravedad en vuelos espaciales, lo que provocaría un riesgo importante para la visión, pero estos cambios pudieran ser prevenidos si unas semanas antes del despegue se administran antiinflamatorios y antioxidantes.<sup>20</sup>

## Hipermetropía

Los vuelos espaciales de seis meses de duración o más pueden causar una amplia gama de cambios en la visión de los astronautas, como ha sido planteado en párrafos anteriores. Algunos problemas visuales están relacionados con cambios en la refracción del ojo que provoca visión borrosa, principalmente para ver de cerca, que persiste después de que los astronautas regresan a la Tierra.

Un equipo de los oftalmólogos en colaboración con la NASA<sup>4</sup> estudiaron a siete astronautas, todos de alrededor de 50 años, que pasaron por lo menos seis meses en el espacio. Todos presentaron visión borrosa para ver de cerca en diversos grados durante el tiempo que permanecieron en la estación espacial. Estos cambios visuales se iniciaron alrededor de la sexta semana de estancia y persistieron, en algunos de ellos, durante varios meses después de haber terminado su misión, ya de regreso a la Tierra.

Los investigadores consideraron que las anomalías del ojo no estuvieron relacionadas con el lanzamiento o la reentrada a la atmósfera terrestre, ya que estos cambios visuales sólo se presentaron en los astronautas que pasaron largo tiempo en microgravedad.

El examen oftalmológico de los siete astronautas reveló algunas anomalías, principalmente producidas por el aumento de volumen de la capa coroidea. Esta condición reduce el eje antero-posterior del globo ocular y da como consecuencia una hipermetropía, que en sujetos por arriba de los 40 años de edad incrementa la presbicia.

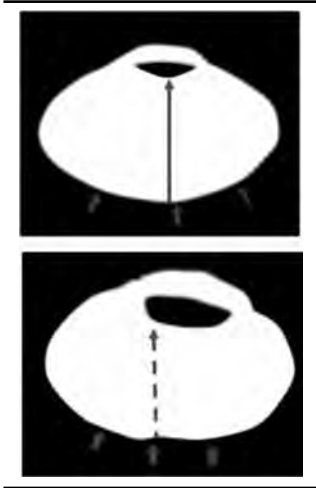
Ante esta condición se ha optado por prescribir lentes con graduación óptica para corrección de presbicia que los astronautas llevan en su viaje, en caso de presentarse esta deficiencia visual usan los lentes corrigiendo el problema de refracción.

Los investigadores concluyen que los cambios en el sistema visual pueden representar un conjunto de adaptaciones a la microgravedad. El grado y tipo de respuesta parecen variar entre los astronautas. Esperan demostrar si algunos astronautas son menos afectados que otros y por lo tanto, resultan más aptos para los vuelos espaciales de larga duración, como un viaje de ida y vuelta a Marte<sup>3</sup> (Figura 18.8).

## Catarata

Otra de las causas de riesgo visual para los astronautas en los vuelos espaciales es la exposición a las radiaciones cósmicas o a la luz ultravioleta que pueden provocar cambios en la transparencia de los cristalinos con desarrollo de catarata o bien lesiones severas de la retina.<sup>21,22</sup>

Se ha considerado que en los vuelos espaciales los astronautas pueden estar más expuestos a las radiaciones cósmicas y a los rayos ultravioleta debido a que la protección de la atmósfera terrestre, que funciona como un escudo protector en la superficie terrestre, cuando están por arriba de esta atmósfera dicha protección no existe y por esta razón el riesgo de desarrollar catarata es más elevado.



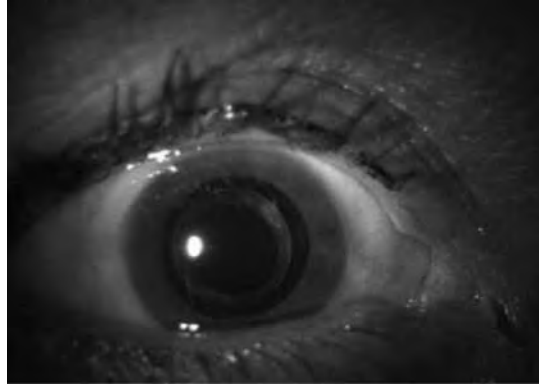
**Figura 18.8.**  
 Reducción del eje anteroposterior del globo ocular, por aumento del volumen de la coroides en el polo posterior del ojo, con desplazamiento del contenido intraocular hacia la parte anterior.

A pesar de lo anterior y a que se han registrado casos de astronautas con catarata, no ha quedado muy claro que el desarrollo de estas lesiones sean debidas a la exposición a las radiaciones durante las misiones en las que han participado, debido a que existe una cantidad importante de factores y procesos que se han relacionado con la aparición de catarata y no solamente la radiación o los rayos ultravioleta.<sup>23</sup>

La catarata en la población en general es la causa más frecuente de pérdida de la visión, su prevalencia es muy elevada a partir del quinto decenio de la vida. La etiología es multifactorial y es lo que ha hecho difícil demostrar en los pilotos y astronautas que exista una causa única. Se han involucrado condiciones como la edad, diabetes, nutrición, factores genéticos, obesidad, alcoholismo, tabaquismo, drogas, diversos medicamentos como los esteroides y radiaciones infrarrojas, entre muchas otras. Por lo que hasta el momento no se ha establecido como definitivo un riesgo mayor para los astronautas, en comparación con la población en general; merece considerarse la realización de estudios comparativos con este enfoque.<sup>24</sup>

En un estudio comparativo entre un grupo de pilotos militares y otro de astronautas, no se encontraron diferencias significativas en cuanto a la frecuencia de aparición de catarata y existiendo también múltiples variables no se pudo establecer qué porcentaje del riesgo de padecer catarata fue secundario a la exposición a radiaciones en los dos grupos. Se concluye que se requieren estudios más controlados para demostrar que los astronautas tienen un riesgo mayor de desarrollar catarata por sus actividades en el espacio<sup>25</sup> (Figura 18.9).

El tratamiento de este padecimiento es quirúrgico y consiste en la extracción del cristalino preservando su cápsula para colocar en ese sitio una lente intraocular. Es un procedimiento que se realiza en 1.8 millones de personas al año en Estados Unidos. Una situación importante es que se tiene experiencia en el tratamiento de este padecimiento en pilotos de aviones militares y en astronautas, demostrando que no existe ninguna limitación visual para sus actividades de vuelo y sobre todo para la estabilidad de la lente intraocular en microgravedad; no se han documentado modificaciones en su posición o alteraciones visuales secundarias a la presencia de la lente intraocular durante los viajes espaciales.<sup>26</sup>



**Figura 18.9.**

Ojo en donde se ha hecho extracción de catarata con la colocación de una lente intraocular para rehabilitar la visión

## Movimientos oculares y coordinación visuomotora

La microgravedad no afecta de manera directa a la función visual, a menos que se desarrolle una lesión severa en las estructuras vitales del ojo, como las que se han mencionado, que no pueda ser corregida oportunamente o que no se hubiera prevenido; sin embargo, han sido demostrados cambios durante los vuelos espaciales que son atribuidos a modificaciones de la interrelación existente entre el vestíbulo, el sistema propioceptivo de los músculos del cuello y los movimientos oculares. Bajo la fuerza de gravedad en la Tierra, existe una integración intersensorial entre la orientación espacial, los movimientos compensatorios de los ojos así como los ajustes posturales necesarios, controlados por el sistema vestibular y el sistema propioceptivo.

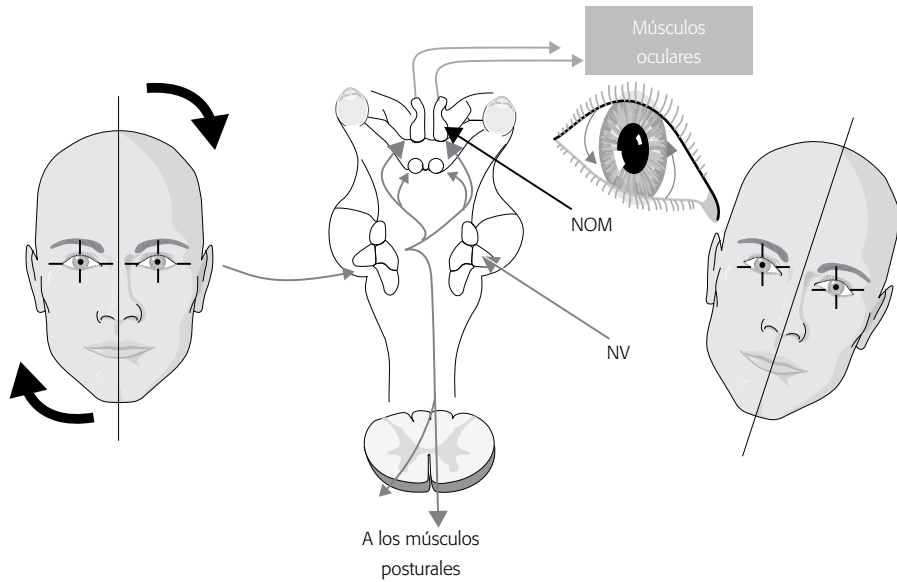
En ambientes de microgravedad se hace indispensable una readaptación a estas condiciones ya que la información que proviene de los otolitos vestibulares se encuentra alterada por la ausencia de la fuerza de gravedad. La orientación entre la posición de la cabeza y el resto del cuerpo se ve perturbada y el control de los movimientos oculares se ve afectada por esta condición<sup>27</sup> (Figura 18.10).

Una de las funciones que se encuentran alteradas en los movimientos oculares es la mirada de seguimiento, los movimientos finos de seguimiento de los ojos para mantener fija la mirada, como en la lectura o la mirada sacádica rápida para la localización de objetos moviéndose en la periferia del campo visual.

También los movimientos posturales de los ojos, de acuerdo con la posición de la cabeza se pueden ver alterados

Debido a esta razón la coordinación visuomotora, que posibilita la acción para tomar un objeto determinado y colocarlo en un punto específico, se dificulta. La lectura o la escritura también se encuentran limitadas, lo mismo que el manejo de utensilios o instrumentos.

La exposición a la microgravedad da lugar a conductas adaptativas que permiten el control de los movimientos oculares, en las cuales se involucran procesos regulatorios de la información vestibular y cambios en la integración del sistema nervioso central.<sup>28</sup>



### Figura 18.10.

Control de los movimientos oculares en los que participan el vestíbulo, su interconexión con los núcleos oculomotores y su relación con los músculos posturales que permiten mantener fijación de la mirada cuando hay movimientos de la cabeza, condición que se pierde en ambientes de microgravedad. (NV, núcleo vestibular; NOM, núcleo oculomotor.)

Cuando los astronautas regresan a la superficie terrestre y nuevamente se exponen a la fuerza de gravedad, estos mecanismos del sistema propioceptivo y la interrelación vestibulo-ocular se recobran, sin embargo existen estudios en los que la readaptación puede tardar hasta 9 días, dependiendo del tiempo de duración de su exposición a la ingravidez.<sup>29</sup>



# Referencias

1. Pavy Le-Traon A, Heer M, Narici MV. From space to Earth: advances in human physiology from 20 years of bed rest studies (1986-2006). *Eur J Appl Physiol*. 2007;101:143-94.
2. Payne MW, Williams DR, Trudel G. Space flight rehabilitation. *Am J Phys Med Rehabil*. 2007;86:583-91.
3. Taibbi G, Cromwell L, Kapoor K, Godley B, Vizzeri G. The effect of microgravity on ocular structures and visual function: A review. *Surv Ophthalmol*. 2013;58:155-63.
4. Mader TH, Gibson CR, Pass AF, Kramer LA, et al. Optic disc edema, globe flattening, choroidal folds and hyperopic shifts observed in astronauts after long-duration space flight. *Ophthalmology*. 2009;118:2058-69.
5. Arbeille P, Fomina G, Roumy J, Alferova I, Tobal N. Adaptation of the left heart, cerebral and femoral arteries, and jugular and femoral veins during short and long-term head-down tilt and spaceflights. *Euro J App Physiol*. 2001;86:157-68.
6. Lakin WD, Stevens PL, Penar PL. Modeling intracranial pressures in microgravity: The influence of blood barrier. *Aviat Space Environ Med*. 2007;78:932-6.
7. Nelson ES, Mulugeta L, Myers J. Microgravity-induced fluid shift and ophthalmic changes. *Life*. 2014;4:621-65.
8. Taibbi G, Kaplowitz K, Cromwell R, Godley B, Zanello S, Vizzeri G. Effects of 30-day head-down bed rest on ocular structures and visual function in a healthy subjects. *Aviat Space Environ Med*. 2013;84:148-54.
9. Mader TH, Gibson CR, Caputo M, et al. Intraocular pressure and retinal vascular changes during transient exposure to microgravity. *Am J Ophthalmol*. 1993;115:347-50.
10. Draeger J, Schwartz R, Groenhoff S, Stern C. Self-tonometry under microgravity conditions. *Aviat Space Environ Med*. 1995;66:568-70.
11. Chiquet C, Custaud MA, Le Traun AP, Millet C, Charib C, Denis P. Changes in intraocular pressure during prolonged (7-Day) head-down tilt bedrest. *J Glaucoma*. 2003;12:204-8.
12. Zheng Y, Wong TY, Mitchell P, Friedman DS, He M, Aung T. Distribution of ocular perfusion pressure and relationship with open-angle glaucoma: The Singapore Malay Eye Study- Invest Ophthalmol Vsi Sci. 2010; 513399-404.
13. Spaide RF, Koizumi H, Pozzoni MC. Enhanced depth imaging spectral-domain optical coherence tomography. *Am J Ophthalmol*. 2008;146:496-500.
14. Shinjima A, Iwasaki KI, Aoki K, Owaga Y, Yanagida R, Yuzawa M. Subfoveal choroidal thicknees and foveal retinal thicknees during head-down tilt. *Aviat Space Environ Med*. 2012;83(4):388-93.
15. Wall M. Idiopathic intracranial hypertension. *Neruol Clin*. 2010;28:593-617.
16. Friedman DL. Papilledema and idiopathic intracranial hypertension. *Continuum: Life long learning in Neurology* 2014; 20(4Neuro-Ophthalmol):857-76.
17. Moore TP, Thornton WE. Space shuttle inflight and post-flight fluid shifts measured by leg volumen changes. *Aviat Space Envir Med*. 1987;58: A91-A96.
18. Rose WC. Computational simulation to understand vision changes during prolonged weightlessness. 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS. Osaka, Japan. 2013; 4094-97.
19. Ohnishi K, Ohnishi T. The biological effects of space radiation during long stays in space. *Biol Sci Space*. 2004;18(4):201-5.
20. Roberts EJ, Kukielczak BM, Chignell CF, Sik RH, Hu DN, Principato MA. Simulated microgravity induced damage in human retinal pigment epithelial cells. *Molecular Vision*. 2006;12:633-8.
21. Sliney DH. Exposure geometry and spectral enviroment determine photobiological effects on the human eye. *Photochem Photobiol*. 2005;81:483-9.
22. Tombran-Tink J, Barnstable Cj. Sapce shuttle flight environment induces degeneration in the retina of rat neonates. *Gravit Space Biol Bull*. 2005;18:97-8.
23. Chylack Lt Jr, Perterson LE, Feiveson AH. NASA study of cataract in astronauts (NASCA). Report 1: Cross-sectional study of the relationship of exposure to space radiation and risk of lens opacity. *Radiat Res*. 2009;172:10-20.
24. Rastegar N, Eckart P, Metz M. Radiation-induced cataract in astronauts and cosmonauts. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2002;240:543-7.
25. Jones JA, McCarten M, Manuel K, Djojonegoro B, Murray J, Friversen A, et al. Cataract formation mechanisms an risk in aviation and space crews. *Aviat Space Environ Med*. 2007;78(4 suppl):A56-A66.
26. Mader TH, Koch DD, Manuel K, Gibson R, Effenhauser RK, Musgrave S. Stability of vision during flight in an astronaut with bilateral intraocular lenses. *Amer J Ophthalmol*. 1999; 127:342-43.
27. Lackner JR, Dizio P. Space motion sickness. *Ex Brain Res*. 2006:175-99.
28. Kornilova LN. The role of gravitation-dependent system in visual tracking. *Neurosci Behav Physiol*. 2004;34(8):773-81.
29. Kornilova LN, Naumov IA, Azarov KA, Sagalovitch VN. Gase control and vestibular.cervical-ocular responses after prolonged exposure to microgravity. *Aviat Space Environ Med*. 2012;83:1123-34.

## Sección 3

# Escenarios especiales de la medicina espacial

19. Reanimación cardiopulmonar en microgravedad, 235
20. Impacto de la microgravedad y la radiación espacial en el comportamiento celular y carcinogénesis, 265
21. Microbiología espacial e infecciones en el Espacio, 275
22. Urgencias médicas en los vuelos espaciales, 291
23. Anestesia y manejo de la vía aérea en microgravedad, 299
24. Perfil psicológico de los astronautas y adaptación al confinamiento en el Espacio, 311
25. La odontología en el Espacio, 325
26. Cambios hematológicos en microgravedad. La fascinante aventura espacial, 345
27. Cirugía en el Espacio, 351





# 19. Reanimación cardiopulmonar en ambiente de microgravedad

Marco Antonio Robles Rangel

## ■ Introducción

Si bien los vuelos espaciales tripulados han expandido el horizonte de exploración de los seres humanos, es importante no perder de vista que el espacio exterior es el ambiente más hostil e inhóspito que la humanidad haya encontrado jamás. Ausencia de oxígeno, temperaturas extremas, radiaciones letales e intensos cambios de aceleración son algunas de las condiciones que giran en torno a las misiones tripuladas que van al espacio. Tal pareciera que las poderosas interacciones físicas que operan en el universo actúan ignorando a los frágiles seres vivos que osadamente abandonan la seguridad de su planeta para saciar su curiosidad y ampliar la visión de ellos mismos y del medio que los rodea. Sólo a través del constante apego a los preceptos científicos, al más elaborado desarrollo tecnológico y a la más estricta selección de los hombres y mujeres que viajan al espacio (tanto en el terreno físico, psicológico y profesional), se ha logrado superar el confinamiento que impone la gravedad terrestre para poder orbitar el planeta y para caminar (en seis ocasiones), sobre la superficie lunar.

Aun cuando los astronautas y cosmonautas gozan de un perfecto estado de salud y se encuentran bajo el cobijo de portentos tecnológicos como las naves, estaciones y trajes espaciales, siempre existirá la posibilidad de que algo pueda perturbar su bienestar físico, ya sea por los retos que impone un ambiente para el cual el organismo humano no está diseñado o bien por las eventuales contingencias derivadas de una de las empresas de mayor riesgo en las que el ser humano se haya embarcado y que es, precisamente, la exploración del espacio. Las situaciones adversas que pueden enfrentar los viajeros espaciales van desde la presencia de síntomas diversos que se pueden autolimitar o controlar con algún manejo sencillo, hasta eventos que podrían considerarse verdaderas emergencias médicas y que ameritan de la implementación de complejas rutas de acción derivadas del reto adicional de no contar con un sitio que pueda brindar un tratamiento médico inmediato ante una situación que amenaza la vida. En este último escenario es donde ubicamos la posibilidad de otorgar medidas como lo es el denominado soporte vital cardiovascular y cuyo elemento más importante y representativo es la reanimación cardiopulmonar (RCP). Llegar a esta instancia implica que el astronauta o cosmonauta ha presentado un paro cardíaco y no queda la menor duda de que la tripulación se tendrá que enfrentar a la más extrema de las emergencias médicas. Dado que este riesgo está latente, los astronautas y personal en tierra tendrán que estar preparados y aplicar protocolos que tengan fundamento en las investigaciones que han evaluado, precisamente, la RCP en ambiente de microgravedad. Tema que analizamos en el presente capítulo.

# Consideraciones generales sobre la RCP y el soporte vital cardiovascular básico y avanzado

La RCP es un procedimiento de emergencia aplicado en el contexto del paro cardiaco. Tiene como objetivo mantener un volumen sanguíneo circulante con el fin de preservar las funciones del cerebro y del corazón en tanto se instauran otras medidas de apoyo que eventualmente permitan que el paciente sobreviva y se recupere.

La RCP implica el otorgar compresiones y ventilaciones y de que estas sean aplicadas adecuadamente. Cuando se logra este objetivo se habla de “RCP de alta calidad”. De acuerdo con las guías 2015 de RCP y cuidados cardiovasculares de emergencia de la American Heart Association (AHA) y con las guías 2015 del European Resuscitation Council (ERC), la RCP de alta calidad reúne las características enumeradas en el Cuadro 19.1.<sup>1-4</sup>

Para saber si se está otorgando RCP de alta calidad se disponen de métodos tanto indirectos como directos. Evidentemente, los métodos directos tendrán una mejor correlación con compresiones y ventilaciones efectivas.<sup>6,7</sup> Dichos métodos se enumeran en el Cuadro 19.2.

Lograr una RCP de alta calidad requiere de experiencia. Idealmente, el reanimador deberá contar con entrenamiento previo que contemple sesiones de práctica en un maniquí y la evaluación de las destrezas por parte de un profesor; así como la oportunidad de haber llevado ese aprendizaje al terreno clínico, logrando afinar detalles con respecto a la técnica y conseguir adaptarse a las circunstancias particulares de cada evento. Si esto parece algo elaborado en ambiente terrestre, podremos imaginar que la RCP de alta calidad en gravedad cero podría ser un poco más difícil de alcanzar (*ver* más adelante).

## Cuadro 19.1.

### Características de la RCP de alta calidad en el paciente adulto<sup>1-4</sup>

1. Las manos deberán colocarse en la mitad inferior del esternón
2. Comprimir el tórax a una profundidad mínima de 5 cm (a lo que se le ha denominado “comprimir fuerte”); no obstante, la profundidad no deberá ser superior a los 6 cm
3. Comprimir el tórax con una frecuencia de 100 a 120 compresiones por minuto (a lo que se le conoce como “comprimir rápido”)
4. Permitir una completa expansión del tórax entre compresiones
5. Minimizar las interrupciones entre las compresiones
6. Si no se encuentra insertado un dispositivo avanzado para la vía aérea (p. ej., mascarilla laríngea o cánula endotraqueal), otorgar dos ventilaciones después de 30 compresiones; cada ventilación de 1 segundo de duración y verificando que existe elevación torácica
7. Si se encuentra insertado un dispositivo avanzado para la vía aérea otorgar 1 ventilación cada 6 segundos (10 respiraciones por minuto), mientras se realizan compresiones torácicas continuas
8. Evitar la ventilación excesiva
9. Rotar o cambiar al reanimador que otorga las compresiones cada 2 minutos; o antes, si se presenta fatiga.
10. Las compresiones deben ser otorgadas sobre una superficie sólida

RCP, reanimación cardiopulmonar.

## Cuadro 19.2.

### Métodos para evaluar la calidad de la RCP<sup>6,7</sup>

---

#### Indirectos

1. Palpación del pulso (carotídeo o femoral), durante la aplicación de las compresiones
2. Registro electrocardioscópico (en monitor) de ondas sinusoidales durante la RCP
3. Dispositivos de retroalimentación visual y/o auditiva
  - Luces
  - Metrónomos
  - Escalas numéricas
  - Indicaciones verbales automatizadas
  - Sistemas de alarma (visual o auditiva)
4. Visualización de la elevación torácica durante las ventilaciones
5. Auscultación de ruidos respiratorios durante las ventilaciones

---

#### Directos

1. Onda de capnografía para el registro cuantitativo de la presión parcial de dióxido de carbono exhalado (PETCO<sub>2</sub>)\*
  - Valor normal:  $\geq 35$  mm Hg
  - Paciente en paro cardíaco sin RCP: 0 mm Hg
  - Paciente en paro cardíaco con RCP inefectiva:  $< 10$  mm Hg
  - Paciente en paro cardíaco con RCP efectiva:  $> 10$  mm Hg
  - Paciente con retorno a la circulación espontánea: variable. Habitualmente  $\geq 35$  mm Hg
2. Determinación intraarterial de la presión diastólica
  - Valor normal: 60-80 mm Hg
  - Paciente en paro cardíaco sin RCP: 0 mm Hg
  - Paciente en paro cardíaco con RCP inefectiva:  $< 20$  mm Hg
  - Paciente en paro cardíaco con RCP efectiva:  $> 20$  mm Hg
  - Paciente con retorno a la circulación espontánea: variable. Habitualmente  $\geq 40$  mm Hg
3. Saturación de oxígeno venosa central
  - Valor normal: 60-80%
  - Paciente en paro cardíaco sin RCP: 0%
  - Paciente en paro cardíaco con RCP inefectiva:  $< 30\%$
  - Paciente en paro cardíaco con RCP efectiva:  $> 30\%$
  - Paciente con retorno a la circulación espontánea: variable. Habitualmente  $\geq 40\%$

\* La capnografía no sólo confirma la adecuada inserción de una cánula endotraqueal (lo que asegura una adecuada ventilación), sino que también monitorea la calidad de las compresiones torácicas y el eventual retorno a la circulación espontánea. RCP, reanimación cardiopulmonar; PETCO<sub>2</sub>, presión parcial de dióxido de carbono exhalado

Si bien la RCP es el elemento primordial a instaurar en el paciente en paro cardíaco, existen otras medidas complementarias (aplicables tanto fuera como dentro del hospital), que en conjunto incrementan la probabilidad de que el paciente retorne a la circulación espontánea y eventualmente sobreviva. La integración de estas medidas (incluida la RCP), recibe el nombre *soporte vital cardiovascular* el cual se suele dividir en básico y avanzado. En el paro cardíaco, ya sea en el contexto prehospitalario u hospitalario, siempre se comenzará con el soporte vital básico. Se continuará con el soporte vital avanzado siempre y cuando se disponga del personal y

los elementos tecnológicos necesarios para llevar el cuidado del enfermo a un nivel que permita otorgar la máxima atención posible. Ello, con el objetivo de conseguir un retorno a la circulación espontánea (RCE) y lograr las mejores posibilidades de sobrevida. El soporte vital avanzado se circunscribe (por lo general), al medio hospitalario. El Cuadro 19.3 describe los elementos de los que se conforma el soporte vital cardiovascular.

Para facilitar la implementación del soporte vital cardiovascular se elaboran algoritmos de manejo que definen las acciones a realizar de una manera clara y sistematizada. Las Figuras 19.1 y 19.2 muestran, de manera simplificada e integrada, los algoritmos actuales de soporte vital cardiovascular básico y avanzado (BCLS y ACLS, siglas en inglés) implementados por la AHA y el ERC.

El soporte vital básico implica evaluar la seguridad del lugar, reconocer a la víctima inconsciente, pedir ayuda, evaluar la respiración (en las guías europeas este paso va antes de pedir ayuda), checar pulso (las guías europeas omiten este paso), iniciar la RCP en una relación de 30 compresiones por 2 ventilaciones y utilizar un DAE.<sup>1,3</sup> Como regla mnemotécnica, las guías estadounidenses utilizan la secuencia **CAB** para poner énfasis que una vez que se inicie la RCP lo prioritario será dar **Compresiones**, seguidas por **Apertura** de la vía aérea y posteriormente otorgar **Buenas ventilaciones** (*Breathing*).<sup>5</sup> A ello sigue la utilización del DAE.

El soporte vital avanzado contempla continuar con la RCP, reconocer arritmias graves y ritmos de paro cardíaco (desfibrilables y no desfibrilables), otorgar terapia eléctrica, brindar manejo avanzado de la vía aérea (con dispositivos supraglóticos como la mascarilla laríngea, el tubo laríngeo o el combitubo, o bien, a través de cánula endotraqueal), administrar fármacos y, de conseguir el RCE, iniciar cuidados posparo cardíaco o posreanimación en una unidad de cuidados intensivos. De igual manera que en el soporte vital básico, hay reglas mnemotécnicas que nos ayudan a sistematizar las acciones que tenemos que implementar en el paciente en paro cardíaco. La AHA establece el **ABCD** que consiste en: uso de dispositivo avanzado para la vía **Aérea**; corroborar la **Buena ventilación** con la inserción del dispositivo elegido y dar las ventilaciones a la frecuencia apropiada; **Circulación**, que implica conocer los diferentes trastornos del ritmo cardíaco, obte-

### Cuadro 19.3.

#### Elementos del soporte vital cardiovascular

---

##### Básico (SVCB)

1. Reanimación cardiopulmonar
2. Manejo básico de la vía aérea\*
3. Uso del desfibrilador externo automático (DAE)

---

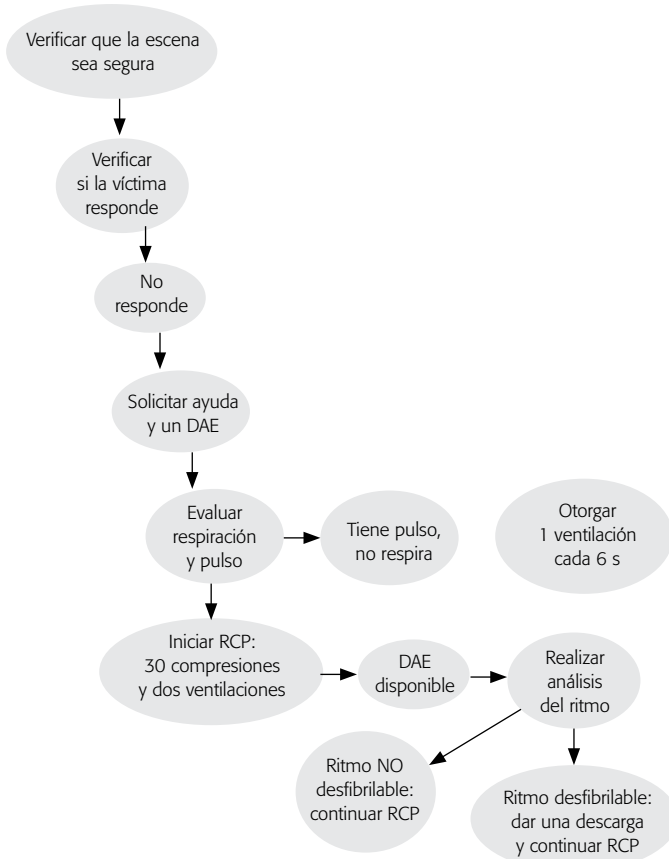
##### Avanzado (SVCA)

1. Reanimación cardiopulmonar
2. Manejo avanzado de la vía aérea
3. Reconocimiento de arritmias graves y ritmos de paro cardíaco
4. Terapia eléctrica\*\*
5. Acceso intravenoso o intraóseo y administración de fármacos
6. Cuidados posparo cardíaco

\* Consiste en dar 2 ventilaciones de rescate después de 30 compresiones; las ventilaciones pueden ser otorgadas boca a boca, boca-mascarilla o a través de bolsa-válvula-mascarilla.

\*\* La terapia eléctrica implica estar familiarizado con la desfibrilación, la cardioversión y la colocación de un marcapaso transcutáneo. (Ver explicación en el texto.)

SVCB, soporte vital cardiovascular básico; SVCA, soporte vital cardiovascular avanzado.



**Figura 19.1.**

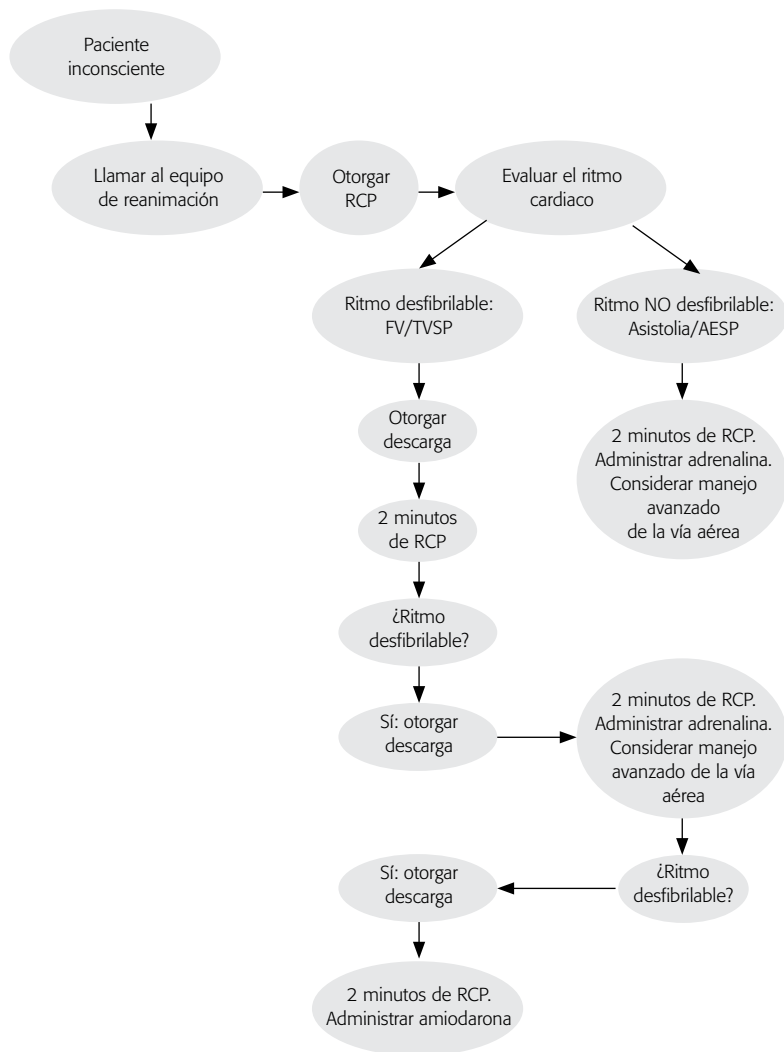
Algoritmo para el abordaje integrado del paro cardíaco en microgravedad.

(DAE, desfibrilador automático externo; OMT, oficial médico de la tripulación; RCP, reanimación cardiopulmonar; FV, fibrilación ventricular; TVSP, taquicardia ventricular sin pulso; AESP, actividad eléctrica sin pulso; DACC, dispositivo de asistencia de compresión cardiaca.)

ner un acceso intravenoso (IV) o intraóseo (IO), administrar medicamentos y manejar la terapia eléctrica; y, finalmente, **Diagnóstico diferencial**, que consiste en identificar la causa que llevó al paciente al paro cardíaco. El ERC maneja el **ABCDE**, que es muy similar al sistema previo con la diferencia de que D es **Discapacidad** (*disability*) y la E hace referencia a **Exposición** (*exposure*).<sup>4</sup> En relación con esta última mnemotecnía, **Discapacidad** se refiere a la evaluación neurológica y **Exposición** a examinar al paciente de la cabeza a los pies para descartar alguna lesión o trauma que pudiese estar pasando inadvertido. Probablemente el sistema ABCDE del ERC sea el más conveniente al momento de evaluar a una víctima de paro cardíaco en el curso de una misión espacial.

Finalmente, igual o tan importante que la RCP, es la desfibrilación; otorgada tanto por el DAE como por el monitor-desfibrilador (Figura 19.3). La desfibrilación temprana incrementa la



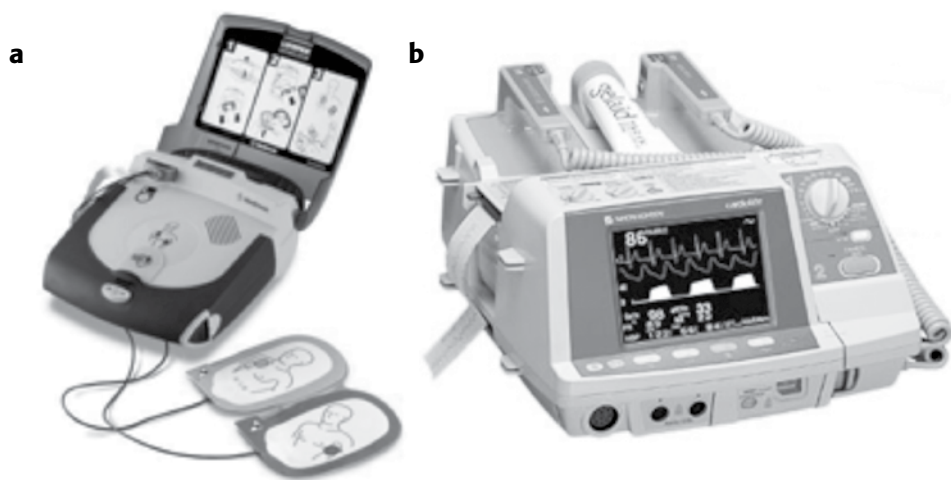


**Figura 19.2.**

Algoritmo de soporte vital cardiovascular avanzado.

(RCP, reanimación cardiopulmonar; FV, fibrilación ventricular; TVSP, taquicardia ventricular sin pulso; AESP, actividad eléctrica sin pulso.)

sobrevida de los pacientes que presentan paro cardiaco por fibrilación ventricular.<sup>5</sup> **El soporte vital básico ideal es el que conjunta la RCP y el uso de un DAE.** En el soporte vital avanzado es obligatorio contar con un monitor para analizar el ritmo cardiaco y si este es el de una fibrilación ventricular o una taquicardia ventricular sin pulso, se deberá aplicar lo antes posible la desfibrilación.



**Figura 19.3.**

Dispositivos para otorgar terapia eléctrica en caso de ritmos desfibrilables (fibrilación ventricular y taquicardia ventricular sin pulso). **a**, desfibrilador automático externo (DAE); **b**, monitor-desfibrilador.

En la figura 19.4, se observa cómo se efectúa la reanimación cardiopulmonar por un equipo de salud en el medio hospitalario.



**Figura 19.4.**

Realización de RCP en medio hospitalario. Nótese la aplicación de compresiones, ventilaciones y uso del desfibrilador automático externo.

## Perspectiva histórica de la reanimación cardiopulmonar en ambiente de microgravedad

La práctica de la RCP en el escenario de la medicina aeroespacial se viene estudiando desde hace poco más de 25 años. Los primeros registros datan del año 1990 y se derivan de ensayos realizados tanto en vuelos parabólicos como en misiones espaciales.

En 1990 Roger Billica, bajo el auspicio de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), llevó a cabo un estudio pionero en donde se evaluaron diversas técnicas para efectuar RCP sobre un maniquí durante vuelo parabólico en un avión KC-135 (Figura 19.5). En ese entonces, Estados Unidos planeaba tener su propia estación espacial (cuyo nombre se pensaba fuera “Freedom” [libertad]), y querían estar preparados para cualquier contingencia médica.

Las técnicas evaluadas fueron: 1. RCP tradicional y a horcajadas utilizando un sistema médico de fijación para la víctima (el denominado “Crew Medical Restraint System”, que sujeta al paciente a una superficie firme, en este caso el piso de la aeronave [Figura 19.6]); 2. RCP con un dispositivo de asistencia de compresión cardíaca (Cardiac Compression Assist Device [CCAD]) y sistema de fijación para la víctima; 3. RCP tradicional y a horcajadas sin sistema de fijación, y 4. RCP aplicada durante vuelo libre a través de la maniobra de Heimlich<sup>8</sup> (ver apartado *Técnicas de reanimación cardiopulmonar en ambiente de microgravedad* para más detalles).

El estudio llegó a conclusiones muy interesantes, destacando los siguientes puntos: a) es imperativo que la víctima sea colocada en un sistema de fijación y de que el reanimador se encuentre, a su vez, fijo a la nave o cabina (generalmente con alguna banda que cruza por su cintura), con el fin de que las compresiones y las ventilaciones sean otorgadas de manera efectiva. Cabe señalar que el contexto de una superficie sólida, aspecto secundario en ámbito terrestre, cobra particular relevancia cuando se trata de otorgar RCP en microgravedad, ya que el intentar comprimir el tórax sin un punto o puntos de apoyo, tendrá como resultado que el reanimador y la víctima salgan proyectados en direcciones opuestas lo que no sólo haría imposible otorgar la RCP sino que comprometería la



**Figura 19.5.**

Avión KC-135 de la NASA para vuelos parabólicos. El vuelo parabólico otorga, por algunos segundos, un ambiente de microgravedad, resultado de un fenómeno de caída libre.



**Figura 19.6.** Sistema de fijación para otorgar RCP en microgravedad (“Crew Medical Restraint System”).

integridad física de los astronautas y complicaría un escenario ya de por sí crítico; b) en microgravedad, el reanimador experimenta rápidamente fatiga puesto que se pierde la posibilidad de contar con el peso natural del segmento superior del cuerpo al momento de efectuar las compresiones, por lo que todos los músculos entran en juego para intentar compensar la falta de fuerza en los brazos. Por este motivo, se propone la utilización del dispositivo de asistencia de compresión cardíaca (CCAD), que aunque implica hacer ajustes para mantenerlo en una posición adecuada, brinda la posibilidad de incrementar la eficiencia mecánica de las compresiones y limitar, precisamente, la fatiga del reanimador, y c) la RCP en vuelo libre a través de la maniobra de Heimlich es factible durante limitados periodos; por lo que esta técnica pudiese utilizarse durante el contacto inicial con la víctima en tanto se prepara el sistema de fijación que permita continuar con la reanimación.

En vuelo espacial destaca la misión STS-40 del extinto orbitador Columbia de la NASA, realizada en junio de 1991 y que llevó a bordo al Spacelab, un complejo laboratorio espacial dedicado a la investigación científica. Fue la primera misión del programa del transbordador espacial dedicada enteramente a las ciencias de la vida y a la medicina. La mayoría de los tripulantes tenían formación académica en ciencias biológicas y de la salud (Figura 19.7) y dentro de todo el paquete de experimentos biológicos y médicos que se realizaron, se incluyó la práctica de la RCP sobre un maniquí utilizando la técnica tradicional (la misma que se aplica en gravedad terrestre).<sup>9,10</sup>

En el enlace (“*link*”), de la referencia bibliográfica No. 10, se puede ver un video de la práctica de la RCP en el transbordador espacial (que abarca del minuto 12:17 al minuto 12:31) y en donde se aprecian, claramente, dos de los aspectos tratados en el estudio de Roger Billica: la necesidad de fijar tanto a la víctima como al reanimador sobre una superficie firme y cómo la ausencia de gravedad impide que exista una adecuada profundidad en las compresiones torácicas.<sup>10</sup>

Ahora bien, la RCP es sólo uno de los componentes del soporte vital cardiovascular básico (SVCB) y del soporte vital cardiovascular avanzado (SVCA) [ver Cuadro 19.3], por lo que ahora



**Figura 19.7.**

Tripulación de la misión STS-40. *Atrás, izquierda a derecha:* Bryan D. O'Connor, Tamara E. Jernigan, Sidney M. Gutierrez. *Enfrente, izq. a der.:* F. Drew Gaffney (médico), Millie Hughes-Fulford (química), M. Rhea Seddon (médico), James P. Bagian (médico).

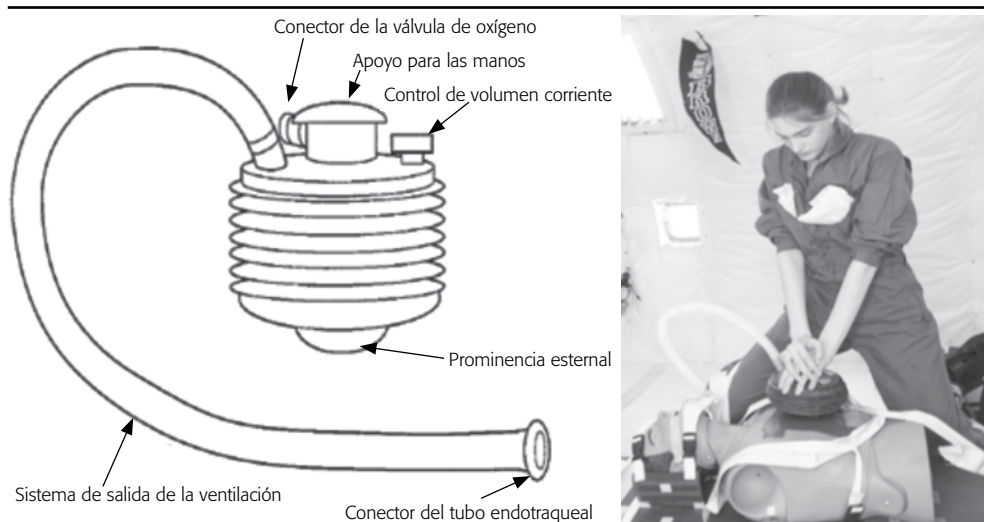
había que evaluar si era factible realizar el protocolo completo en ambiente de microgravedad. Este ensayo se llevó a cabo también a inicios de la década de 1990. Un grupo médico efectuó el protocolo de SVCA en vuelo parabólico a bordo de un avión KC-135. Se realizó RCP (en diferentes posiciones), manejo avanzado de la vía aérea, desfibrilación y administración de medicamentos.<sup>11</sup> El estudio concluyó que es posible otorgar el SVCA en microgravedad pero su implementación se entorpece por el entorno y que los factores limitantes más significativos son el entrenamiento de la tripulación, el número de tripulantes y el contar con recursos limitados. El ensayo enfatiza que la adecuada fijación, tanto del paciente como del reanimador, es crucial para poder otorgar procedimientos más avanzados (p. ej., el manejo de la vía aérea).

Una vez que se determinó que la RCP y el soporte vital cardiovascular eran factibles en ambiente de microgravedad, los investigadores se propusieron evaluar la técnica que pudiese ser la más efectiva para alcanzar una RCP de alta calidad. De tal manera que, en el año 2003, el doctor Gregory Jay y colaboradores conducen un interesante estudio que comparó cuatro métodos para otorgar RCP en ambiente simulado de microgravedad (realizado en vuelo parabólico a bordo de un KC-135). Las técnicas fueron el método lateral convencional, la maniobra a horcajadas alrededor de la cintura, el método vertical sobre las manos y la maniobra de Heimlich modificada (*ver más adelante Técnicas de RCP en ambiente de microgravedad*). El elemento adicional del estudio fue la utilización de un dispositivo mecánico adjunto en forma de fuelle que al colocarse sobre el tórax para dar compresiones permitía, también, se otorgase un volumen corriente que se dirigía directamente a la vía aérea del paciente cumpliendo así la función de un “ventilador” manual (Figura 19.8).

El diseño de este ingenioso dispositivo permite a un único reanimador otorgar compresiones y ventilaciones sin cambiar de posición. El rescatador realiza una secuencia de compresiones con el fuelle colapsado para posteriormente expandirlo con oxígeno y dar una compresión lenta y suave para otorgar una ventilación que se deriva a la manguera que se conecta al tubo endotraqueal o a la mascarilla facial (el volumen administrado es similar al otorgado por una bolsa-válvula o ambú). De esta manera, un solo reanimador puede efectuar la RCP en condiciones normales realizarían dos individuos, lo cual facilitaría las acciones en un ambiente adverso como la microgravedad (Figura 19.9).

El estudio destacó que la posición vertical sobre las manos fue la que logró mejor profundidad en las compresiones torácicas y que la RCP con la utilización del dispositivo mecánico es factible y promisoria para usarse en ambiente de microgravedad.

La siguiente etapa en la investigación de la RCP en este escenario fue el evaluar parámetros fisiológicos reales (ya que hasta ese momento todas las prácticas habían sido sobre maniqués). Llega entonces, en 2004, un interesante ensayo conducido por Johnston y colaboradores en donde se evaluó la calidad real de la RCP a través del monitoreo de la presión parcial de dióxido de carbono exhalado (PETCO<sub>2</sub>); esto, en modelos porcinos. Se realizó en vuelo parabólico a bordo de un KC-135.<sup>13,14</sup> Once cerdos fueron anestesiados y después inducidos químicamente

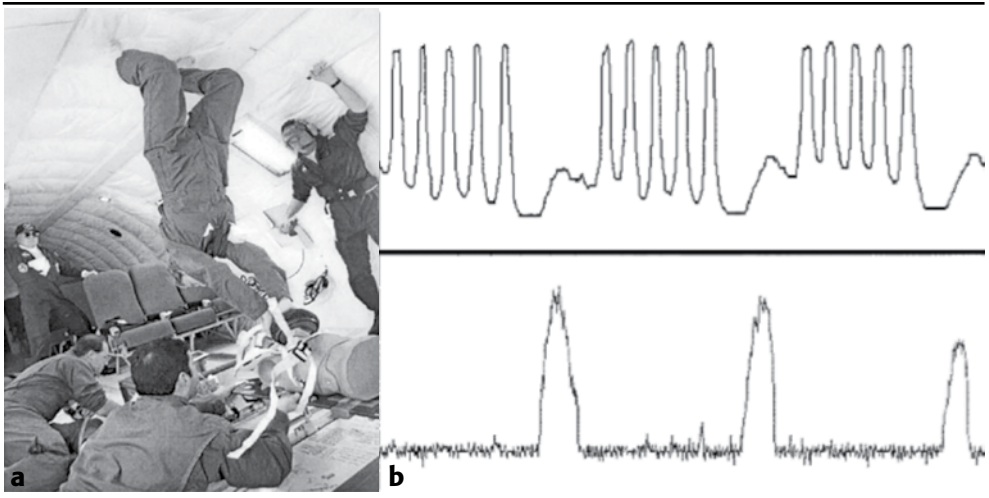


**Figura 19.8.**

Dispositivo mecánico de fuelle para RCP (Kendal CardioVent™).

Fuente: Jay GD, et al. CPR effectiveness in microgravity: Comparison of three positions and a mechanical device. *Aviat Space Environ Med.* 2003;74(11):1183-89.<sup>12</sup>





**Figura 19.9.**

**a**, RCP con la técnica vertical sobre las manos y uso del dispositivo CardioVent™.

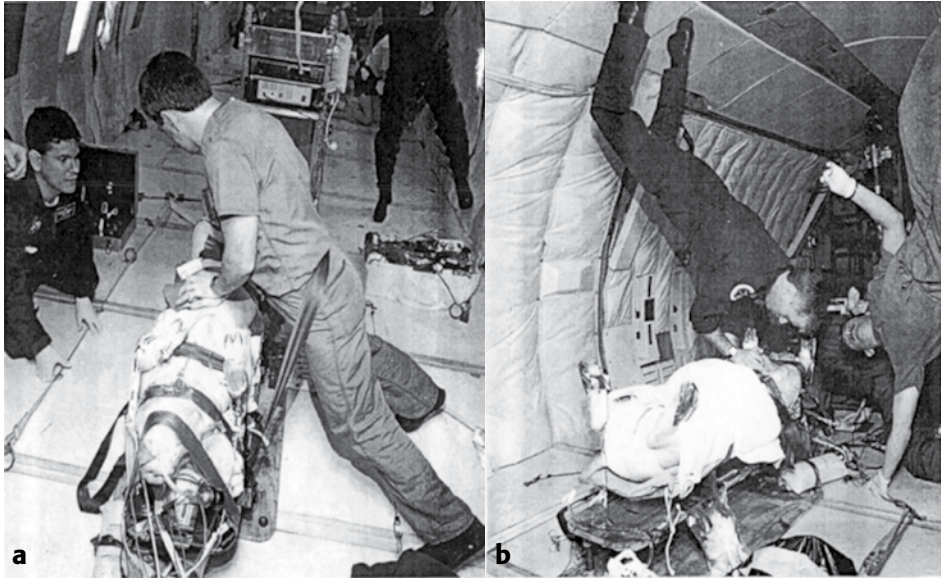
**b**, Relación de compresiones y ventilaciones otorgadas con este dispositivo (nótese la antigua relación de 5 compresiones por 1 ventilación y la ligera muesca sobre el tórax cuando se administra el volumen de aire).

*Fuente:* Jay GD, et al. CPR effectiveness in microgravity: Comparison of three positions and a mechanical device. *Aviat Space Environ Med.* 2003;74(11):1183-89.

a paro cardíaco. Las compresiones torácicas se otorgaron con la técnica lateral convencional y con la técnica vertical sobre las manos (Figura 19.10).

Estudios realizados con anterioridad en modelos animales en ambiente terrestre demostraban que el mantener una  $PETCO_2$  por arriba de 25 % de los valores basales previos al paro cardíaco se asociaba con un incremento en la sobrevida. Con base en estos hallazgos, los investigadores del estudio se propusieron determinar si en ambiente simulado de microgravedad se podía alcanzar este porcentaje. Las conclusiones del ensayo fueron que, efectivamente, era factible llegar a una  $PETCO_2$  por arriba de 25 % del valor previo al paro cardíaco y que la posición vertical sobre las manos era la más efectiva para dar compresiones además de que no ocasionaba tanta fatiga. Una conclusión adicional fue que se podía mantener una presión arterial media  $\geq 30$  mm Hg (que eventualmente se correlacionaría con una presión diastólica  $\geq 20$  mm Hg, señalada en las guías de la AHA y del ERC como uno de los elementos que conforman RCP de alta calidad).

En el año 2005 Simon N. Evetts, Lisa Evetts, Thais Russomano y colaboradores publican un estudio en donde exponen una nueva técnica para brindar RCP en gravedad cero. Método que nombraron, precisamente, de Evetts-Russomano (también y convenientemente llamado “Método ER” [haciendo referencia a “Emergency Room” o sala de urgencias]).<sup>15</sup> El estudio partía de la necesidad de apoyar a la víctima en paro cardíaco en tanto se desplegaba el sistema de fijación cuya preparación podría demorar algunos minutos. De esta manera, un solo reanimador realizaría la RCP sin que la víctima estuviera fija a la cabina y sólo habría que evaluar si la RCP otorgada a través de esta técnica conseguía compresiones y ventilaciones efectivas. El reanimador rodea con sus piernas el torso de la víctima y comienza a dar compresiones. El punto de apoyo son, precisamente,



**Figura 19.10.**

RCP en modelo porcino durante vuelo parabólico. **a**, RCP con el método lateral convencional con sistema de fijación tanto para el modelo animal como para el reanimador. **b**, RCP con la técnica vertical sobre las manos. Sólo el modelo porcino se encuentra fijo a la cabina.

*Fuente:* Johnston SL, *et al.* Efficacy of cardiopulmonary resuscitation in the microgravity environment. NASA Technical Reports Server (NTRS). <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150020975>”.

las extremidades inferiores del reanimador (Figura 19.11). Ver más adelante *Técnicas de RCP en ambiente de microgravedad* para más detalles).

El ensayo (como la mayoría de los otros estudios), fue llevado a cabo en vuelo parabólico pero ahora a bordo de un Airbus A300 Zero-G de la European Space Agency (ESA). A pesar de algunas dificultades para poder efectuar la técnica y de no alcanzar una adecuada frecuencia en las compresiones comparadas con las otorgadas en gravedad terrestre ( $68.3 \pm 17$  compresiones por minuto [cpm] vs.  $97.1 \pm 3.4$  cpm), los autores concluyen que es factible utilizar este método en ambiente de microgravedad.

En 2007 la NASA publicó un interesante documento sobre una serie de investigaciones médicas realizadas en vuelo parabólico a bordo de un avión C-9 (de junio de 2006 a junio de 2007) en donde se incluyeron ensayos sobre RCP, desfibrilación, manejo avanzado de la vía aérea, acceso intravenoso e intraóseo, administración de medicamentos y protocolos integrados de SVCA.<sup>16</sup> Los datos derivados de esta publicación son verdaderamente sobresalientes y enriquecieron, aún más, el conocimiento de la medicina de reanimación en ambiente de microgravedad (Figuras 19.12 y 19.13).

Una de estas investigaciones comparó diversas técnicas de RCP, entre las que se incorporó un innovador sistema de fijación del reanimador a través de cintas que cruzaban sus hombros y

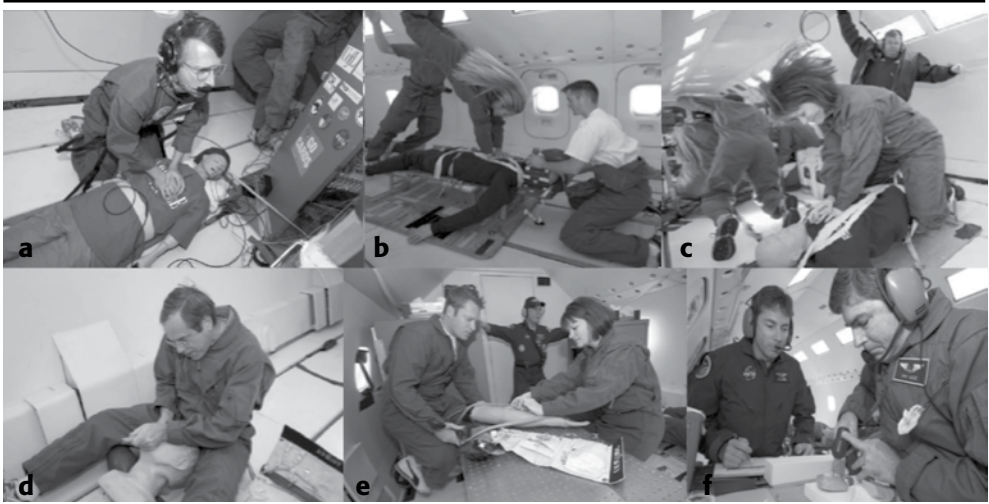




**Figura 19.11.**

Método de Evetts-Russomano (“ER Method”).

*Fuente:* Evetts SN, *et al.* Basic life support in microgravity: evaluation of a novel method during parabolic flight. *Aviat Space Environ Med.* 2005;76(5):506–10.



**Figura 19.12.**

Investigaciones llevadas a cabo en vuelo parabólico a bordo de una aeronave C-9 de la NASA. **a**, RCP con el método lateral convencional; **b**, RCP con el método vertical sobre las manos; **c**, RCP con la maniobra a horcajadas alrededor de la cintura; **d**, Práctica de intubación endotraqueal; **e**, Acceso intravenoso; **f**, Acceso intraóseo.

*Fuente:* NASA Space and Life Sciences Directorate, Human Adaptation and Countermeasures Office. C-9 and Other Microgravity Simulations: Summary Report. NASA/TM-2007-214765.



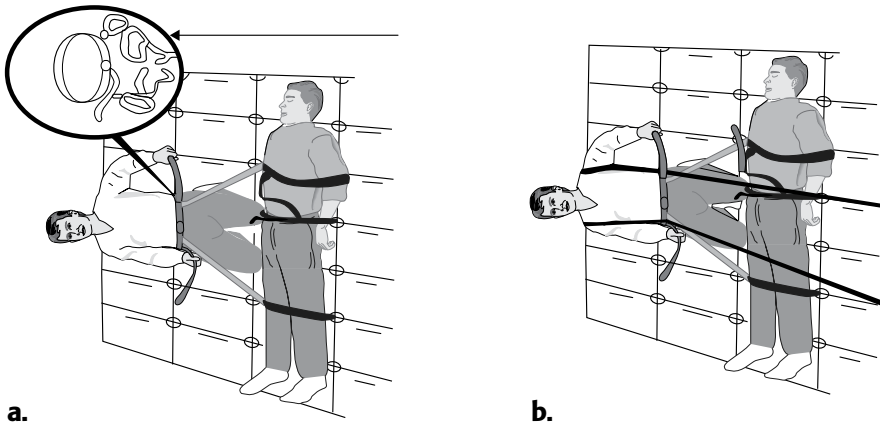
**Figura 19.13.**

Protocolo integrado de SVCA en microgravedad.

*Fuente:* NASA Space and Life Sciences Directorate, Human Adaptation and Countermeasures Office. C-9 and Other Microgravity Simulations: Summary Report. NASA/TM-2007-214765.

que generaban una ligera tracción para compensar la falta de gravedad; permitiendo, de esta manera, una mayor fuerza a la hora de comprimir el tórax (Figura 19.14).

Destaca que no hubo gran diferencia entre las técnicas estudiadas en términos de profundidad en las compresiones. A la luz de estos hallazgos y considerando que la RCP se debe comenzar

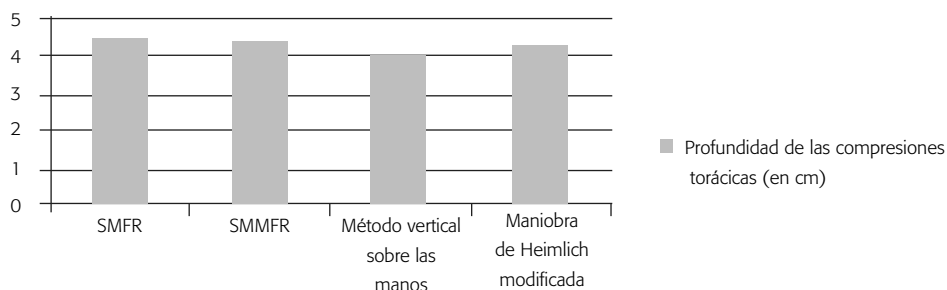


**Figura 19.14.**

Sistema médico de fijación para el reanimador. **a**, Fijación con banda a la cintura;

**b**, Fijación en los hombros con sistema de tracción.

*Fuente:* NASA Space and Life Sciences Directorate, Human Adaptation and Countermeasures Office. C-9 and Other Microgravity Simulations: Summary Report. NASA/TM-2007-214765.



**Figura 19.15.** Profundidad de las compresiones torácicas con diferentes técnicas de reanimación cardiopulmonar (RCP) en gravedad cero.

(SMFR, sistema médico de fijación del reanimador; SMMFR, sistema médico modificado de fijación del reanimador –con el uso de bandas hacia los hombros; ver Figura 19.14 b–).

inmediatamente, los autores concluyen que la maniobra de Heimlich modificada es la mejor opción para iniciar la RCP en gravedad cero (Figura 19.15).

En el año 2010 inaugura la etapa de investigación en laboratorios terrestres utilizando los dispositivos de suspensión corporal que permiten simular la microgravedad y también la denominada hipogravedad (p. ej., la Luna tiene una gravedad de 0.16 G y el planeta Marte poco más de una tercera parte de la gravedad terrestre o 0.38 G). La microgravedad y la hipogravedad se logran simular suspendiendo al reanimador a través de cables y colocándole una serie de contrapesos que se calculan de acuerdo con fórmulas específicas (Figura 19.16).

Thais Russomano publica, en los años 2011 y 2013, un par de estudios que evalúan la efectividad de la técnica de Evetts-Russomano en este tipo de dispositivos.<sup>17,18</sup> Los resultados demuestran que este método otorga una adecuada frecuencia y profundidad en las compresiones al menos durante los primeros minutos del evento de paro (3 minutos en el primer estudio<sup>17</sup> y 1.5 minutos en el segundo ensayo<sup>18</sup>), mientras se logra desplegar el sistema de fijación y colocar a la víctima en él. Sin embargo, ambos estudios coinciden en señalar que el costo energético de realizar esta maniobra es alto y que, eventualmente, se deberá de recibir un entrenamiento específico dada la fuerza que se requiere imprimir en los brazos para lograr una adecuada RCP.

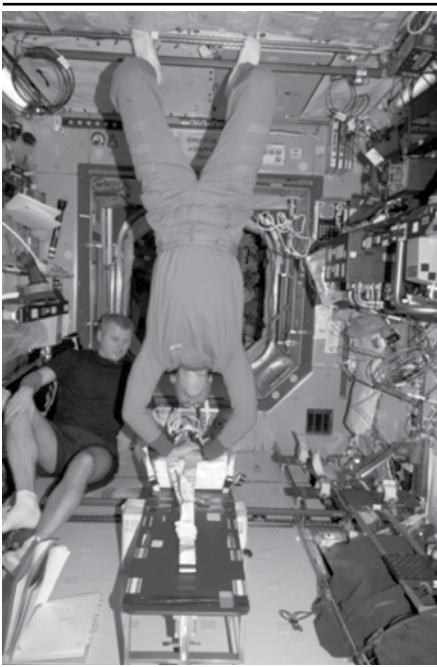
Muchos otros estudios han utilizado los sistemas de suspensión corporal, principalmente para comparar las diversas técnicas de RCP en ambiente simulado de microgravedad. Finalmente, la incorporación de dispositivos de temporización (escalas visuales y/o auditivas [metrónomos]), han demostrado ser útiles para auxiliar al reanimador a llevar una adecuada frecuencia en las compresiones y ventilaciones y optimizar así la RCP.<sup>19</sup>

Hoy día, todo este cúmulo de conocimientos es incorporado a los protocolos de manejo de la Estación Espacial Internacional (EEI), en caso de presentarse una contingencia médica que requiera de implementar el SVCB y el SVCA. El denominado “Sistema de Mantenimiento de la Salud” (Health Maintenance System), cuenta con todo lo necesario para atender a una víctima de paro cardíaco en ambiente de microgravedad. Hasta la publicación de su último reporte de moni-



**Figura 19.16.**  
Dispositivos de suspensión corporal en laboratorios terrestres.

toreo médico, la EEI destaca la posición vertical sobre las manos, la utilización del CardioVent™ y el uso de dispositivos de temporización (metrónomos), como elementos clave para efectuar un adecuado soporte vital cardiovascular, tanto básico como avanzado<sup>20</sup> (Figura 19.17).



**Figura 19.17.**  
Astronautas de la Estación Espacial Internacional practicando RCP sobre un dispositivo que simula el torso humano adoptando el método vertical sobre las manos.

## Factores implicados en la atención del paro cardiaco en gravedad cero

Si algo caracteriza a los vuelos espaciales tripulados es la estricta selección de los astronautas y cosmonautas, que cuentan no sólo con la más sólida preparación académica sino que gozan, además, de un perfecto estado de salud; el cual es indispensable para soportar los cambios extremos que impone el vuelo espacial. Con esta medida, se minimiza el riesgo de que se presente alguna condición médica de importancia. No obstante, habrá que considerar que muchas de las misiones espaciales realizadas hasta la fecha han sido de corta duración. En viajes más prolongados pudiera incrementarse la posibilidad de requerir un cuidado médico más especializado, tanto por los riesgos inherentes al vuelo espacial como a las importantes modificaciones que sufriría el cuerpo humano al tener mayor exposición a la microgravedad y a la radiación. Cabe señalar que el récord de permanencia en el espacio lo ostenta el cosmonauta ruso Valeri Poliakov (médico de profesión, por cierto), con 437 días a bordo de la extinta estación espacial MIR. Si bien es un logro nada despreciable es apenas la mitad del tiempo que tomaría realizar el viaje al planeta Marte (876 días o 2.4 años).

Con los datos disponibles al momento actual se ha calculado que existe un riesgo anual de aproximadamente 6% de presentarse un evento médico en el espacio, equivalente a acudir al servicio de urgencias o ser hospitalizado y de 1 a 2% de que suceda un evento crítico que requiera cuidados de soporte vital.<sup>21</sup> Tomando en consideración la historia de situaciones médicas significativas del programa espacial ruso, se ha estimado un equivalente de 0.06 evacuaciones de emergencia por año (equivalente a 1.8 evacuaciones por cada 10 años en la EEI para una tripulación de tres integrantes).<sup>21</sup> Con base en estas cifras se han elaborado cálculos de la posibilidad de que se presente una emergencia médica durante el viaje a Marte (utilizando la fórmula  $0.06 \text{ eventos por persona por año} \times 7 \text{ tripulantes} \times 2.4 \text{ años de duración del viaje}$ ), lo que arroja que por lo menos existirá un evento de esta naturaleza.<sup>22</sup> Dicho evento pudiese ser un episodio de paro cardiaco.

La atención del paro cardiaco en gravedad cero contempla variables que podríamos dividir de la siguiente manera: factores inherentes a la víctima, factores inherentes al reanimador y factores inherentes al ambiente.

**Factores inherentes a la víctima.** Hay diversos cambios orgánicos que hacen a un viajero espacial susceptible de presentar una condición médica de importancia que lo puede llevar a un grado de descompensación mayor. La redistribución de líquidos, el aumento de la permeabilidad vascular, la vasodilatación, el decremento del volumen plasmático, la disminución en la presión arterial, la afección de barorreceptores parasimpáticos, la pérdida del mecanismo de bomba muscular a nivel del sistema venoso de los miembros inferiores, cambios estructurales sobre el corazón, intolerancia ortostática y trastornos hidroelectrolíticos pudiesen predisponer a síncope, trombosis o arritmias y al riesgo de un paro cardiaco.<sup>23</sup> Esto sin contar con las contingencias derivadas de un fallo técnico que resulte en descompresión, intoxicación o trauma, lo que pone en riesgo no sólo a un individuo sino también a toda la tripulación.

**Factores inherentes al reanimador.** Como hemos visto, la RCP requiere no sólo de entrenamiento sino además de una buena condición física, ya que puede ser muy extenuante. Si bien la selección de astronautas y cosmonautas asegura un buen nivel de acondicionamiento, la microgravedad puede ir comprometiendo el estado basal del sistema óseo y muscular dados los importantes cambios que se dan a este nivel (desmineralización ósea, atrofia muscular, debilidad, incoordinación, mialgias).<sup>23</sup> De ahí la importancia de ejercitarse continuamente mientras dure la misión espacial, ya sea a través de la banda sin fin (caminadora), de ergómetros y/o de aparatos

que permitan fortalecer diversos grupos musculares. De cualquier manera, y a pesar del entrenamiento, el reanimador pudiese estar limitado en su capacidad para dar compresiones por alguno de estos procesos. Otro aspecto que puede influir es el género. En un estudio publicado en el año 2012 se comparó la efectividad de la RCP otorgada por mujeres y hombres en cuatro escenarios distintos (gravedad terrestre, hipogravedad lunar, hipogravedad marciana y microgravedad). El ensayo se llevó a cabo utilizando dispositivos de suspensión corporal y la técnica de implementada fue la Evetts-Russomano.<sup>24</sup>

La conclusión del estudio fue que tanto hombres como mujeres efectuaron una adecuada RCP en gravedad terrestre y en hipogravedad. Sin embargo, en ambiente de microgravedad, el género femenino no logró otorgar una adecuada profundidad en las compresiones. Cabe señalar que sólo se evaluó un método de RCP, por lo que habría que definir si esta situación es igual para otras técnicas. Finalmente, se ha estudiado, a través de electromiografía, la actividad de músculos específicos al momento de practicar la RCP (pectoral mayor, tríceps braquial, recto abdominal y erector de la columna); esto, en ambiente simulado de hipogravedad y microgravedad a través de dispositivos de suspensión corporal y utilizando tanto el método lateral convencional como con el método de Evetts-Russomano. La idea era identificar qué músculos participan más en la RCP y de esta manera trabajar en su fortalecimiento y adaptabilidad a las diferentes técnicas para otorgar las compresiones torácicas.<sup>25, 26</sup>

**Factores inherentes al ambiente.** Esta es, quizá, la mayor limitante para la atención del paro cardíaco en gravedad cero. De presentarse una contingencia de este tipo, el área destinada a efectuar la RCP se convertirá en una “sala de choque”, en la que se atendería una de las condiciones médicas más críticas. Aun cuando la EEI tiene un área muy aceptable para que los astronautas puedan trabajar y trasladarse, el espacio pudiese ser insuficiente si consideramos que la víctima tendría que ser colocada en el sistema de fijación y rodeada en su totalidad por la tripulación para asumir las funciones que requiere el evento (compresiones, ventilaciones, monitoreo y eventual desfibrilación, acceso intravenoso, administración de medicamentos y otras tareas que puedan surgir dependiendo de la circunstancia en particular). Si bien el Sistema de Mantenimiento de la Salud cuenta con todo lo necesario para la atención del paro, no habrá que perder de vista que los recursos son limitados y ello pudiese ser un elemento adverso al momento de requerir un equipo o dispositivo en particular o de reemplazar algún elemento dañado. Esto cobra especial relevancia considerando que la eventual etiología del paro cardíaco sería de naturaleza no isquémica (la probabilidad de un infarto de miocardio sería sumamente baja tomando en cuenta las estrictas evaluaciones médicas previas al vuelo).

Por lo tanto, condiciones como la hipovolemia, la hipoxia, la hiperpotasiemia o hipopotasemia, la acidosis, la hipotermia, la hipoglucemia, el neumotórax a tensión, el taponamiento, la trombosis pulmonar, los tóxicos o el trauma (las denominadas “H” y “T” del SVCA), serían las que dominarían el escenario y requerirían de un manejo muy específico (en algunos casos quirúrgico), que escaparía de las posibilidades de la estación espacial en términos de recursos como de personal cualificado. En este sentido, el no contar con un médico a bordo se constituye como una importante limitante en la atención del enfermo. Aunque toda tripulación siempre incluye a un astronauta entrenado para brindar atención médica de emergencia (el denominado “Oficial Médico de la Tripulación” [CMO; Crew Medical Officer]), el juicio médico será siempre determinante en condiciones críticas. Habitualmente, el CMO recibe cerca de 45 horas de entrenamiento para la atención de las eventualidades médicas que se pueden presentar a bordo; tiempo a todas luces insuficiente para otorgar un adecuado nivel de cuidado en una situación grave.<sup>21</sup> Aunque hay médicos dentro del cuerpo de astronautas y cosmonautas y de que hay evidencia, tanto en la literatura como en vuelos espaciales previos, de que la presencia de un profesional de la medicina en un vuelo espacial

puede optimizar recursos y evitar evacuaciones médicas innecesarias, el programa de la EEI no contempla incluir a un astronauta-médico en sus tripulaciones habituales.<sup>21</sup> Otra ventaja es que un médico a bordo podría tener mayor y mejor comunicación con sus colegas en la Tierra y así implementar los cuidados más convenientes para el enfermo.

Otro aspecto a considerar es, la limitación, de personal. Habitualmente la EEI cuenta con tres o cuatro tripulantes. Con la desaparición del programa del transbordador espacial ya no existen las visitas regulares que incluían 7 u 8 astronautas adicionales. Por lo tanto, la capacidad de respuesta pudiera verse afectada ya que habrá que considerar que uno de esos tripulantes se encontraría, precisamente, en paro cardíaco. La pérdida del efecto gravitacional y su repercusión sobre el sistema vascular y los mecanismos de adaptación neurohumoral puede hacer impredecible la acción de drogas vasoactivas como la adrenalina o noradrenalina.<sup>22</sup>

Si el astronauta logra salir del evento de paro y retorna a la circulación espontánea, es claro que no podrá quedarse en el espacio y deberá regresar inmediatamente a la Tierra. El problema reside en lo que representa la connotación “inmediatamente”. Tomando en cuenta el sistema actual de vuelos espaciales, el paciente deberá ser llevado a una cápsula Soyuz (que no tiene precisamente las mejores características para trasladar a un paciente crítico), esperar el tiempo requerido para fijar el destino a un sitio de aterrizaje primario (es decir, no cualquier lugar en la Tierra),<sup>21</sup> desacoplar la cápsula, soportar el reingreso a la Tierra (situación nada favorable para la víctima dadas las intensas fuerzas de aceleración que entran en juego) y aterrizar sobre superficie sólida con un impacto que pudiese agravar, aún más, la condición del enfermo. Evidentemente, el astronauta tendría que ser extraído de la cápsula y ser trasladado a la instalación que le brinde la atención médica definitiva. Se ha calculado que en las mejores condiciones este tiempo pudiese ser de por lo menos 33 horas;<sup>21</sup> lo que supera, por mucho, el tiempo más prolongado que se haya dado en una evacuación militar por cualquier contingencia médica. Esto podía ser llevado a cabo de una manera más sencilla cuando se tenía el sistema del transbordador espacial ya que reunía características más apropiadas para alojar y trasladar a un paciente grave al ámbito terrestre; sin embargo, hoy en día los transbordadores espaciales son, literalmente, piezas de museo.

Se ha fijado un tiempo máximo de 72 horas para brindar atención a un paciente crítico en la EEI, después de lo cual la falta de recursos y la fatiga de la tripulación pone en riesgo no sólo al paciente sino a la operación global de la misma Estación.<sup>21</sup>

Como vemos, el proceso es complejo, pero tendrá que ser resuelto si pretendemos hacer viajes más prolongados y establecer bases en otros satélites o planetas del sistema solar. La participación de astronautas y cosmonautas médicos será indispensable en misiones de tal magnitud.

## **Técnicas de reanimación cardiopulmonar en ambiente de microgravedad**

Con base en las investigaciones realizadas en vuelos parabólicos, misiones espaciales y laboratorios terrestres (tema abordado en el apartado *Perspectiva histórica de la RCP en ambiente de microgravedad*), hoy día contamos con seis técnicas o métodos para efectuar RCP en ambiente de microgravedad. Las características de cada una de ellas se plasman en el Cuadro 19.4.

En 2014, Benyoucef y colaboradores publicaron un estudio en donde se describe una nueva técnica: el método a horcajadas alrededor del tórax (cuadro 19.4, técnica No. 6).<sup>27</sup> Esta modalidad de reanimación se piensa más para la hipogravedad que para la microgravedad, es decir, más útil



en ambientes de baja gravedad, como es el caso de la Luna o Marte, que para el ambiente de ingravidez de la órbita terrestre o de una órbita planetaria. Los autores concluyen, con la ayuda de algunos cálculos matemáticos, que esta técnica se equipara, en efectividad, a la RCP convencional efectuada en gravedad normal.

En fechas recientes se ha intentado determinar cuál es la mejor técnica para otorgar RCP en condiciones de ingravidez. En 2014, Rehnberg y su grupo estudiaron tres métodos en un laboratorio terrestre para evaluar la RCP de alta calidad de acuerdo con los lineamientos del AHA y del ERC (Figura 19.18). Se encontró que el método de Evetts-Russomano y la maniobra de Heimlich modificada lograban una adecuada frecuencia en las compresiones mientras que con el método sobre las manos se otorgaba una adecuada profundidad. Sin embargo, ninguna de las tres técnicas cumplió totalmente con el estándar para considerar una RCP de alta calidad.<sup>28</sup>

En 2015 Braunecker, *et al.* hicieron una revisión de cuatro publicaciones especializadas sobre las técnicas de RCP en ambiente de microgravedad. Las técnicas que encontraron fueron:

## Cuadro 19.4.

### Técnicas de reanimación cardiopulmonar en ambiente de microgravedad

Técnica/Método	Descripción	Imagen
1. Método lateral convencional ( <i>standard side straddle [STD] method</i> ).	Método habitual para realizar RCP. El reanimador se coloca a un lado de la víctima y comienza a realizar las compresiones torácicas utilizando ambos brazos en posición recta. En condiciones de microgravedad, tanto la víctima como el reanimador deben estar fijos al sitio donde se otorga la RCP. <b>Ventajas:</b> el reanimador se encuentra más familiarizado con esta técnica y puede practicarla en ámbito terrestre antes de la misión. <b>Desventajas:</b> las compresiones no logran una adecuada profundidad	
2. Maniobra a horcajadas alrededor de la cintura ( <i>waist straddling maneuver [SM]</i> ).	El reanimador a horcajadas alrededor de la cintura de la víctima mientras esta última se encuentra bajo un sistema de fijación que permita otorgar la RCP. <b>Ventajas:</b> es sencilla de realizar; se puede practicar antes del vuelo espacial. <b>Desventajas:</b> las compresiones no logran una adecuada profundidad	

Continúa



## Cuadro 19.4.

Técnicas de reanimación cardiopulmonar en ambiente de microgravedad *continuación*

Técnica/Método	Descripción	Imagen
3. Método vertical sobre las manos (handstand [HS] method).	<p>El reanimador se coloca en posición perpendicular a la víctima mientras ésta se encuentra fija al sitio donde se otorgará la RCP. El reanimador apoya sus pies contra una de las paredes de la cabina y las manos sobre el tórax del paciente. Las compresiones torácicas se efectúan a través de la flexión y extensión de las rodillas del reanimador. <b>Ventajas:</b> es la técnica que logra la mejor profundidad de las compresiones torácicas; no es tan extenuante. <b>Desventajas:</b> difícil de practicar en gravedad normal; la frecuencia de las compresiones es por lo general inferior a lo recomendado</p>	

*Continúa*

## Cuadro 19.4.

Técnicas de reanimación cardiopulmonar en ambiente de microgravedad *continuación*

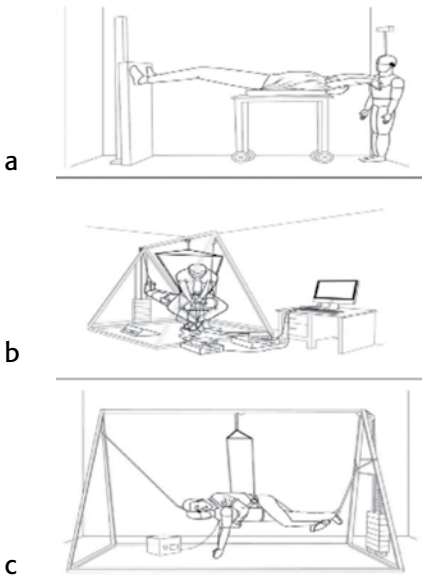
Técnica/Método	Descripción	Imagen
4. Método de Evetts-Russomano (ER method).	<p>El reanimador coloca su pierna izquierda sobre el hombro derecho de la víctima y su pierna derecha debajo del hombro izquierdo de la víctima a la vez que rodea el torso. Esta posición permite que el reanimador entrecruce sus tobillos y tenga mayor soporte para realizar la RCP. Es posible otorgar respiración de boca a boca</p> <p>Tanto el reanimador como la víctima flotan libremente dentro de la cabina de la nave. <b>Ventajas:</b> permite iniciar inmediatamente la RCP en tanto se instala el sistema de fijación; un solo reanimador es capaz de otorgar compresiones y ventilaciones. Logra buena profundidad. <b>Desventajas:</b> es muy agotadora y requiere de entrenamiento especial. Efectividad incierta en términos de frecuencia de las compresiones</p>	
5. Maniobra de Heimlich modificada	<p>También conocido como método de abrazo de oso inverso (<i>reverse bear hug [RBH] method</i>). El reanimador se coloca por detrás de la víctima y coloca sus brazos alrededor del torso para ubicar las manos en el centro del tórax y comenzar las compresiones a través de la flexión de sus brazos. Tanto el reanimador como la víctima flotan libremente dentro de la cabina de la nave. Es factible utilizar algún dispositivo que permita otorgar compresiones y ventilaciones como el CardioVent™. <b>Ventajas:</b> permite iniciar inmediatamente la RCP en tanto se instala el sistema de fijación; logra una adecuada frecuencia de las compresiones. <b>Desventajas:</b> papel incierto en cuanto a la profundidad de las compresiones (unos estudios la favorecen y otros la cuestionan)</p>	

## Cuadro 19.4.

Técnicas de reanimación cardiopulmonar en ambiente de microgravedad *continuación*

Técnica/Método	Descripción	Imagen
6. Método a horcajadas alrededor del tórax sin interferencia de los brazos de la víctima ( <i>seated arm-lock method</i> ).	Similar a la maniobra a horcajadas alrededor de la cintura. El reanimador se coloca a horcajadas alrededor del torso quedando sus rodillas en cada axila y los brazos de la víctima fuera del campo de fijación. Los pies del reanimador se apoyan en las caderas de la víctima para tener mayores puntos de apoyo. En esta técnica no existe sistema de fijación. <b>Ventajas:</b> sencilla de realizar; se equipara a la RCP convencional en gravedad normal. <b>Desventajas:</b> poco estudiada. Originalmente diseñada para ambiente de hipogravedad	

el método lateral convencional, la maniobra a horcajadas alrededor de la cintura, la maniobra de Heimlich modificada, el método de Evetts-Russomano y el método vertical sobre las manos. Poste-



**Figura 19.18.**

Tres técnicas de RCP utilizando el dispositivo de suspensión corporal. **a,** Método vertical sobre las manos. **b,** Método de Evetts-Russomano. **c,** Maniobra de Heimlich modificada.

*Fuente:* Rehnberg L, et al. Three methods of manual external chest compressions during microgravity simulation. *Aviat Space Environ Med.* 2014;85(7):687-93.

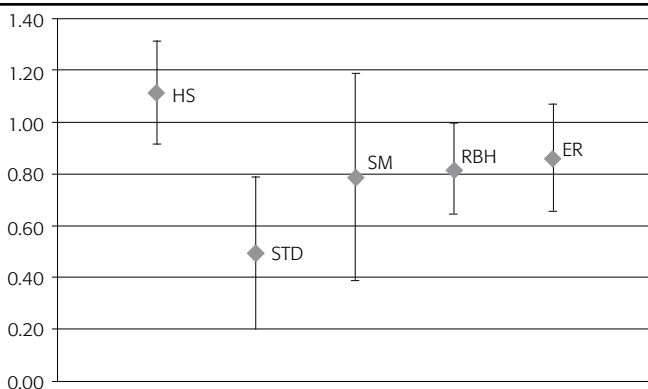
riormente, compararon estas cinco técnicas para conocer cuál o cuáles pudiesen ser más efectivas para incrementar el gasto cardiaco de la víctima. La determinación del GC fue realizada de manera indirecta a través de un valor que los autores definieron como el “Producto de Compresión”, que es igual a la “Frecuencia de Compresión” por la “Profundidad de Compresión” ( $CP = CR \times CD$  [siglas en inglés]), teniendo como valor normal 5000, de acuerdo con las guías 2010 del Consejo Europeo de Reanimación. Se encontró que el producto de compresión y, por lo tanto, el gasto cardiaco, se alcanzaron en mayor porcentaje con la técnica sobre las manos y en segundo lugar con la técnica de Evetts-Russomano, por lo que los autores concluyen que estos dos métodos pudiesen representar la mejor opción de RCP en microgravedad (19.17).<sup>29</sup>

## Manejo de la vía aérea

La explicación exhaustiva del manejo de la vía aérea en microgravedad escapa a los objetivos del presente capítulo, sólo diremos que la atención del paciente en paro cardiaco quedaría incompleta si no se tratasen las cuestiones relacionadas con esta importante intervención. Recordemos que la RCP es sólo uno de los elementos del SVCB y SVCA, por lo que atender a una víctima que sufre esta contingencia va más allá de sólo aplicar una o varias técnicas de RCP. El abordaje debe ser integral y en este sentido el manejo básico y avanzado de la vía aérea juega un papel esencial.

De igual manera que con las técnicas de RCP, la mayoría de la investigación en el tema de la vía aérea ha sido llevada a cabo en vuelos parabólicos (Figuras 19.12 y 19.20).

Otro ambiente simulado de microgravedad que no habíamos tratado hasta ahora y que se ha empleado para estudiar este rubro es el medio líquido de una piscina. En el año 2000 se publi-



**Figura 19.19.**

Promedio del producto de compresión. Es mayor con las técnicas HS y ER.

[Ver Cuadro 19.4.]

(HS, Método vertical sobre las manos; STD, Método lateral convencional; SM, Maniobra a horcajadas alrededor de la cintura; RBH, abrazo de oso inverso; ER, Método de Evetts-Russomano.)

Fuente: Braunecker S, et al. Comparison of different techniques for in microgravity - a simple mathematic estimation of cardiopulmonary resuscitation quality for space environment. *Am J Emerg Med.* 2015;33:920–4.



**Figura 19.20.**

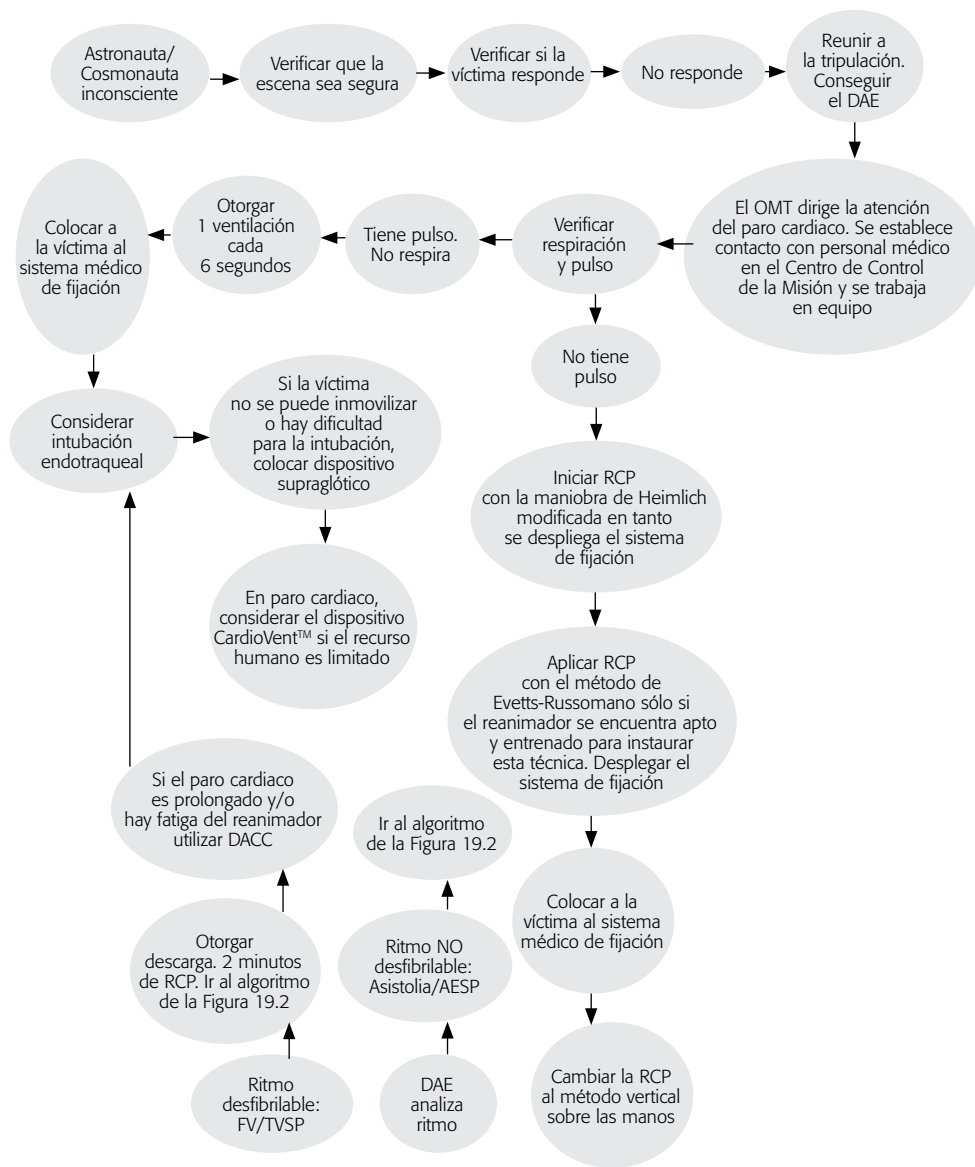
Prácticas de manejo avanzado de la vía aérea en vuelos parabólicos.

*Fuente:* **a**, Groemer GE, *et al.* The feasibility of laryngoscope-Guided tracheal intubation in microgravity during parabolic flight: A comparison of two techniques. *Anesth Analg.* 2005;101:1533-35.<sup>31</sup> **b**, Rabitsch W, *et al.* Airway management with endotracheal tube versus Combitube® during parabolic flights. *Anesthesiology.* 2006;105:696-702.<sup>32</sup>

ca un estudio pionero que compara diferentes técnicas para el manejo avanzado de la vía aérea (tubo endotraqueal, cánula orofaríngea con globo, mascarilla laríngea y mascarilla laríngea para intubación; todo esto en maniquí), en tres diferentes escenarios: al lado de la piscina (es decir, en condiciones normales), flotando libremente en la piscina y en el fondo de la piscina utilizando un sistema de fijación.<sup>30</sup> Los cuatro anestesiólogos que participaron en el estudio (que además tenían entrenamiento en buceo), no tuvieron problema para aplicar todos estos dispositivos al lado de la piscina (40 intentos en total [10 por cada uno], todos exitosos). Al realizar estas maniobras con el maniquí flotando libremente hubo un alta frecuencia de fallas, básicamente con la intubación endotraqueal (33 fallas, sólo siete intubaciones exitosas y no al primer intento). Finalmente, con el sistema de fijación hubo un sustancial incremento en la posibilidad de intubar al maniquí (sólo una falla, sin embargo casi la mitad se logró intubar al segundo o tercer intentos), mientras que la aplicación con los otros dispositivos (cánula orofaríngea, mascarilla laríngea y mascarilla laríngea para intubación; conocidos también como dispositivos supraglóticos), fue casi similar a los resultados obtenidos al lado de la piscina. El mensaje del estudio, muy vigente al momento actual, es que si se va a realizar intubación endotraqueal en microgravedad el paciente deberá estar bajo un sistema de fijación y si, por alguna razón, no se puede fijar o la intubación es difícil habrá que utilizar los dispositivos supraglóticos descritos.

## Algoritmo integrado para el abordaje del paro cardiaco en microgravedad

Haremos un resumen de lo expuesto hasta el momento utilizando un algoritmo de manejo; muy al estilo de la medicina de reanimación y de los flujogramas que se emplean en el SVCB y el SVCA. El siguiente esquema es una propuesta del autor para el abordaje del paro cardiaco en microgravedad con base en los interesantes estudios realizados hasta el día de hoy (Figura 19.21).



**Figura 19.21.**

Algoritmo para el abordaje integrado del paro cardíaco en microgravedad.

(DAE, desfibrilador automático externo; OMT, oficial médico de la tripulación; RCP, reanimación cardiopulmonar; FV, fibrilación ventricular; TVSP, taquicardia ventricular sin pulso; AESP, actividad eléctrica sin pulso; DACC, dispositivo de asistencia de compresión cardíaca.)

## Conclusiones

La RCP y el soporte vital cardiovascular en ambiente de microgravedad han sido estudiados durante poco más de 25 años y han otorgado diversas y muy útiles herramientas para atender un eventual paro cardíaco durante una misión espacial. Con el fin de alcanzar una RCP de alta calidad, se han desarrollado diferentes técnicas, evaluadas tanto en misiones del transbordador espacial y la EEI como en vuelos parabólicos y en laboratorios terrestres. La incursión de la humanidad en el espacio exterior es un empresa colosal en donde los astronautas y cosmonautas se constituyen como el elemento más importante y valioso, por lo que ninguna medida está de más para preservar su salud e integridad. Conforme la humanidad permanezca más tiempo en el espacio y/o realice vuelos más prolongados, las contingencias médicas podrán ser más frecuentes y no hay más que estar preparado. Jerry Bostick, controlador de vuelo de la misión del Apolo 13, dijo durante el curso de una entrevista: “Cuando las cosas malas suceden tenemos que evaluar todas las opciones, y fallar no es una de ellas”.

## Referencias

1. Kleinman ME, Brennan EE, Goldberger ZD, Swor RA, Terry M, et al. Part 5: Adult basic life support and cardiopulmonary resuscitation quality. 2015 American Heart Association Guidelines Update for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation*. 2015;132(suppl 2):S414-S435.
2. Link MS, Berkow LC, Kudenchuk PJ, Halperin HR, Hess EP, et al. Part 7: Adult advanced cardiovascular life support. 2015 American Heart Association Guidelines Update for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation*. 2015;132(suppl 2):S444-S464.
3. Perkins GD, Handley AJ, Koster RW, Castrén M, Smyth MA, et al. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2015 Section 2. Adult basic life support and automated external defibrillation. *Resuscitation*. 2015;95:81-99.
4. Soar J, Nolan JP, Böttiger BW, Perkins GD, Lott C, et al. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2015 Section 3. Adult advanced life support. *Resuscitation*. 2015;95:100-47.
5. Berg RA, Hemphill R, Abella BS, Aufderheide TP, Cave DM, et al. Part. 5: Adult basic life support: 2010 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation*. 2010;122(18, suppl 3):S685-S705.
6. Neumar RW, Otto CW, Link MS, Kronick SL, Shuster M, et al. Part. 8: Adult advanced cardiovascular life support: 2010 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation*. 2010;122(18, suppl 3):S729-S767.
7. Aspectos destacados de las guías de la American Heart Association de 2010 para reanimación cardiopulmonar (RCP) y atención cardiovascular de emergencia (ACE). Edición en español. American Heart Association, 2010:13-14.
8. Billica R, Gosbee J, Krupa D. Evaluation of cardiopulmonary resuscitation techniques in microgravity. NASA Technical Reports Server (NTRS). <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19910023475>.
9. Space Shuttle Mission Archives. [http://www.nasa.gov/mision\\_pages/shuttle/shuttlemissions/archives/sts-40.html](http://www.nasa.gov/mision_pages/shuttle/shuttlemissions/archives/sts-40.html)



10. National Space Society. Space Shuttle Flight 41 (STS 40) post flight presentation. <http://www.nss.org/resources/library/shuttlevideos/shuttle41.htm>
11. Smith M, Barratt M, Lloyd C. Advanced Cardiac Life Support (ACLS) utilizing Man-Tended Capability (MTC) hardware onboard Space Station Freedom. NASA Technical Reports Server (NTRS). <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19950010360>
12. Jay GD, Lee PHU, Goldsmith H, Battat J, Maurer J, Suner S. CPR effectiveness in microgravity: Comparison of three positions and a mechanical device. *Aviat Space Environ Med.* 2003;74(11):1183-89.
13. Johnston SL, Campbell MR, Billica RD, Gilmore SM. Efficacy of cardiopulmonary resuscitation in the microgravity Environment. NASA Technical Reports Server (NTRS). <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150020975>.
14. Johnston SL, Campbell MR, Billica RD, Gilmore SM. Cardiopulmonary resuscitation in microgravity: Efficacy in the swine during parabolic flight. *Aviat Space Environ Med.* 2004;75(6):546-50.
15. Evetts SN, Evetts LM, Russomano T, Castro JC, Ernsting J. Basic life support in microgravity: evaluation of a novel method during parabolic flight. *Aviat Space Environ Med.* 2005;76(5):506-10.
16. NASA Space and Life Sciences Directorate, Human Adaptation and Countermeasures Office. C-9 and Other Microgravity Simulations: Summary Report. NASA/TM-2007-214765.
17. Rehnberg L, Russomano T, Falcao F, Campos F, Evetts SN. Evaluation of a novel basic life support method in simulated microgravity. *Aviat Space Environ Med.* 2011;82(2):104-10.
18. Russomano T, Baers JH, Velho R, Cardoso RB, Ashcroft A, et al. A comparison between the 2010 and 2005 basic life support guidelines during simulated hypogravity and microgravity. *Extreme Physiology & Medicine.* 2013;2:11.
19. Hurst VW, Whitam SW, Austin PN, Branson RD, Beck G. Cardiopulmonary resuscitation during spaceflight: Examining the role of timing devices. *Aviat Space Environ Med.* 2011;82(2):104-10.
20. International Space Station Medical Monitoring. [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/1025.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/1025.html)
21. Bacal K, Beck G, McSwain NE. A concept of operations for contingency medical care on the International Space Station. *Military Medicine.* 2004;169(8):631-41.
22. Summers RL, Johnston SL, Marshburn TH, Williams DR. Emergencies in space. *Ann Emerg Med.* 2005;46:177-84.
23. Aubert AE, Beckers F, Verheyden B. Cardiovascular function and basics of physiology in microgravity. *Acta Cardiol.* 2005;60(2):129-51.
24. Kordi M, Kluge N, Kloeckner M, Russomano T. Gender influence on the performance of chest compressions in simulated hypogravity and microgravity. *Aviat Space Environ Med.* 2012;83:643-8.
25. Krygiel RG, Wayne AB, Baptista RR, Heidner GS, Rehnberg L, et al. The evaluation of upper body muscle activity during the performance of external chest compressions in simulated hypogravity. *Life Sciences in Space Research.* 2014;1:60-6.
26. Baptista RR, Susin T, Dias M, Correa N, Cardoso R, et al. Muscle activity during the performance of CPR in simulated microgravity and hypogravity. *American Journal of Medical and Biological Research.* 2015;3(4):82-7.
27. Benyoucef Y, Keady T, Marwaha N. The seated arm-lock method: a new concept of basic life support in simulated hypogravity of the Moon and Mars. *Journal of Space Safety Engineering.* 2014;1(1):28-31.
28. Rehnberg L, Ashcroft A, Baers JH, Campos F, Cardoso RB, et al. Three methods of manual external chest compressions during microgravity simulation. *Aviat Space Environ Med.* 2014;85(7):687-93.
29. Braunecker S, Douglas B, Hinkelbein J. Comparison of different techniques for in microgravity - a simple mathematic estimation of cardiopulmonary resuscitation quality for space environment. *Am J Emerg Med.* 2015;33:920-4.
30. Keller C, Brimacombe J, Giampalmo M, Kleinsasser A, Loeckinger A, et al. Airway management during spaceflight. A comparison of four airway devices in simulated microgravity. *Anesthesiology.* 2000;92:1237-41.
31. Groemer GE, Brimacombe J, Haas T, De Negueruelas C, Soucek A, et al. The feasibility of laryngoscope-guided tracheal intubation in microgravity during parabolic flight: A comparison of two techniques. *Anesth Analg.* 2005;101:1533-35.
32. Rabitsch W, Moser D, Inzunza MR, Niedermayr M, Kostler WJ, et al. Airway management with endotracheal tube versus Combitube® during parabolic flights. *Anesthesiology.* 2006;105:696-702.





# 20. Impacto de la microgravedad y la radiación espacial en el comportamiento celular y carcinogénesis

Francisco Javier Ochoa Carrillo, Raúl Carrillo Esper, Ángel Augusto Pérez Calatayud, Dulce María Carrillo Córdova, Carlos Alberto Carrillo Córdova

El universo conocido tuvo su origen posterior a la explosión de una singularidad (Teoría del Big-Bang), hace aproximadamente 13 800 millones de años. Resultante de ésta, y una vez que se enfrió lo suficiente, es la materia, cuyos bloques básicos son los leptones y los quarks, que dieron origen a partículas subatómicas y a los átomos, los que por efecto de la gravedad dieron origen a los cuerpos y estructuras que conocemos. Las otras energías universales son la fuerte, la débil y la electromagnética. Es importante mencionar que el universo visible sólo ocupa aproximadamente 5 % del total, el resto, 95 %, es conformado por la materia y energía oscuras, llamadas así porque se desconoce su estructura fundamental.

A pesar de su belleza y perfección, el Universo es inhóspito, por lo menos para la vida como la concebimos los humanos. Explosiones nucleares, frío extremo, distancias inimaginables y la presencia de radiación de diferentes tipos. La radiación solar, los rayos cósmicos y los rayos cósmicos de alta energía son los que más impactan a los astronautas y a las naves espaciales, tanto durante viajes cortos y en especial en los largos.

Los rayos cósmicos son partículas de alta energía que se originan en el espacio exterior en explosiones de supernovas, colisiones galácticas o de núcleos galácticos activos, viajan a casi la velocidad de la luz y colisionan con la Tierra en todas direcciones. Los rayos cósmicos están constituidos principalmente por partículas atómicas, en especial los núcleos de los átomos (protones), hidrógeno (85 %) y helio (10 %), aunque también pueden incluir electrones, positrones, partículas subatómicas y estructuras más pesadas. Fueron descubiertos en 1912 por el físico austriaco Victor Hess, lo que le valió el Premio Nobel. Su energía se mide como MeV (megaelectronvolts) o GeV (gigaelectronvolts). La mayoría de los rayos cósmicos tienen energía de 100 MeV. Al chocar con átomos de la atmósfera superior dan origen a piones, que al decaer su energía se transforman en muones.

La Tierra es protegida de los rayos cósmicos y de la radiación solar por la magnetósfera y la atmósfera. La magnetósfera se extiende hasta 20 000 km. Al chocar el viento solar con ésta da origen a los cinturones de Van Allen. Sin la magnetósfera estaríamos expuestos continuamente a radiación muy nociva proveniente del Sol y del espacio exterior.

La fuerza de gravedad es la más conocida de todas las fuerzas, condiciona atracción entre la materia, la fuerza de atracción de los cuerpos está en relación con su masa. Issac Newton

propuso la Ley de la Gravitación Universal, cualquier objeto que tenga masa condicionará atracción sobre otro objeto con masa. Para Einstein y la Teoría de la Relatividad General, la gravedad es la distorsión del espacio-tiempo. A nivel de la superficie terrestre la gravedad es la fuerza que nos mantiene anclados a la superficie e impide que salgamos disparados al espacio. La caída de un cuerpo a la superficie terrestre se produce con una aceleración independiente de la masa del cuerpo, su valor es de  $9.81 \text{ m/s}^2$ . A la ausencia aparente de gravedad se le denomina microgravedad o gravedad cero. En un ambiente de microgravedad el peso aparente de un objeto o sistema disminuye en relación con la superficie terrestre. De esta manera en un vuelo orbital bajo las naves pueden viajar en un ambiente libre de caída a velocidades de 27 000 km por hora, con fuerzas gravitacionales que van de  $10^{-4} \text{ g}$  a  $10^{-6} \text{ g}$ . Por lo anterior, la Estación Espacial Internacional (EEI) completa una órbita terrestre en 90 minutos.

## Radiación espacial y cáncer

Aún se debe determinar si las altas dosis de radiación en las expediciones espaciales prolongadas podrían incrementar el riesgo de cáncer en los astronautas.<sup>1</sup> El alto riesgo de los astronautas de desarrollar cáncer durante o posterior a una misión está directamente relacionado con la dosis de radiación recibida.<sup>2</sup> Shavers<sup>3</sup> determinó que las dosis recibidas por los astronautas durante las misiones extendidas en la Estación Espacial Internacional fueron mayores de 70 mSv. A pesar de que se ha establecido que la exposición a dosis altas de radiación pueden ser carcinogénicas,<sup>2</sup> los datos presentes vienen de estudios epidemiológicos en los sobrevivientes a la bomba atómica en Japón, al igual que de la investigación realizada en modelos animales y celulares. Estos estudios utilizan dosis altas y exposición prolongada a radiación gamma.<sup>4</sup> No existen estudios que demuestren de manera concluyente que la exposición a dosis únicas o prolongadas de radiación espacial resulten en un incremento en el riesgo de muerte por cáncer en comparación al resto de la población. Evento que puede estar relacionado con los siguientes factores:<sup>5-9</sup> a) la dosis baja de radiación recibida en el vuelo espacial en la órbita terrestre baja (OTB); b) los amplios intervalos de tiempo entre vuelos espaciales y la edad actual de los astronautas vivos, y c) la pequeña muestra de expuestos a la radiación en vuelos espaciales. Para entender los riesgos a largo plazo es crítico definir la radiobiología de la radiación espacial a fin de encontrar el riesgo por edad del desarrollo de cáncer invasivo y enfermedades neurodegenerativas.

Los estudios en animales de inducción de tumor por partículas cósmicas han mostrado valores altos de efectividad biológica relativa (EBR) y respuesta a dosis cualitativa, distintas al comparar con rayos gamma, un número mayor de tumores metastásicos y un aumento en el grado tumoral.<sup>10-16</sup>

La forma de respuesta a la dosis de inducción tumoral por partículas cósmicas es similar a estudios previamente publicados de neutrones de fisión que sugieren el desarrollo de tumores letales en comparación con la exposición de rayos gamma.<sup>17,18</sup>

El desarrollo del concepto de modelo multiestadio del cáncer sugiere que las partículas HZE afectan tanto la iniciación como la promoción del tumor con una frecuencia mayor en comparación con los rayos gamma y que los efectos no objetivos tienen un papel importante a las dosis incurridas durante las misiones espaciales<sup>19-21</sup> (Cuadro 20.1).

## Cuadro 20.1.

Límites de dosis en unidades Sieverts calculados por años en misiones en la EEI. En paréntesis se expone el promedio de pérdida de años vida por carcinogénesis<sup>22</sup>

Edad en años	Dosis límite Astronautas masculinos Pérdida en años	Dosis límite Astronautas femeninos Pérdida en años
25	520 mSv (15.7)	370 mSv (15.9)
30	620 mSv (15.4)	470 mSv (15.7)
35	720 mSv (15.0)	550 mSv (15.3)
40	800 mSv (14.2)	620 mSv (14.7)
45	950 mSv (13.5)	750 mSv (14.0)
50	1 150 mSv (12.5)	920 mSv (13.2)
55	1 470 mSv (11.5)	1 120 mSv (12.2)

EEI, Estación Espacial Internacional.

## Lesión al DNA

El daño al ácido desoxirribonucleico (DNA) y la consecuente mutación son aceptados como el evento inicial del proceso de carcinogénesis, a pesar de evidencia reciente de los efectos no objetivo independientes de las lesiones en DNA. Dentro de las lesiones inducidas por la radiación, la ruptura de la doble cadena de DNA (rDC) se considera precursora clave de los efectos tempranos y tardíos. Existe evidencia cualitativa ante la radiación de energía de transferencia lineal (ETL) alta y baja, en la inducción y reparación del daño al DNA.<sup>23-26</sup>

El número de rupturas de cadenas simples de DNA (rCS) y rDC producidas por la radiación varía poco con el tipo de radiación, pero en la radiación de alta ETL la fracción de daños al DNA es compleja, debido a los contenidos de racimos de mezclas de dos o más tipos de daño (rCS, rDC, etc.) dentro de una región localizada del DNA. El daño complejo es poco común en el daño endógeno o por radiación de baja ETL y se ha asociado con un incremento relativo en la EBL de la radiación ionizante densa.<sup>27,28</sup>

La reparación de la rDC se da a través de vías de recombinación homóloga (RH) y no homóloga (RnH).<sup>29-32</sup> Los experimentos en los focos por inmunohistoquímica para anticuerpos para proteínas de reparación RH y RnH han encontrado diferencias entre los cambios ocasionados por los rayos X y los rayos cósmicos, entre los que se encuentran un incremento en el tamaño dinámico del foco con aparición hasta 2 horas antes, una remoción persistente y lenta de los focos a nivel de núcleos y la aparición de rayas de focos que indica la ruta de acceso de una pista de partículas. Las proteínas<sup>33-35</sup> de respuesta al daño del DNA, como la proteína ataxia-telangiectasia mutada (ATM), ataxia-telangiectasia relacionados con Rad3 (ATR), artemis (también conocida como DCLRE1C) y NBS1 (también conocida como NBN), tienen un papel importante en la reparación del complejo de rDC.<sup>36</sup>

A la fecha no hay evidencia experimental de que existan diferentes vías de reparación involucradas, posterior a la exposición a radiación ionizante. Sin embargo, evidencia actual sugiere la presencia de diferencias significativas en la expresión génica de manera temprana posterior a la irradiación.<sup>36</sup> Se necesitan más estudios sobre los efectos de los rayos cósmicos a este nivel y su involucro con el desarrollo de cáncer.

## Aberraciones cromosómicas

Las rDC del DNA no reparado eventualmente se observará como una aberración cromosómica. Las partículas de carga alta producen intercambios cromosómicos con valores de EBR que excede los 30 en interfase (como se observa utilizando condensación cromosómica prematura) y en 10 en la primera mitosis posradiación. Sin embargo estudios *in vivo* han demostrado estos cambios con niveles menores. Estudios citogenéticos revelan que las alteraciones cromosómicas ocasionadas por rayos cósmicos son más complejas ya que involucra un mayor número de cromosomas y puntos de quiebre e incluye intercambios inter- e intracromosómicos. No obstante, la mayoría de estas alteraciones ocasiona muerte celular y estudios en modelos murinos han demostrado sólo unas pocas de estas aberraciones en la medula ósea de ratones una semana posterior a la exposición.<sup>36</sup>

Las aberraciones cromosómicas en linfocitos humanos se consideran un marcador de riesgo de cáncer, en los astronautas con un total de 2 años acumulados en el espacio se ha observado que estas aberraciones son similares a las medidas antes del vuelo. El significado de estos hallazgos aún debe ser dilucidado.<sup>36</sup>

## Factores a considerar para evaluar el riesgo de cáncer relacionado con radiación espacial

La radiación ionizante es un carcinógeno conocido en la Tierra, los riesgos de cáncer por rayos X y rayos gamma ( $\gamma$ ) están establecidos a dosis mayores de 100 mSv, sin embargo existe debate en la comunidad científica del riesgo de cáncer a dosis más bajas ( $< 50$  mSv/h). Los factores de riesgo mayores relacionados en la predicción de riesgo en radiación espacial son los siguientes:<sup>36</sup> a) los efectos de la calidad de la radiación en el daño biológico debido a las diferencias cualitativas y cuantitativas entre la radiación espacial y los rayos gamma; b) la dependencia del riesgo en rango de dosis en el espacio y sus efectos en la biología de la reparación del DNA, regulación celular, tejido y la respuesta de los organismos; c) predicción de eventos de partículas solares, incluyendo el espectro energético temporal y la predicción de tamaños; d) extrapolar resultados de experimentos animales a humanos, y e) la sensibilidad individual a radiación que incluye los factores genéticos, epigenéticos, nutricionales.

Los factores de riesgo menores en la predicción son.<sup>36</sup>

- Datos de los ambientes de radiación cósmica galáctica
- La física de la protección a astronautas, basada en las propiedades de transmisión de la radiación en materiales y tejidos
- Efecto de la microgravedad en la respuesta biológica a la radiación
- Errores en recolección de datos en humanos

## Antecedentes familiares y personales

El riesgo individual de carcinogénesis por radiación puede ser calculado al incluir la historia familiar de cáncer y la historia clínica del individuo que incluya antecedente de pólipos, o biopsias de seno. Este acercamiento se realiza porque se cree que el riesgo de cáncer de seno y

colon por exposición a radiación cósmica puede predecirse, de manera parcial, por el antecedente de riesgo por modelo de transferencia incorporando el riesgo multiplicativo.<sup>37,38</sup>

## Detección de células preneoplásicas y microtumores inactivos

Los ensayos disponibles en la actualidad para la detección de células preneoplásicas o microtumores inactivos podrían, de manera potencial, progresar o promocionarse a desarrollar cáncer como consecuencia de la exposición a radiación cósmica. Los individuos con estas malignidades incipientes pueden tener un riesgo incrementado de cáncer por radiación cósmica en comparación a aquellos que no presentan dichas lesiones. Existen diferentes métodos de diagnóstico como son de imagen, detección de expresión de proteínas de sobreexpresión o aberrantes, o la detección de mutaciones somáticas del DNA de células obtenidas por métodos de mínima invasión. Aún se desconoce el potencial de progresión de células premalignas y microtumores inactivos a cáncer.<sup>38</sup>

## Ensayos fenotípicos y genotípicos

Los ensayos genotípicos utilizarán células colectadas del individuo para ser irradiadas *ex vivo* a fin de determinar la susceptibilidad a cáncer por radiación. El propósito de estas pruebas no es el cáncer *per se*, se están buscando subrogados para determinar la susceptibilidad a cáncer como son la persistencia de focos de reparación de DNA, aberraciones cromosómicas o mutaciones asociadas con tumores.<sup>39, 40</sup>

Los polimorfismos de sinopsis en el genoma humano han sido asociados con el riesgo de cáncer por radiación en sobrevivientes de la bomba atómica, técnicos radiólogos y personas con exposición a radiación ambiental. Si bien en un futuro la realización del genotipo de estos polimorfismos identificará a individuos con riesgo de cáncer por radiación, no existen datos o experiencia durante vuelos espaciales.<sup>41</sup>

## Monitoreo posterior al vuelo espacial

La detección temprana puede disminuir la mortalidad en algunos tipos de cáncer y está siendo incorporada en modelos de riesgo actuales de las agencias espaciales, con algunos ajustes de incidencia/mortalidad de algunos tipos de cáncer. Al hacer esto se asume que la detección temprana de cáncer por radiación llevará a la misma reducción en la mortalidad y que a los astronautas, tanto activos como en retiro, se les realiza un cribado de detección temprana.<sup>42,43</sup>

El riesgo estimado de cáncer en astronautas está limitado por el conocimiento teórico y los efectos cualitativos de la radiación en el proceso de carcinogénesis. Debido a que la obtención de datos epidemiológicos en humanos no se prevé en un futuro, el entendimiento de modelos de riesgo se debe realizar de manera mecánica con el entendimiento de los efectos complejos de la exposición a la radiación en una línea de tiempo y al nivel de organización. Definir la radiobiología de la radiación espacial es crítica para conocer los riesgos a largo plazo no sólo en cáncer, sino también en el resto de enfermedades producidas por este fenómeno.

## Microgravedad y biología de las células tumorales

Independiente de los conceptos, la vida en la superficie de la Tierra se desarrolló en millones de años, a gravedad 1 (G1), protegida por la magnetósfera y la atmósfera. A partir de los años 70 se inició la experimentación biológica sobre el comportamiento celular en microgravedad durante la misión Skylab, se evidenció que el comportamiento biológico se modificaba en microgravedad, lo que sentó las bases de la relación entre la fuerza física y la función biológica, pero además demostró la adaptación fisiológica del ser humano en ambientes microgravitatorios.

Estudios iniciales mostraron los siguientes cambios celulares dependientes de gravedad, pérdida de la convección, disminución de la fricción hidrodinámica y disminución o ausencia de sedimentación, lo que favorece entre otros fenómenos que las células puedan coalescer y formar agrupaciones multicelulares y organoides, que se mantienen por días o aun meses. Células humanas embrionarias de tejido pulmonar cultivadas por 28 días en microgravedad no mostraron cambios significativos en la tasa de crecimiento, bandeo cromosómico, índice mitótico o ciclo celular cuando se compararon con controles en la superficie terrestre, pero sí en el consumo de glucosa, lo que sugiere cambios metabólicos en microgravedad.

En microgravedad la masa eritrocitaria disminuye y los eritrocitos cambian de forma. Los linfocitos presentan microvellosidades y se ha descrito disminución en la blastogénesis. En otros modelos experimentales se ha demostrado que se presentan alteraciones en la señalización por citocinas. La microgravedad induce alteraciones celulares en su estructura y función. Las células cultivadas en el espacio presentan alteraciones de su citoesqueleto lo que las hace más redondeadas (esferoides), modifican su señalización y presentan alteraciones en su expresión genética, modificándose genes que regulan su morfología, replicación y supresión tumoral.<sup>44-49</sup>

Un ambiente de microgravedad ha sido fundamental para favorecer el crecimiento tridimensional de las células, incluyendo las neoplásicas, a diferencia de lo que sucede en gravedad terrestre en donde adoptan un crecimiento en monocapas. Por la falta de gravedad la formación de cúmulos celulares ha servido de modelo para entender mejor la biología de las células tumorales, incluida la formación del tumor, su desarrollo, microambiente y señalización.

Células de osteosarcoma y cáncer de tiroides crecen y se multiplican como estructuras esferoides, manteniendo *in vitro* sus características estructurales y funcionales, expresando su capacidad de generar matriz extracelular, polarización e interacción intercelular, concluyéndose que estos sistemas esferoideos tridimensionales de células tumorales son aptos para estudiar la biología del cáncer.

Una de las limitantes en este modelo experimental es que los organoides inducidos y el cúmulo de esferoides derivados de células tumorales no tienen vasos sanguíneos, lo que modifica de manera significativa su comportamiento en relación con el desarrollo tumoral *in vivo*.<sup>50-52</sup>

Para el estudio de células tanto sanas como tumorales en microgravedad se han desarrollado dos dispositivos para el cultivo celular, el Clinostat y el biorreactor rotacional. Mediante estas técnicas de cultivo se obtienen grandes acúmulos celulares, que mantienen su arquitectura y se facilita la expansión.

En el biorreactor rotacional se han desarrollado modelos de cáncer de mama, cérvix, colon, hepatocelular, neuroblastoma, entre otros.

Con el Clinostat se ha logrado el cultivo y crecimiento de líneas celulares de astrocitoma, carcinoma epidermoide, melanoma y osteosarcoma.<sup>53</sup>

## Alteraciones inmunológicas, genéticas y citoesqueleto en microgravedad

En un ambiente de microgravedad se presentan alteraciones en la respuesta inmune. Por un lado algunos estudios han mostrado que existe una marcada disfunción en la respuesta inmune caracterizada por inhibición en la mitogénesis linfocítica, disminución en la actividad de células asesinas naturales, disminución en la síntesis de citocinas y en la actividad y poblaciones de células T. Asimismo, otros estudios han mostrado incremento en la producción de citocinas por células tímicas y esplénicas y por otras células inmunes, en especial de interleucinas 1, 3 y 6, factor de necrosis tumoral e interferón gamma. El impacto de estas alteraciones en favorecer la proliferación de células neoplásicas no es claro, dado que no se ha encontrado mayor riesgo de neoplasias en astronautas cuando se compara con la población general, excepto quizá por el de próstata.<sup>54-59</sup>

En microgravedad se presentan alteraciones significativas en la expresión de ciertos genes, en especial de aquellos que controlan la expresión de citocinas. En un interesante modelo experimental en el que se evaluaron mediante microarreglos 10 000 genes de células epiteliales tubulares de riñón, se encontró alteración en la expresión de 1 632 genes. Este estudio demostró contundentemente que en microgravedad se presentan alteraciones en la expresión de genes y, por lo tanto, diferentes funciones derivadas de éstos como la señalización y la formación de citoesqueleto. En otro modelo experimental en el que se evaluaron 20 000 genes de células leucémicas en el espacio, se encontró alteración en la expresión de genes que controlaban funciones como apoptosis, ciclo celular, supresión tumoral, transducción de señalización y formación de citoesqueleto. Resultados semejantes se han encontrado en genes de células de carcinoma cervicouterino.<sup>60-62</sup>

El citoesqueleto celular y sus componentes principales, actina, microfilamentos y microtúbulos, presentan importantes modificaciones en microgravedad. Su desorganización condiciona importantes alteraciones en funciones como la apoptosis, señalización y migración celular. La reorganización de la tubulina en una estructura microtubular es dependiente de gravedad. La modificación en la estructura del microesqueleto en microgravedad, pudiese alterar el comportamiento de la células neoplásicas, en especial su capacidad metastásica, migración, adhesión e invasión.<sup>63-65</sup>

La investigación sobre el comportamiento de las células, en especial de las neoplásicas, en ambiente de microgravedad, abre una gran área de oportunidad en el conocimiento del cáncer y el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas. El efecto de la radiación solar y cósmica puede ser una de las grandes limitantes para los viajes espaciales prolongados tripulados, por los efectos nocivos que tiene sobre el ser humano. El espacio sigue siendo un gran reto, pero la investigación científica está acortando las distancias.



# Referencias

1. Cucinotta FA, Durante M. Evidence Report: Risk of Radiation Carcinogenesis; National Aeronautical and Space Agency: Houston, TX, USA, 2013.
2. National Research Council. Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation: Beir V; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 1990.
3. Shavers MR, Zapp N, Barber RE, Wilson JW, Qualls G, Toupes L, et al. Implementation of alara radiation protection on the ISS through polyethylene shielding augmentation of the service module crew quarters. *Adv Space Res.* 2004; 34:1333–37.
4. Committee on the Evaluation of Radiation Shielding for Space Exploration; Aeronautics and Space Engineering Board; Division on Engineering and Physical Sciences; National Research Council. Managing Space Radiation Risk in the New Era of Space Exploration; National Academies Press: Washington, DC, USA, 2008.
5. Hamm PB, Billica RD, Johnson GS, Wear ML, Pool SL. Risk of cancer mortality among the longitudinal study of astronaut health (Isah) participants. *Aviat Space Environ Med.* 1998;69:142–4.
6. Hamm PB, Nicogossian AE, Pool SL, Wear ML, Billica RD. Design and current status of the longitudinal study of astronaut health. *Aviat Space Environ Med.* 2000; 71:564–70.
7. Peterson LE, Pepper LJ, Hamm PB, Gilbert SL. Longitudinal study of astronaut health: Mortality in the years 1959–1991. *Radiat Res.* 1993;133:257–64.
8. Behnken R, Barratt M, Walker S. Presentation to the Institute of Medicine-Ethics Principles and Guidelines for health standards for long duration and exploration spaceflights; National Aeronautics and Space Administration: Washington, DC, USA, 2013.
9. Van Baalen M. National Aeronautics and Space Administration (NASA), Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, TX, USA. Personal communication, 2014.
10. Fry JM, Powers-Risius P, Alpen EL, Ainsworth EJ. High LET radiation carcinogenesis. *Radiat Res.* 1995;104: S188–95.
11. Alpen EL, Powers-Risius P, Curtis SB, DeGuzman R. Tumorigenic potential of high-Z, high-LET charged particle radiations. *Radiat Res.* 1993;88:132–43.
12. Dicello JF, Christian A, Cucinotta FA, Gridley DS, Kathirithamby R, et al. In vivo mammary tumorigenesis in the sprague-dawley rat and microdosimetric correlates. *Phys Med Biol.* 2004;49:3817–30.
13. Weil MM, Bedford JS, Bielefeldt-Olmann H, Ray AF, Gernik PC, et al. Incidence of acute myeloid leukemia and hepatocellular carcinoma in mice irradiated with 1 GeV/nucleon  $^{56}\text{Fe}$  ions. *Radiat Res* 2009;172: 213–219.
14. Imaoka T, Nishimura, Kakinuma S, Hatano Y, Ohmachi Y, et al. High relative biological effectiveness of carbon ion irradiation on induction of rat mammary carcinoma and its lack of H-ras and Tp53 mutations. *Inter J Radiat Oncol Biophys.* 2007;69:194–203.
15. Trani D, Datta K, Doiron K, Kallakury B, Fornace Jr AJ. Enhanced intestinal tumor multiplicity and grade in vivo after HZE exposure: mouse models for space radiation risk estimates. *Radiat Environ Biophys.* 2010;49:389–96.
16. Datta K, Suman S, Kallakury BV, Fornace Jr AJ. Heavy ion radiation exposure triggered higher intestinal tumor frequency and greater  $\beta$ -catenin activation than  $\alpha$  radiation in APC Min/+ mice. *PLoS One* 2013;8 e59295.
17. Grahn D, Lombard LS, Carnes BA. The comparative tumorigenic effects of fission neutrons and Cobalt-60  $\gamma$  rays in B6CF1 mouse. *Radiat Res.* 1992;129:19–36.
18. Wolfe C, Lafuma J, Masse R, Morin M, Kellerer A. Neutron RBE for induction of tumors with high lethality in sprague-dawley rats. *Radiat Res.* 2000;154:412–20.
19. Cucinotta FA, Chappell LJ. Non-targeted effects and the dose response for heavy ion tumor formation. *Mutat Res.* 2010;687:49–53.
20. Barcellos-Hoff MH, Nyugen DH. Radiation carcinogenesis in context: how do irradiated tissues become tumors? *Health Phys.* 2009; 97:446–53.
21. Kadhim M, Salomaa S, Wright E, Hildenbrandt G, Belyakov OV, et al. Non-targeted effects of ionizing radiation - implications for low dose risk. *Mutat Res.* 2013;752:84–98.
22. National Aeronautics and Space Agency (NASA). NASA space flight humans system standard, volume 1: Crew health. In Space-Permissible Exposure Limit (SPEL) for Space Flight Radiation Exposure Standard; NASA: Washington, DC, USA, 2007.
23. Prise KM, Ahnström G, Belli M, Carlsson J, Frankenberg D, Kiefer J, et al. A review of dsb induction data for varying quality radiations. *Int J Radiat Biol.* 1998;74:173–84.
24. Sutherland BM, Bennett PV, Sidorkina O, Laval, J. Clustered DNA damages induced in isolated DNA and in human cells by low doses of ionizing radiation. *Proc Natl Acad Sci.* 2000;97:103–8.
25. Rydberg B, Cooper B, Cooper PK, Holley WR, Chatterjee A. Dose-dependent misrejoining of radiation-induced DNA double-strand breaks in human fibroblasts: experimental and theoretical study for high- and low-LET radiation. *Radiat Res.* 2005;163: 526–34.
26. Leatherbarrow EL, Harper JV, Cucinotta FA, O'Neill P. Induction and quantification of  $\gamma$ -H2AX foci following low and high LET irradiation. *Int J Radiat Biol.* 2006; 82:111–8.
27. Fakir H, Sachs RK, Stenerlöw B, Hofmann W. Clusters of DNA double-strand breaks induced by different doses of nitrogen ions for various LETs: experimental measurements and theoretical analyses. *Radiat Res.* 2006; 166:917–27.
28. Hada M, Sutherland BM. Spectrum of complex DNA damages depends on the incident radiation. *Radiat Res.* 2006;165: 223–30.
29. Phillips ER, McKinnon PJ. DNA doublestrand break repair and development. *Oncogene.* 2007;26:7799–7808.

30. O'Driscoll M, Jeggo PA. The role of double-strand break repair—insights from human genetics. *Nature Rev Genet.* 2006;7:45–54.
31. Löbrich M, Jeggo PA. The impact of a negligent G2/M checkpoint on genomic instability and cancer induction. *Nature Rev Cancer.* 2007;7:861–9.
32. Wyman C, Kanaar R. DNA double-strand break repair: all's well that ends well. *Annu Rev Genet.* 2006;40:363–83.
33. Riballo E, Kühne M, Rief N, Doherty A, Smith GC, Recio MJ, et al. A pathway of double-strand break rejoining dependent upon ATM, Artemis and proteins locating to  $\gamma$ -H2AX foci. *Mol Cell.* 2004;16:715–24.
34. Wang J, Pluth JM, Cooper PK, Cowan MJ, Chen DJ, Yannone SM. Artemis phosphorylation and function in response to damage. *DNA Repair.* 2005;7:556–70.
35. Pluth JM, Yamazaki V, Cooper BA, Rydberg BE, Kirchgessner CU, Cooper PK. DNA double strand break repair and chromosomal rejoining defects with misrejoining in Nijmegen breakage syndrome cells. *DNA Repair.* 2008;7:108–18.
36. Durante M, Cucinotta FA. Heavy ion carcinogenesis and human space exploration. *Nat Rev Cancer.* 2008;8:465–72.
37. Cucinotta FA, Kim MY, Chappell LJ. Space radiation cancer risk projections and uncertainties – 2012. Hanover, MD: National Aeronautics and Space Administration (2013). NASA/TP-2013-217375.
38. Locke PA, Weil MM. Personalized cancer risk assessments for space radiation exposures. *Front Oncol.* 2016;6:38.
39. Kato TA, Wilson PF, Nagasawa H, Fitzek MM, Weil MM, Little JB, et al. A defect in DNA double strand break processing in cells from unaffected parents of retinoblastoma patients and other apparently normal humans. *DNA Repair (Amst).* 2007;6:818–29.
40. Kato TA, Nagasawa H, Weil MM, Little JB, Bedford JS. Levels of gamma-H2AX foci after low dose-rate irradiation distinguish human ATM heterozygotes and other mildly radiosensitive individuals. *Radiat Res.* 2006;166:443–53.
41. Rosemann M, Gonzalez-Vasconcellos I, Domke T, Kuosaite V, Schneider R, Kremer M, et al. A Rb1 promoter variant with reduced activity contributes to osteosarcoma susceptibility in irradiated mice. *Mol Cancer.* 2014;13:182–93.
42. Brenner DJ. Radiation risks potentially associated with low-dose CT screening of adult smokers for lung cancer. *Radiology.* 2004;231:440–5.
43. Sarma A, Heilbrun ME, Conner KE, Stevens SM, Woller SC, Elliott CG. Radiation and chest CT scan examinations: what do we know? *Chest.* 2012;142:750–60.
44. Unsworth BR, Lelkes PI. Growing tissues in microgravity. *Nature Med.* 1998;4:901–8.
45. Todd P. Gravity-dependent phenomena at the scale of the single cell. *ASGSB Bull.* 1989;2:95–113.
46. Montgomery PO. The response of single human cells to zero-gravity. *In Vitro.* 1978;14:165–73.
47. Cogoli A. Hematological and immunological changes during spaceflight. *Acta Astronaut.* 1981;8:995–1002.
48. Cogoli A. Space flight and the immune system. *Vaccine.* 1993;11:496–503.
49. Becker JL, Souza GR. Using space-based investigations to inform cancer research on earth. *Nat Rev Cancer.* 2013;13:315–27.
50. Kunz-Schughart LA, Kreutz M, Kneuchel R. Multicellular spheroids: a three-dimensional in vitro culture system to study tumour biology. *Int J Exp Path.* 1998;79:1–23.
51. Nederman T, Norling B, Glimelius B, Carlsson J, Brunk U. Demonstration of an extracellular matrix in multicellular tumor spheroids. *Cancer Res.* 1984;44:3090–97.
52. Redden RA, Doolin EJ. Microgravity assay of neuroblastoma: in vitro aggregation kinetics and organoid morphology correlate with MYCN expression. *In Vitro Cell Dev Biol Anim* 2011; 47: 312–7.
53. Klaus DM. Clinostats and bioreactors. *Grav Space Biol Bull.* 2001;14: 55–64.
54. Jessup JM, Goodwin TJ, Spaulding GF. Prospects for use of microgravity-based bioreactors to study three dimensional host tumor interactions in human neoplasia. *J Cell Biochem.* 1993;51:290–300.
55. Sonnefeld G. Spaceflight alters immune cell function and distribution. *J Appl Physiol.* 1992;73:1915–55.
56. Lesnyak AT. Immune changes in test animals during spaceflight. *J Leuk Biol.* 1993;54:214–6.
57. Sonnefeld G. Spaceflight and development of immune responses. *J Appl Physiol.* 1998;85:1429–33.
58. Taylor GR, Kostantinova I, Sonnefeld G, Jennings R. Changes in the immune system during and after spaceflight. *Adv Space Biol Med.* 1997;6:1–32.
59. Reynolds RJ, Day SM. Mortality among US astronauts: 1980–2009. *Aviat Space Environ Med.* 2010;81: 1024–27.
60. Hammond TG. Gene expression in space. *Nature Med* 1999;5: 359–62.
61. Hammond TG. Mechanical culture conditions affect gene expression: gravity induced changes on the space shuttle. *Physiol Genom.* 2000;8:163–73.
62. Lewis ML. cDNA microarray reveals altered cytoskeletal expression in space flown leukemic T lymphocytes (Jurkat). *FASEB J.* 2001;15:1783–1805.
63. Lewis ML. The cytoskeleton in spaceflown cells: an overview. *Grav Space Biol Bull.* 2004;17: 1–11.
64. Tabony J. Gravity dependence of microtubule self-organization. *Grav Space Biol Bull.* 2004;17:13–25.
65. Papaseit C, Pochon N, Tabony J. Microtubule self-organization is gravity dependent. *Proc Natl Acad Sci.* 2000;97:8364–68.



# 21. Microbiología espacial e infecciones en el Espacio

José Luis Sandoval Gutiérrez, Luis Alberto Ochoa Carrera,  
Edgar Enrique Sevilla Reyes

## ■ Introducción



La tripulación del Apolo 11 regresa de su misión espacial. Se observa a los astronautas portando su traje de aislamiento biológico como parte del protocolo de seguridad implementado por NASA. (Fuente: National Aeronautics and Space Administration; NASA)

La microbiología ha sido considerada y definida como una ciencia que ha evolucionado significativamente, englobando aspectos antiguos y nuevos. Lo anterior puede verse reflejado desde técnicas básicas empleadas desde hace cien años (p. ej., aislamiento de microorganismos y la realización de cultivos), técnicas que actualmente se siguen implementando en los laboratorios de diagnóstico e investigación. Sin embargo, con el advenimiento de nuevas tecnologías y metodologías, los microbiólogos actuales han podido utilizar estas herramientas para realizar análisis moleculares y epidemiológicos detallados de los microorganismos en la Tierra, pero también con proyección a las actividades relacionadas con los vuelos espaciales.

De la misma forma, la evolución ha ido colocando a la microbiología como un centro de atención multidisciplinario, mismo que requiere de cada una de estas interacciones para predecir y analizar el comportamiento microbiano en diversos ambientes, poblaciones e individuos. Es necesario que primero definamos lo que es la microbiología, con el objeto de establecer las bases sobre las cuales se analizarán: el comportamiento de los microorganismos en ambientes extremos (p. ej., ambientes con microgravedad) y situaciones presentes en los hospederos (p. ej., personal inmunosuprimido o con susceptibilidad al desarrollo de infecciones).

La microbiología ha sido definida como el estudio de los microorganismos, entendiendo actualmente que la microbiología puede comprender diversos grupos taxonómicos como lo son: bacterias, hongos, parásitos y virus. Hoy en día los microorganismos han influido en todas las formas de vida de la Tierra y se cree que su impacto en ecosistemas extraterrestres sea fundamental para el desarrollo de vida.

Esta disciplina ha llegado a ser comprendida gracias a su interrelación con otras disciplinas, ya que la biología microbiana comparte muchas características bioquímicas con células de organismos pluricelulares. Esta ciencia es aplicable a muchas áreas (medicina, biotecnología, agricultura, procesos industriales y de bio-remediación, entre otras).

La importancia de los microorganismos puede verse reflejada en procesos desde el aumento en la capacidad nutricional de suelos, fertilidad de animales, hasta la producción de antibióticos. Ya desde tiempos inmemoriales, estos organismos han existido en nuestro planeta, llevando a cabo diversos procesos químicos de adaptación a organismos más desarrollados, pudiendo evidenciar a lo largo de la historia su considerable beneficio y aporte al ser humano o en su defecto su asociación considerablemente dañina.

El propósito de este capítulo se centra fundamentalmente en la revisión de las actividades relacionadas con el uso de microorganismos en los programas espaciales, así como en la importancia de esta ciencia como parte sustancial en la planeación estratégica de los mismos. Su aplicación puede considerarse desde el estudio para la obtención de nuevas fuentes de energía, modificación de procesos bioquímicos y biotecnológicos en ambientes extremos, hasta el impacto que han tenido en el desarrollo de infecciones en los cosmonautas.

## **Microbiología espacial, ¿un concepto diferente?**

Entre los objetivos de estudio de esta área, se encuentra el desarrollo de procesos que involucren a los microorganismos y los posibles beneficios que conllevaría su uso para el establecimiento de vida en otros planetas. En la actualidad existen diversos programas que cuentan con recursos ilimitados, mismos que han sido enfocados al desarrollo de nuevas tecnologías, evaluando el comportamiento microbiano en ambientes extremos. Lo anterior es realizado en áreas especializadas llamadas labo-



**Figura 21.1.**  
Estación Espacial Internacional (EEI; ISS en inglés).  
(Fuente: National Aeronautics and Space Administration; NASA.)

ratorios microbiológicos, siendo éstos, espacios diseñados dentro de instalaciones específicas, que cuentan con equipos y dispositivos médicos para realizar estas investigaciones. Dichos experimentos, prácticas y trabajos con carácter científico o tecnológico deben de ser realizados en ambientes controlados, para garantizar la integridad del personal que los manipula, así como el ambiente.

El uso de los microorganismos ha evolucionado en forma tal, que actualmente se requiere de una minuciosa evaluación de riesgo por parte de los involucrados antes de comenzar actividades con agentes biológicos. De la misma forma en que se realizan estas actividades en la Tierra, también existen estos ambientes seguros en instalaciones espaciales, las cuales se rigen por la normatividad aplicable a laboratorios terrestres<sup>1,2</sup> (Figura 21.1).

## Microbiología y el riesgo biológico

La evaluación de riesgo es indispensable antes de que se comience a realizar actividades en el laboratorio. De acuerdo con lo anterior, es necesario que se caractericen y clasifiquen en forma adecuada cualquier tipo de microorganismos con los cuales se desarrollarán actividades en un laboratorio. Hoy existe una clasificación de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que permite ubicar a los microorganismos de acuerdo al grupo de riesgo al cual pertenece.<sup>3</sup>

La anterior clasificación se basa en la capacidad que poseen los agentes biológicos o mi-

croorganismos para causar enfermedades en humanos o animales previamente sanos, así como el riesgo individual y poblacional correspondiente. De manera que un agente biológico aumentará su nivel de riesgo al causar un riesgo individual y poblacional, pudiendo ser moderado o alto.

Por otra parte, los agentes biológicos que representen un riesgo mayor, deberán ser referidos a laboratorios que cuenten con la infraestructura necesaria o requerida (p. ej., características del diseño, construcción, barreras de contención empleadas, equipo y dispositivos médicos). De acuerdo con lo anterior, es necesaria la implementación de prácticas y procedimientos específicos para el trabajo con estos agentes biológicos y la capacitación continua del personal involucrado que permita evaluar su competencia técnica.

Hoy en día los laboratorios pueden ser divididos de acuerdo al nivel de bioseguridad que presentan (BSL; *Biosafety Level*). La anterior clasificación puede ser aplicada a laboratorios o instalaciones que realicen actividades de enseñanza, investigación o diagnóstico, mismas que requieran prácticas específicas y equipos de seguridad diversos, de acuerdo al riesgo biológico presente.

La anterior clasificación forma parte de las “buenas prácticas microbiológicas”, que son requeridas por parte del personal (p. ej., uso de equipo de protección personal [EPP]; uso de equipos especializados como gabinetes de seguridad biológica [GSB]; y el uso de contenedores especiales para el traslado de materiales biológicos, entre otros).



**Figura 21.2.**

El cosmonauta Tim Kopra realiza procesos propios del programa espacial en un gabinete de seguridad con microgravedad, en el Laboratorio Destiny en la EEI.

(Fuente: National Aeronautics and Space Administration; NASA.)

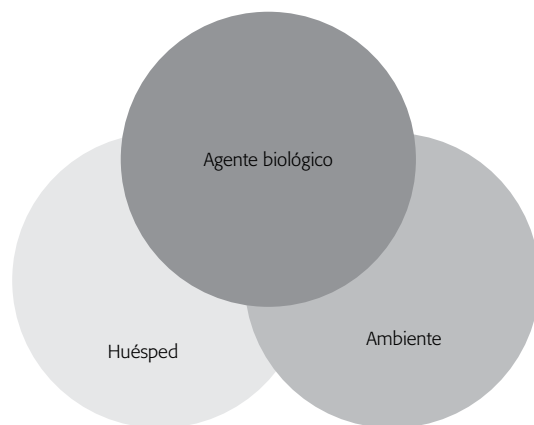
La clasificación propuesta por la OMS respecto al nivel de riesgo de los agentes biológicos en los laboratorios terrestres, es la misma para los laboratorios ubicados en la Estación Espacial Internacional (EEI). La anterior propuesta formó parte de la política impulsada por los Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Esto fue implementado en el laboratorio ubicado en el área asignada a Estados Unidos dentro de la EEI, ya que forma parte de un laboratorio más de esa nación. Por lo anterior, este último está sujeto a todas las disposiciones oficiales y procedimientos de trabajo que son requeridos en cualquier laboratorio dentro del territorio estadounidense (Figura 21.2.)

Adicionalmente a esta política, el trabajo en el laboratorio de la EEI no es muy diferente al realizado en los laboratorios terrestres, ya que ambos laboratorios se componen de una serie de barreras para garantizar la seguridad de la tripulación y del ambiente donde conviven los cosmonautas. Estas barreras (primarias y secundarias) son las encargadas de proveer la protección para la manipulación de los agentes biológicos, las cuales son descritas a continuación.

- a) Barreras primarias: equipo de protección personal, gabinetes de seguridad biológica, contenedores para el traslado de materiales biológicos, procedimientos y programas de inmunización específicos
- b) Barreras secundarias: creación de ambientes seguros como un sistema de presiones diferenciales, para evitar el escape de los microorganismos

Los microorganismos poseen ciertas características que es necesario considerar antes de realizar cualquier manipulación o experimentación. Una adecuada evaluación del riesgo biológico permitirá contemplar algunos factores propios del microorganismo, del hospedero y del ambiente, para que esta evaluación sea efectiva y lo más completa posible.<sup>4-7</sup>

Los factores a considerar en una evaluación de riesgo que involucre la manipulación de agentes biológicos, se listan en la Figura 21.3 y el Cuadro 21.1



### **Figura 21.3.**

**Factores para evaluación del riesgo biológico.**

(Fuente: modificado de: Johnson (2001), Issues in Public Health.)



## **Cuadro 21.1.**

### **Factores determinantes para la evaluación de riesgo biológico**

---

#### ● **Factores del agente biológico**

- Conocimiento o desconocimiento del agente biológico
  - Vía de transmisión
  - Estabilidad del agente en superficies (ambiente)
  - Dosis infecciosa mínima
  - Vectores relacionados con la transmisión del agente
  - Factores de virulencia
  - Signos y síntomas causantes por el agente biológico
  - Toxigenicidad del agente
  - Resistencia a fármacos
  - Grupo de riesgo
  - Características epidemiológicas (p. ej., morbilidad, mortalidad)
  - Información relacionada con el agente
- 

#### ● **Factores del huésped**

- Existencia de vacunas o inmunizaciones efectivas
  - Accesibilidad a tratamientos o profilaxis efectiva
  - Estado inmunológico del huésped
  - Capacitación y experiencia requerida para la manipulación de(los) agente(s)
  - Equipo de protección personal
  - Poblaciones susceptibles
- 

#### ● **Factores del ambiente**

- Procedimientos de operación estándar para la manipulación de agentes
  - Higiene ambiental existente
  - Nivel de contención requerido (instalaciones)
  - Asignación de recursos
  - Normatividad (p. ej., guías, procedimientos, entre otros)
- 

## **Importancia y conocimiento del metabolismo microbiano**

Para entender la diversidad microbiana, es necesario realizar un análisis del metabolismo microbiano. Centenares de científicos han destinado su vida al estudio de las principales rutas catabólicas y metabólicas de una gran variedad de microorganismos. Actualmente existen diversas referencias bibliográficas donde se describe la nutrición, cultivo y metabolismo microbiano. El conocer cada una de estas características ha contribuido significativamente a que el hombre pueda implementar nuevos procesos en la Tierra y hoy sirve como referencia para llevar a cabo diversos experimentos extraorbitales, con el objeto de evaluar producción específica de un metabolito en cuestión, tasa de crecimiento, efectos ambientales sobre el crecimiento (p. ej., temperatura, efectos osmóticos y presencia de oxígeno, entre otros).

Por otra parte, lo anterior ha llevado a profundizar en el estudio de la biología molecular microbiana, lo que ha conllevado a comprender la evolución de estos microorganismos y

asociaciones con otros organismos. El auge de la era espacial ha llevado a que los ambientes con microgravedad sean uno de los más estudiados, con el objeto de describir los efectos sobre el ser humano. Lo anterior permitirá el desarrollo de nuevas metodologías para detectar oportunamente la aparición de agentes infecciosos en vuelos espaciales y, en consecuencia, el desarrollo de nuevos y mejores tratamientos.

## Medicina espacial y microbiología

Uno de los factores determinantes para prevenir y controlar infecciones en cosmonautas es, sin duda alguna, el conocer las características de los mismos. Ha sido comprobado que los vuelos prolongados en ambientes específicos como microgravedad, representan un riesgo significativo para el desarrollo y control de infecciones.<sup>8</sup>

Durante la duración de estos vuelos espaciales, la tripulación se expone a diversas condiciones como: radiaciones, altos niveles de estrés, entre otros. Lo anterior conlleva a que existan variaciones en las respuestas de su sistema inmunológico y hacen que la tripulación sea propensa al desarrollo de infecciones.

Desde que se inició la carrera espacial, diversos factores han sido contemplados como temas serios (como abastecimiento de consumibles, fallas en los sistemas de comunicación y planes de respuesta a emergencias), sin embargo la salud de los cosmonautas no queda a un lado. Desde el inicio de los vuelos espaciales, factores como las misiones prolongadas han sido contempladas y sus posibles efectos adversos sobre la salud de la tripulación. De acuerdo con *Mermel 2012*, se estima que una misión a Marte desde la Tierra tardaría aproximadamente 520 días ya que la distancia entre ambos astros es de 360 millones de kilómetros. Además de las posibles complicaciones derivadas de dicha misión, existiría un retraso en el sistema de comunicación debido a la distancia existente entre ambos astros. Esto último representa una barrera significativa de tiempo y distancia como las principales dificultades para el control de infecciones de la tripulación.

Otras de las preocupaciones del personal médico son los efectos de la microgravedad y exposiciones a radiaciones, así como las posibles alteraciones al sistema inmunológico.<sup>9</sup> Tal como se explicó anteriormente, el metabolismo microbiano depende de una serie de factores para llevarse a cabo y al exponerse el microorganismo a condiciones diferentes, puede ser resultante de un incremento en los factores de su virulencia.<sup>10,11</sup>

Numerosos experimentos se han llevado a cabo con el objeto de conocer los efectos de la microgravedad sobre el crecimiento microbiano y la virulencia,<sup>12</sup> entre los que destacan microorganismos como *Pseudomonas aeruginosa*.<sup>13</sup> Por otra parte, algunos otros factores como la formación de biopelículas han sido estudiadas a la par de sus interacciones con el sistema inmunológico durante los vuelos espaciales.<sup>14-17</sup> Además, se han presentado estudios, mismos que refieren la reactivación de herpesvirus<sup>18</sup> y el incremento de la biota aeróbica como *Pseudomonas* y *Staphylococcus aureus* en diversas misiones espaciales.<sup>19-20</sup>

La transmisión de patógenos entre cosmonautas ha sido demostrada y documentada por diversos autores.<sup>21-26</sup> Factor decisivo resulta de igual forma las condiciones establecidas durante los vuelos espaciales, ya que son particulares como: presencia de espacios limitados, sistemas de recirculación de agua y aire, ambientes compartidos por la tripulación y fácilmente contaminables, resultando estos últimos, factores favorables para el desarrollo de microorganismos patógenos.

Es en estos casos donde la planeación estratégica de los profesionales del área de la salud encargados de monitorear a los cosmonautas, juega un papel fundamental. De acuerdo con diversos reportes realizados por personal médico, se han detectado diversas afecciones a la salud de los cosmonautas, entre los que destacan: fiebre, escalofríos, presencia de infecciones fúngicas, enfermedades tipo influenza, infecciones en vías urinarias, estomatitis, gastroenteritis virales, infecciones cutáneas y algunas otras infecciones virales.<sup>10-12</sup>

## Retos en los programas espaciales para la prevención de infecciones

El cosmonauta, los microorganismos y el ambiente, son factores cruciales que necesitan ser controlados durante los vuelos espaciales. En lo que respecta a los microorganismos, se ha demostrado que las bacterias presentan un crecimiento rápido en medios líquidos en situación de microgravedad,<sup>49</sup> reflejando una corta fase logarítmica y una fase exponencial potencializada.<sup>10-13</sup> Además se han presentado estudios donde se ha probado la resistencia a diversas concentraciones de una amplia línea de antibióticos,<sup>43-45</sup> así como estudios sobre el incremento de la virulencia en modelos animales.<sup>46</sup>

La aeronave consiste en un ambiente que puede ser fácilmente contaminado por microorganismos y a su vez, esto puede llevar a ser una fuente posible de contaminación para la tripulación.<sup>47</sup> Es importante mencionar que dentro de este contexto, la Aerobiología desempeña un papel importante para el estudio de las partículas localizadas en el ambiente. Lo anterior es aplicable a todas aquellas partículas que sean aerosolizadas y mismas que se producen por actividades como estornudos, toser y hablar.

Es en estos ambientes cuando intervienen diversas condiciones para que un aerosol prevalezca en un ambiente determinado. Entre estos factores se ubican: el tamaño de partícula, la humedad del aire, la temperatura, el tipo de superficies y el sistema de filtración de la aeronave. Lo anterior es demostrable mediante una caracterización de aerosoles, mismos que pueden transmitirse de persona a persona y causar infecciones durante los vuelos espaciales.<sup>39,40,48</sup>

En lo que respecta al personal involucrado (cosmonautas), actualmente se tienen numerosos registros de los cambios que el sistema inmunológico presenta durante la realización de vuelos espaciales,<sup>14,15</sup> las alteraciones en la cicatrización de heridas,<sup>27</sup> inhibición de la blastogénesis de leucocitos,<sup>28,29</sup> alteración de la función de monocitos y granulocitos,<sup>30,31</sup> patrones alterados para la producción de citocinas,<sup>30</sup> alteración de diversas vías de señalización como células T<sup>32</sup> y la inhibición de actividad natural de las células denominadas *natural killers*,<sup>33</sup> entre otras. Sin embargo, aunque los efectos de los vuelos espaciales no han sido ampliamente estudiados en la microbiota intestinal humana, existen datos de una reducción en la biota de microorganismos anaerobios y un incremento significativo de microorganismos gramnegativos.

Parte de los estudios han arrojado resultados asombrosos, en donde el estrés asociado con ambientes de microgravedad y algunos aspectos inmunitarios de los cosmonautas han permitido cambios en la biota gastrointestinal.<sup>34,35</sup>

## Programa médico de las misiones espaciales

Antes de realizar cualquier misión espacial, la tripulación debe de someterse a un riguroso proceso de evaluaciones médicas para conocer: las actividades que realizará la tripulación, los peligros involucrados y el estatus de salud de la tripulación. Lo anterior forma parte de una evalua-

ción de riesgo, ya que como se mencionó antes, las posibilidades de brindar una atención médica son escasamente reducidas debido a factores como la distancia y la comunicación.

Estas evaluaciones médicas consisten en revisiones periódicas antes y al finalizar la misión correspondiente. Asimismo, la tripulación es evaluada en todo momento mediante sondas y medidores previamente implantados en su cuerpo, mismas que le permiten conocer a los médicos las condiciones de salud de la tripulación.

El aislamiento (en caso de ser necesario) antes del inicio de una misión es vital para evitar la transmisión de enfermedades contagiosas, mismas que pudieran interferir con el desempeño de la misión y el estado de salud de la tripulación. Por lo anterior, la tripulación permanece en cuarentena 7 días antes del despegue, para evitar el desarrollo de agentes patógenos. En caso de que un miembro de la tripulación presente indicios de ser portador de alguna infección, es motivo suficiente para suspender su participación en el programa y es atendido de inmediato. Para ello, cada programa espacial cuenta con un grupo de sustitutos capaces para sustituir en cualquier momento a un miembro de la tripulación. Tal es el caso para la tripulación del Apolo 13, que tuvo que sustituir a un miembro de su equipo al detectar un posible diagnóstico sospechoso de infección por el virus de sarampión. El simple hecho de enviar a un miembro de cualquier tripulación con alguna infección es suficiente para que pueda desarrollar infecciones en un periodo menor debido a ambientes específicos como la microgravedad.

Actualmente en diversas misiones espaciales se llevan a cabo experimentos que involucran manipulación de animales, evaluación de crecimiento de plantas y comportamiento de muchos microorganismos, sin embargo, independientemente de las actividades que realice la tripulación, es necesario que cada uno de ellos cumpla con la totalidad del programa médico diseñado para la misión. Lo anterior incluye que cada uno de los participantes cuente con un esquema de inmunizaciones previamente establecido, entre las que destacan: difteria, influenza, tétanos, polio, virus de hepatitis A y B, neumococo, meningococo, sarampión, rubéola, parotiditis y varicela. Esta última vacuna debe aplicarse a todo el personal que participe en vuelos espaciales, ya que existe suficiente evidencia documental que refiere la reactivación de herpesvirus en vuelos espaciales.<sup>18</sup> El programa de inmunizaciones está sometido a una evaluación de riesgo y adicionalmente otro de los factores a considerar es el monitoreo radiológico para descartar infecciones pulmonares como tuberculosis.

La valoración de la tripulación se realiza mediante diversas fases, es decir, evaluaciones implementadas antes del lanzamiento programado (L-45, L-30 y L-10), 45, 30 y 10 días antes del lanzamiento, respectivamente. Asimismo, dentro de estas valoraciones, se incluyen detallados programas para conocer los estatus: nutricional, dental, oftalmológico, auditivo, físico, psicológico, neurológico, neurocognitivo, y pruebas de motricidad.

El pasar por desapercibido un pequeño problema por parte del médico en tierra, puede desencadenar un gran problema en la misión, motivo por el cual además de los controles implementados se adicionan una serie de pruebas de laboratorio entre las que destacan: electrocardiograma en reposo, frecuencia cardíaca máxima y mínima, pruebas de funcionamiento pulmonar, estudios de densitometría ósea, pruebas de laboratorio clínico (hemograma completo, química sanguínea de 35 elementos), exudado nasofaríngeo,<sup>50,51</sup> examen coprológico y general de orina.

Es posible que algunos médicos también incluyan estudios adicionales y especializados (p. ej., búsqueda de estafilococos resistentes (MRSA), panel viral respiratorio, búsqueda de micosis endémicas como coccidioidomicosis e histoplasmosis. Asimismo la búsqueda de VIH es necesaria para garantizar que la tripulación posee un estado de salud óptimo.

Independiente de todas estas revisiones y estudios especializados, se debe destacar la capacitación que el personal debe de poseer antes de una misión (p. ej., educación que incluye higiene sobre medidas para el lavado de manos, primeros auxilios) y otros aspectos como



**Figura 21.4.**

Equipo médico empleado por la tripulación del programa Apolo 11.

(Fuente: National Aeronautics and Space Administration, NASA).

estrategias para la mitigación de infecciones. Esto último forma parte de los procedimientos de operación estándar antes de iniciar una misión espacial y de igual forma el personal deberá de llevar una copia de estos procedimientos durante la misión.

La participación del personal sobre el conocimiento de los signos y síntomas de las principales enfermedades que pudiesen padecer durante la misión, así como técnicas de primeros auxilios necesarias como la colocación de catéteres, son revisadas para garantizar la máxima preparación durante la misión. La tripulación cuenta con un botiquín de primeros auxilios, mismo que contiene lo necesario para la atención de una emergencia médica dentro de la aeronave (Figura 21.4).

## Medidas de bioseguridad y biocustodia en misiones espaciales

Siempre que se habla de “Microbiología” es un sinónimo de manipulación de microorganismos y agentes biológicos. La microbiología y la bioseguridad son áreas que están íntimamente ligadas y forman parte, sin duda alguna, de los programas destinados a las misiones espaciales. El éxito de una misión depende no sólo en parte de la tripulación que realiza actividades en el espacio, sino de todas aquellas personas que hacen posible esta misión, para que sus tripulantes regresen con bien. Es en este sentido donde un grupo multidisciplinario de profesionales intervienen, e involucra a microbiólogos, inmunólogos, bioquímicos, químicos, toxicólogos, médicos, ingenieros, biólogos, entre otros. Todo este equipo hace posible que una misión sea llevada a cabo, ya que participan activamente en el cuidado de la salud de la tripulación, el monitoreo del ambiente (interno y externo), así como las condiciones de la nave espacial.

Antes de planear una misión, es cuando este equipo de profesionales debe reunirse para realizar una evaluación de riesgo integral y saber si los riesgos a los cuales se enfrentará la tripulación, son aceptables o no. Al inicio de los programas espaciales, se tenía un conocimiento limitado sobre muchos factores que actualmente se han estudiado, sin embargo dependiendo del objeto de la misión y las actividades que cada uno de sus integrantes realizarán serán los riesgos asociados (riesgos físicos, radiológicos, biológicos, etc.).

En el caso muy particular de la evaluación de riesgo biológico, se deben implementar controles para los riesgos identificados. Lo anterior debe realizarse en forma adecuada para evitar exposiciones accidentales y que puedan resultar con una infección adquirida durante la misión. Es por ello que los responsables de analizar los riesgos biológicos deben contemplar desde la infraestructura de la aeronave, hasta el tipo de procedimientos que realizarán, cumpliendo en todo momento con una planeación estratégica para mitigación del riesgo biológico.

## Infraestructura de la nave espacial

Es de vital importancia que aunado a las prácticas, procedimientos y la capacitación recibida, se sumen controles de ingeniería como los que regularán las condiciones ambientales en la aeronave. Es en este sentido, que el sistema de inyección-extracción juega un papel fundamental para mantener libre de microorganismos patógenos el ambiente. Hoy se emplean en estos sistemas, filtros HEPA (*high efficiency particulated air*), mismos que poseen la capacidad de remover hasta 99.97% de partículas de hasta 0.3  $\mu\text{m}$  y adicionalmente se monitorean las condiciones ambientales generales como humedad relativa y la temperatura.

El tema del uso de diversas presiones diferenciales ha sido objeto de muchas investigaciones en donde debe de existir un diferencial en instalaciones como el sanitario. Asimismo, los espacios dedicados al almacenamiento y distribución de agua deberán estar en todo momento libres de materiales corrosivos y de elementos sin fuentes de carbón orgánico, para evitar la formación de microorganismos y sus correspondientes biopelículas. De la misma forma, los sistemas de descontaminación deben ser lo suficientemente confiables para impedir la proliferación de microorganismos no deseados.

También, se debe contar con sistemas que impidan la contaminación de instrumentos como tomas de agua, mediante la implementación de sistemas “libres de manos”.<sup>36</sup> Cada uno de los materiales empleados para la construcción de la aeronave, debe ser sometido a diversas pruebas, mismas que puedan presentarse en condiciones extremas (p. ej., duración, desgaste y resistencia) y que dichos materiales no representen un peligro para la tripulación. Adicionalmente se consideran pruebas que involucran actividades como presurización/despresurización, pruebas de filtración, hermeticidad, compatibilidad y vibración, son llevadas a cabo desde la elección de los materiales.

En la actualidad el diseño de las instalaciones se basa principalmente en materiales como aluminio y acero inoxidable. Lo anterior por ser materiales fácilmente descontaminables y no ser porosos, lo que permitiría la acumulación de microorganismos y materia orgánica.

Una evaluación de riesgo llevada a cabo por la NASA en la EEI, llevó a definir los niveles de bioseguridad existentes en dichas instalaciones. Dentro de esta evaluación, se contemplaron las características principales de los posibles microorganismos con los cuales se estarían desarrollando actividades, en conjunto con las características ambientales de la EEI. Como resultado de esta restricción y para proveer un mayor nivel de bioseguridad, se creó el nivel NASA BSL-2, mismo que se divide en dos categorías: BSL-2 moderado y BSL-2 alto. Los agentes tipo BSL-2 alto tienen dosis infecciosas mínimas y alto nivel de aerosolización (Cuadro 21.2).

Por otra parte, aunado a esta clasificación de riesgo en la EEI, la tripulación cuenta con numerosos equipos y dispositivos para la manipulación de agentes biológicos entre los que se encuentran, gabinetes específicos para el manejo de materiales biológicos. Este tipo de dispositivos, así como la mayoría de los equipos, deben de pasar por numerosas pruebas, ya que en un ambiente de microgravedad, los líquidos se comportan de manera diferente, lo cual representa un riesgo significativo para la tripulación.

## Cuadro 21.2.

Clasificación de riesgo biológico y niveles de bioseguridad en la EEI

Nivel de bioseguridad	Descripción	Nivel de contención requerido
1	Agentes biológicos que no causan enfermedad en humanos, mínimo riesgo al ambiente	1
2 (moderado)	Agentes biológicos asociados con enfermedad humana. Riesgo moderado al ambiente. Riesgo bajo de aerosolización	2
2 (alto)	Agentes biológicos de alto riesgo para la salud humana. Alto potencial de aerosolización	3
3	Agentes biológicos que causan enfermedad grave o letal. Transmisión aérea	Prohibido su uso en el espacio
4	Agentes biológicos que causan enfermedad crónica por aerosolización o contacto directo	Prohibido su uso en el espacio

Fuente: adaptado de: Wong et al. *Applied Biosafety*, 2011;16(3):158-62.

Este equipo facilita la realización de experimentos a la tripulación, mismo que basa su funcionamiento en un ambiente de microgravedad (Figuras 21.5 y 21.6)

## Actividades de la tripulación en vuelos espaciales

La tripulación que es enviada al espacio debe realizar múltiples tareas, como parte del programa espacial. Cada uno de los integrantes desempeña funciones específicas las cuales dependen de otras actividades complementarias por parte de los usuarios. Actualmente una gran cantidad de actividades son desarrolladas en los programas espaciales, dentro de estas numerosas actividades se encuentran experimentos diversos, mismos que involucran la manipulación de: bacterias, hongos, animales, plantas, toxinas, DNA recombinante y líneas celulares de mamíferos. Todo lo anterior requiere de medidas necesarias para evitar una exposición accidental y garantizar en todo momento la seguridad de cada uno de los tripulantes.

Las actividades efectuadas en estos laboratorios de igual forma pueden incluir: procedimientos de trabajo con animales, por lo que el personal debe considerar la revisión de los esquemas de vacunación de cada uno de los animales que viajarán al espacio. De la misma manera es necesario que cada uno de los modelos animales experimentales sea sometido a una evaluación clínica antes, durante y al finalizar la misión.

Independiente de que se realicen actividades que involucren a personal especializado para la manipulación de animales, es necesario que estas actividades sean realizadas de acuerdo con procedimientos específicos de trabajo para manejo de animales y el acondicionamiento de las jaulas.<sup>37,38</sup> Pueden existir de igual forma actividades que involucren procedimientos experimentales con plantas y en todo momento deberán de seguirse las precauciones necesarias para la manipulación de las mismas (Figura 21.7).

Hoy en día, se cuenta con un control específico dentro de las naves espaciales. Cada uno de estos controles es verificado periódicamente por la tripulación, para garantizar su óptimo funcionamiento. Entre estos procedimientos, destaca la revisión de los sistemas de ventilación y reciclaje de agua, uso de filtros HEPA, técnicas de higiene personal adecuada, entre otras. Asimismo, los controles de



**Figura 21.5.**

Gabinete de seguridad biológica con ambiente de microgravedad (Microgravity Science Glovebox; MSG). El cosmonauta Barry Wilmore trabaja con el MSG en la EEI.

(Fuente: National Aeronautics and Space Administration; NASA.)



**Figura 21.6.**

El cosmonauta André Kuipers de la Agencia Espacial Europea.

(Fuente: European Space Agency.)





**Figura 21.7.**

**a,** El cosmonauta Maxim Suraev trabajando con lechugas en el ambiente de la EEI.

**b,** Experimento realizado en la EEI con sauces como parte del programa Advanced Biological Research System.

(Fuente: National Aeronautics and Space Administration; NASA.)

ingeniería (p. ej., esclusas con cierre hermético, lavabos operables libres de manos y control del sistema de presiones diferenciales), deberán estar en óptimo funcionamiento. Esto garantiza que la integridad de la nave espacial se conserve y con ello evite que algún contaminante externo ingrese a la misma.

Otros de los procedimientos que involucran la seguridad de la tripulación son: la irradiación de alimentos por fuentes gamma, para evitar el desarrollo de patógenos específicos y hongos. El programa de alimentación en las misiones espaciales ha contemplado desde los inicios, la sustitución de alimentos perecederos por suplementos alimenticios. Estos últimos poseen todo el contenido nutrimental que un ser humano necesita, en cápsulas o tabletas. Lo anterior con el objeto de disminuir el riesgo de contaminación de los alimentos de la tripulación.

Si se sospecha que en una misión espacial pueda existir un contagio, se hace uso de EPP específico (p. ej., uso de respiradores N95).<sup>39-41</sup> Esto es importante en caso de que algún miembro de la tripulación presente sintomatología sospechosa de enfermedad respiratoria. Además, también es importante mencionar que las soluciones alcoholadas en ambientes extremos (p. ej., dentro de naves espaciales), no está recomendado por la posibilidad de contaminar los suministros de agua de la aeronave. Soluciones como cloruro de benzalconio y compuestos con base de ciclohexidina son una alternativa viable y óptima.<sup>42</sup>

# Referencias

1. Wong WC, Guidry R, Arneson DM, Zimmerman D, Downing M, Castro VA, et al. Biosafety onboard the International Space Station. *Applied biosafety: journal of the American Biological Safety Association*. 2011;16(3):58-162.
2. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, & National Institutes of Health. (2007). *Biosafety in microbiological and biomedical laboratories* (5th ed.). Chosewood LC, Wilson DE (ed). Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Disponible en: [www.cdc.gov/od/ohs/biosfty/bmlb5/bmlb5toc.htm](http://www.cdc.gov/od/ohs/biosfty/bmlb5/bmlb5toc.htm).
3. World Health Organization (WHO). (2004). *Laboratory biosafety manual* (3rd ed). Geneva: WHO.
4. Johnson B. (2001). Understanding, assessing, and communicating topics related to risk in biomedical research facilities, *ABSA Anthology of Biosafety IV - Issues in Public Health*, Chapter 10.
5. Johnson B (1996). Understanding, assessing and communicating risk in facilities conducting unique work with biological agents. Salt Lake City, UT: American Biological Safety Association Conference.
6. Johnson B (2000). Understanding, assessing and communicating risk in maximum containment facilities. Stockholm, Sweden: Protection Against Microbial Threats Workshop.
7. Knudsen RC (1998). Risk assessment for biological agents in the laboratory (pp. 56-63).
8. Memel LA. Infection prevention and control during prolonged human space travel. *Clin Infect Dis*. 2013;56:123-30.
9. Crucian B, Sams C. Immune system dysregulation during spaceflight: clinical risk for exploration-class missions. *J Leukoc Biol*. 2009;86:1017-8.
10. Nickerson CA, Ott CM, Wilson JW, Ramamurthy R, Pierson DL. Microbial response to microgravity and other low-shear environments. *Microbiol Mol Biol Rev*. 2004;68:345-61.
11. Wilson JW, Ott CM, Höner zu Bentrup K, et al. Spaceflight alters bacterial gene expression and virulence and reveals a role for global regulator Hfq. *Proc Natl Acad Sci*. 2007;104:16299-304.
12. Rosenzweig JA, Abogunde O, Thomas K, et al. Spaceflight and modeled microgravity effects on microbial growth and virulence. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2010;85:885-91.
13. Crabbé A, Schurr MJ, Monsieurs P, et al. Transcriptional and proteomic responses of *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 to spaceflight conditions involve Hfq regulation and reveal a role for oxygen. *Appl Environ Microbiol*. 2011;77:1221-30.
14. Mauclaire L, Egli M. Effect of simulated microgravity on growth and production of exopolymeric substances of *Micrococcus luteus* space and earth isolates. *FEMS Immunol Med Microbiol*. 2010; 59:350-6. 9.
15. Sonnenfeld G. The immune system in space, including earth-based benefits of space-based research. *Curr Pharm Biotechnol*. 2005;6:343-9.
16. Crucian BE, Stowe RP, Pierson DL, Sams CF. Immune system dysregulation following short- vs long-duration spaceflight. *Aviat Space Environ Med*. 2008;79:835-43.
17. Guéguinou N, Huin-Schohn C, Bascome M, et al. Could spaceflight associated immune system weakening preclude the expansion of human presence beyond Earth's orbit? *J Leukoc Biol*. 2009;86:1027-38.
18. Cohrs RJ, Mehta SK, Schmid DS, Gilden DH, Pierson DL. Asymptomatic reactivation and shed of infectious varicella zoster virus in astronauts. *J Med Virol*. 2008;80:1116-22.
19. Taylor GR. Recovery of medically important microorganisms from Apollo astronauts. *Aerosp Med*. 1974;45:824-8.
20. Ilyin VK. Microbiological status of cosmonauts during orbital spaceflights on Salyut and Mir orbital stations. *Acta Astronaut*. 2005;56:839-50.
21. Ilyin VK. Drug resistance of *E. coli* isolated from cosmonauts. En: Hooke LR, Teeter R, Garshnek V, Rowe J (ed). *USSR space life science digest NASA contractor report 3922(29)*. Washington, DC: NASA Office of Space Science and Applications, 1989:67.
22. Ilyin VK. Study of genetic characteristics and sensitivity to antibiotics of opportunistic microorganisms isolated in sealed environments. En: Stone LR, Rowe J (ed). *USSR space life sciences digest NASA contractorreport 3922(38)*. Washington, DC: NASA Office of Space Science and Applications, 1990:48.
23. Pierson DL, Mehta SK, Magee BB, Mishra SK. Person-to-person transfer of *Candida albicans* in the spacecraft environment. *J Med Vet Mycol*. 1995;33:145-50.
24. Pierson DL, Chidambarum M, Heath JD, et al. Epidemiology of *Staphylococcus aureus* in the Space Shuttle. *FEMS Immunol Med Microbiol*. 1996;16:273-81.
25. Klaus DM, Howard HN. Antibiotic efficacy and microbial virulence during spaceflight. *Trends Biotechnol*. 2006;24:131-6.
26. Decelle JG, Taylor GR. Autoflora in the upper respiratory tract of Apollo astronauts. *Appl Environ Microbiol*. 1976;32:659-65.
27. Davidson JM, Aquino AM, Woodward SC, Wilfinger WW. Sustained microgravity reduces intrinsic wound healing and growth factor responses in the rat. *FASEB J* 1998;13:325-9.
28. Kaur I, Simons ER, Castro VA, Mark-Ott C, Pierson DL. Changes in neutrophil functions in astronauts. *Brain Behav Immun*. 2004;18:443-50.
29. Kaur I, Simons ER, Castro VA, Ott CM, Pierson DL. Changes in monocyte functions of astronauts. *Brain Behav Immun*. 2005;19:547-54.
30. Lesnyak A, Sonnenfeld G, Avery L, et al. Effect of SLS-2 spaceflight on immunologic parameters of rats. *J Appl Physiol*. 1996;81:178-82.
31. Crucian BE, Cabbages ML, Sams CF. Altered cytokine production by specific human peripheral blood cell subsets immediately following spaceflight. *J Interferon Cytokine Res*. 2000;20:547-56.

32. Boonyaratanakornkit JB, Cogoli A, Li CF, et al. Key gravity-sensitive signaling pathways drive T cell activation. *FASEB J*. 2005;19:2020–2.
33. Buravkova LB, Rykova MP, Grigorieva V, Antropova EN. Cell interactions in microgravity: cytotoxic effects of natural killer cells in vitro. *J Gravit Physiol*. 2004;11:177–80.
34. Salzman NH. Microbiota-immune system interaction: an uneasy alliance. *Curr Opin Microbiol*. 2011;14:99–105.
35. Bailey MT, Dowd SE, Galley JD, Hufnagle AR, Allen RG, Lyte M. Exposure to a social stressor alters the structure of the intestinal microbiota: implications for stressor-induced immunomodulation. *Brain Behav Immun*. 2011;25:397–407.
36. Mermel LA, Josephson SL, Dempsey J, Parenteau S, Perry C, Magill N. Outbreak of *Shigella sonnei* in a clinical microbiology laboratory. *J Clin Micro*. 1997;35:3163–5.
37. Weber DJ, Rutala WA. Risks and prevention of nosocomial transmission of rare zoonotic diseases. *Clin Infect Dis*. 2001;32:446–56.
38. Chomel BB, Sun B. Zoonoses in the bedroom. *Emerg Infect Dis*. 2011;17:167–72.
39. Weber TP, Stilianakis NI. Inactivation of influenza A viruses in the environment and modes of transmission: a critical review. *J Infect*. 2008; 57:361–73.
40. Mermel LA. Preventing the spread of influenza A H1N1 2009 to health-care workers. *Lancet Infect Dis*. 2009;9:723–4. (Errata en: *Lancet Infect Dis*. 2010;10:16.)
41. Johnson DF, Druce JD, Birch C, Grayson ML. A quantitative assessment of the efficacy of surgical and N95 masks to filter influenza virus in patients with acute influenza infection. *Clin Infect Dis*. 2009;49:275–7.
42. Kassakian SZ, Mermel LA, Jefferson JA, Parenteau SL, Machan JT. Impact of chlorhexidine bathing on hospital-acquired infections among general medical patients. *Infect Control Hosp Epidemiol*. 2011;32:238–43.
43. Tixador R, Richoille G, Gasset G, et al. Preliminary results of Cytos 2 experiment. *Acta Astronaut*. 1985;12:131–4.
44. Tixador R, Richoille G, Gasset G, et al. Study of minimal inhibitory concentration of antibiotics on bacteria cultivated in vitro in space (Cytos 2 experiment). *Aviat Space Environ Med*. 1985;56:748–51.
45. Lapchine L, Moatti N, Gasset G, Richoille G, Templier J, Tixador R. Antibiotic activity in space. *Drugs Exp Clin Res* 1986; 12:933–8.
46. Nickerson CA, Ott CM, Mister SJ, Morrow BJ, Burns-Kelher L, Pierson DL. Microgravity as a novel environmental signal affecting *Salmonella enterica* serovar Typhimurium virulence. *Infect Immun*. 2000;68:3147–52.
47. Novikova ND. Review of the knowledge of microbial contamination of the Russian manned spacecraft. *Microb Ecol*. 2004;47:127–32.
48. Lindsley WC, Blachere FM, Thewlis RE, et al. Measurements of airborne influenza virus in aerosol particles from human coughs. *PLoS One*. 2010;5:e15100.
49. Kacena MA, Merrell GA, Manfredi B, et al. Bacterial growth in spaceflight: logistic growth curve parameters for *E. coli* and *Bacillus subtilis*. *Appl Microbiol Biotechnol*. 1999;51:229–34.
50. Lauderdale TL, Wang JT, Lee WS, et al. Carriage rates of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) depend on anatomic location, the number of sites cultured, culture methods, and the distribution of clonotypes. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis*. 2010;29:1553–9.
51. Mermel LA, Cartony JM, Covington P, Maxey G, Morse D. Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* colonization at different body sites: a prospective, quantitative analysis. *J Clin Microbiol*. 2011;49:1119–21.

# 22. Urgencias médicas en los vuelos espaciales

Martín de Jesús Sánchez Zúñiga, Nikolett Medveczky Ordóñez

*"Los seres humanos son el producto de una larga evolución, proceso que nos ha hecho totalmente adaptados a ambiente de la Tierra... Cuando se expone a un ambiente espacial, el cuerpo humano alcanza una nueva homeostasis..."<sup>1</sup>*

A. I. GRIGORIEV

## ■ Introducción

Los viajes de exploración espacial someten a los viajeros a serios desafíos relacionados directamente con los cambios en las fuerzas físicas, los efectos psicológicos debido al confinamiento prolongado y sobre todo los relacionados con la salud, los cuales están asociados a la continua exposición a la radiación, así como el cambio en el ambiente físico. Todos estos factores actúan de forma simultánea, precipitando una cascada de eventos en el cuerpo humano, que generan un verdadero riesgo para quienes llevan a cabo estas misiones. Algunos de los riesgos representan una amenaza mayor e inclusive el nivel de las respuestas fisiológicas ante el vuelo espacial varía en función del organismo. Afortunadamente, parece que la mayoría de estos riesgos se han logrado reducir a una nivel aceptable durante los últimos 40 años de investigación<sup>2</sup> (Figura 22.1)



**Figura 22.1.** Cambios generales asociados con la reducción de gravedad.

# Efectos de la microgravedad en el organismo humano

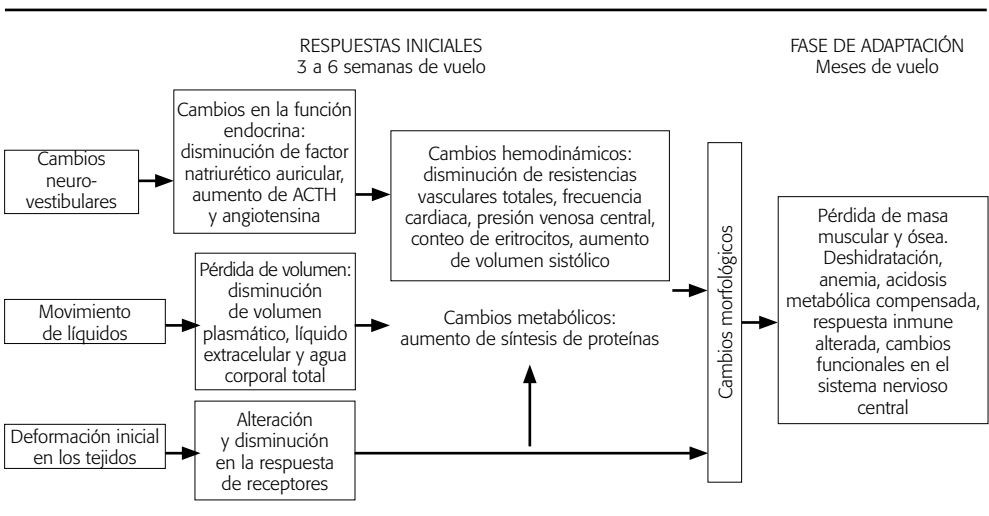
Las primeras muertes durante los vuelos espaciales ocurrieron en 1971, durante la misión Soyuz 11, debido a la descompresión rápida de la cápsula durante la reentrada. Muchos problemas médicos se pueden presentar en cualquier momento de la misión y la gravedad depende de muchos factores, tanto técnicos como humanos.

Los eventos médicos incluyen trauma menor, quemaduras, alteraciones musculoesqueléticas, dermatológicas, respiratorias, cefalea, movimientos anormales, insomnio, etcétera.<sup>3</sup>

Los datos epidemiológicos extrapolados de submarinos de la Marina de Estados Unidos, sugieren un evento médico de impacto en la misión cada 6 meses, por cada siete astronautas. Estudios similares han pronosticado un evento de cirugía mayor cada 9 años y de apendicitis hasta cada 35 años<sup>4,5</sup> (Figura 22.2).

## Síndrome de adaptación al espacio

La incidencia de este síndrome es de hasta 70 %. La exposición a la microgravedad desencadena una serie de respuestas corporales que involucran la piel, musculares, articulares, visuales y vertibulococleares. En la adaptación a un ambiente diferente, los astronautas experimentan anomalías en el movimiento, coordinación, agudeza visual e inclusive pueden tener alucinaciones de movimiento (enfermedad del movimiento del espacio). Estas alteraciones relacionadas con el movimiento incluyen síntomas de malestar general, anorexia, náusea, vómito e inclusive vértigo, síntomas que pueden durar hasta 72 horas después de iniciado el vuelo. El control far-



**Figura 22.2.** Principales alteraciones en la fisiología corporal bajo microgravedad.<sup>6</sup>

macológico generalmente se realiza de manera efectiva con medicamentos antivertiginosos como la prometazina.<sup>3</sup>

## Disbarismo o síndrome de descompresión en el espacio

Desde los primeros informes después de que Alexi Leonov realizó la primera actividad extravehicular (EVA) en 1965, se ha reconocido como uno de los ambientes más dañinos. Los astronautas que realizan actividad extravehicular están expuestos a niveles considerablemente altos de radiación, alteraciones en la termorregulación, atrofia muscular acelerada con altas cargas de trabajo y descompresión. La carga de trabajo física es intensa, aun en microgravedad, tan sólo los trajes de exploración extravehicular pesan más de 100 kg y son difíciles de maniobrar. Para reducir el trabajo requerido para mover en el traje, es necesario la presurización interna en sólo 30 % de la presión a nivel del mar, esta diferencia grande de presiones aumenta el riesgo de presentar enfermedad por descompresión, el cual puede ser desde manifestaciones leves o tipo I, o manifestaciones graves como alteraciones cardiovasculares o neurológicas, tipo II; en estas condiciones la ultrasonografía es útil en detectar las burbujas en el torrente sanguíneo.<sup>7,8</sup>

## Cambios fisiológicos y sus manifestaciones clínicas

**Sistema cardiovascular.** Bajo diferentes estados de aceleración, posición y condiciones de gravedad, el líquido intravascular ejerce diferentes presiones hidrostáticas sobre las paredes de los vasos sanguíneos, que desencadenan respuestas específicas para mantener la homeostasis en el cuerpo. Al entrar en el ambiente sin gravedad, la ausencia de fuerzas hidrostáticas provoca un desplazamiento cefálico del líquido intravascular de las extremidades inferiores al tronco y las extremidades superiores, aproximadamente de 2 litros.

Este cambio de distribución de flujo sanguíneo ocasiona de manera secundaria un desplazamiento de líquido del compartimiento extravascular al compartimiento intravascular en las extremidades inferiores, y del intravascular al extravascular en las extremidades superiores, cabeza y tórax. Lo que hace que los viajeros espaciales experimenten una sensación de plenitud en la cabeza, congestión nasal y de la mucosa oral, edema facial y de la esclerótica y disminución de la circunferencia de las extremidades inferiores, lo que los astronautas se refieren como “patas de pollo”. Estos síntomas disminuyen con el tiempo, pero pueden permanecer presente en todo el curso de la misión.

Durante los primeros días del vuelo espacial existe una pérdida de peso de aproximadamente 2.5 kg, ésta por lo general es consecuencia de la diuresis secundaria, así como por la estimulación de los barorreceptores cardiacos y el aumento de la presión venosa central.

Datos recientes han demostrado disminución del gasto cardiaco, volumen sistólico y diastólico del ventrículo izquierdo cuanto más días pasan durante la misión. La electrocardiografía ha mostrado extrasístoles ventriculares aisladas y contracción auricular prematura. Los estudios durante las misiones en transbordadores espaciales mostraron que estos fenómenos se presentan hasta en un 30 % de los astronautas. Asimismo, se han observado alteraciones del intervalo QT e inclusive episodios de taquicardia ventricular.<sup>9-11</sup>

Las eventos cardiovasculares urgentes son imprevistos, transitorios, benignos y generalmente están relacionados con una alta descarga parasimpática. Uno de los factores de riesgo

importantes es la intoxicación por hidrocarburos halogenados que se inhalan del ambiente, lo que podría sensibilizar el miocardio. En la actualidad las cápsulas espaciales y las naves, como la Estación Internacional cuenta ya con un desfibrilador automático externo. A pesar de esto la atención de un paciente crítico en condiciones cardiovasculares graves no sería viable por el tiempo en el retraso de su traslado.

**Sistema hematopoyético.** Después de las etapas iniciales de descompensación y el cambio rápido de líquidos, existe una elevación por concentración de la hemoglobina, esta rápida concentración de la Hb inhibe la producción de eritropoyetina, el efecto global de este cambio es la disminución de la concentración de eritrocitos. Esta “anemia de los vuelos espaciales” no condiciona funcionalmente alteraciones significativas durante los vuelos espaciales, pero sí es funcionalmente significativa y contribuye a la intolerancia ortostática cuando se regresa a un ambiente de G1 durante los primeros días o semanas después del retorno a la Tierra (G es igual a la fuerza gravitacional de la Tierra al nivel del mar,  $9.81 \text{ m/s}^2$ ). No obstante, en ambientes de microgravedad una reserva disminuida en el contenido de eritrocitos y volumen plasmático podría poner en peligro la respuesta fisiológica ante la pérdida sanguínea o un estado de choque hipovolémico.

**Sistema inmunológico.** La radiación es probablemente la principal causa de la supresión inmune observada en el espacio. Las anomalías específicas en la inmunidad celular incluyen alteraciones en la formación de leucocitos, síntesis de citocinas y disminución de la actividad de las células asesinas naturales (NK). Estos fenómenos aumentan la reactivación de infecciones virales. Las modificaciones del ciclo celular explican la mayoría de los cambios que se observan en los linfocitos circulantes. En modelos de microgravedad los cultivos de médula ósea no muestran proliferación después de 4 a 6 días, en contraste con los sometidos a gravedad normal, quizá consecuencia de la progresión más lenta entre las fases G0/G1.<sup>12</sup> Otros factores que afectan la regulación del sistema inmune incluyen la hipocinesia, por la microgravedad, alteraciones del sueño, aislamiento, así como la exposición a gases contaminantes en el aire. También estos factores influyen directamente en alteraciones funcionales y de crecimiento de linfocitos, secreción de citocinas y actividad de células asesinas naturales. Estas alteraciones contribuyen a la reactivación de infecciones virales.<sup>13-15</sup>

El riesgo de infecciones en los viajes espaciales se ha logrado reducir con la implementación de periodos de cuarentena antes de los vuelos. La mayoría de los microorganismos que se encuentran en el ambiente de las naves espaciales son originados de la descamación de la piel. Estos microorganismos incluyen *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Klebsiella*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Aspergillus*, *Mycoplasma*, *Candida* y *Penicillium*. La mayoría de las infecciones son leves, originadas principalmente en la piel y por gingivitis. Durante la misión del Apolo 13, dos astronautas reportaron infección de vías urinarias, recibieron tratamiento con tetraciclina, no obstante son fracaso terapéutico y cultivo posterior en el que se desarrolló *Pseudomonas aeruginosa*.<sup>16,17</sup>

**Sistema renal.** Existen alteraciones en la secreción de hormona antidiurética, noradrenalina, actividad de la renina y aldosterona, así como en la excreción de sodio y agua. Si bien hay controversia en relación al sodio y otros electrolitos, en condiciones de microgravedad hay un fuerte acuerdo en que el volumen de líquido extracelular y de plasma disminuyen. Estudios en etapas tempranas de los vuelos espaciales han mostrado aumento significativo en la concentración urinaria de sodio, potasio y cloro. Datos de vuelos espaciales han mostrado en etapas tempranas una disminución de 59% de factor natriurético auricular y una disminución de 1% de sodio sanguíneo, así como un incremento hasta de 9% del potasio sanguíneo. El remodelado óseo genera un balance negativo de calcio y esta calciuria aumenta la formación de cálculos renales.<sup>18-22</sup>

**Sistema respiratorio.** Varios estudios han mostrado diferencias de la función respiratoria bajo diferentes estados de gravedad, especialmente en la perfusión. En lo particular bajo estados de microgravedad la perfusión se muestra más homogénea, lo que traduce una mejoría en el intercambio y la difusión a través de la membrana alveolocapilar. Los mismos hallazgos se han reportado en la distribución del gas alveolar.<sup>23-25</sup>

**Sistema osteomuscular.** Los vuelos espaciales facilitan la pérdida de masa ósea, especialmente en los huesos que soportan peso, lo que genera osteoporosis, alrededor de 1 a 2 % de pérdida por mes de densidad mineral ósea. Durante los vuelos cortos la excreción de calcio aumenta hasta balances negativos, en vuelos mayores de 14 días la calciuria aumenta conforme aumenta el tiempo de las misiones. Hay reportes de reducción de hasta 10 % en el tamaño y densidad de las vértebras lumbares.<sup>26</sup>

Las pruebas mostraron que la capacidad de trabajo muscular, la fuerza, el tono y la resistencia disminuyeron significativamente durante vuelo espacial. La disminución de la masa corporal magra se ha asociado con una disminución en el pico de fuerza y poder de trabajo. Las contracciones máximas del flexor plantar disminuyen desde un 20 y hasta 40 % en los seres humanos después de 6 meses en el espacio.<sup>27, 28</sup>

**Sistema neuroendocrino.** Entre 40 y 70 % de los viajeros espaciales presentaron alteraciones neurovestibulares, como ilusiones, sensaciones posturales de rotación, volteo, nistagmo, mareos, vértigo, asociados con palidez, sudoración, náusea y vómito; síntomas que aparecen al inicio del vuelo pero que desaparecen después de 7 días. Las alteraciones hormonales están directamente relacionadas con el estrés cardiovascular como respuesta a la microgravedad. Los vuelos espaciales de más de dos semanas incrementan los niveles de cortisol, de hormona adrenocorticotropa y disminuyen los de insulina. Después del vuelo espacial los niveles de hormona del crecimiento, angiotensina, aldosterona y hormona estimulante de tiroides están elevadas.<sup>29</sup>

## Soporte vital básico y atención del trauma en microgravedad

La reanimación cardiopulmonar ha salvado miles de vidas desde que fue descrita en 1960 por Peter Safar. No obstante, las condiciones tan hostiles como el espacio, debe tenerse consideraciones especiales. Se han desarrollado métodos especiales para adaptarse a las condiciones de la capsula y los recursos disponible, pero sobre todo adaptados al problema de la microgravedad.

Hay tres métodos de reanimación cardiopulmonar que se han evaluado principalmente en vuelos parabólicos: la técnica de parado de manos, el abrazo de oso invertido y el método de Russomano, con o sin dispositivos de apoyo automático. Los estudios han encontrado que los métodos de parado de manos y de Russomano eran capaces de alcanzar la frecuencia y profundidad de compresiones torácicas, de acuerdo con los lineamientos internacionales, mientras que la técnica del abrazo de oso podía mantener una tasa de compresiones suficiente en frecuencia pero no en profundidad. (Ver el Capítulo 19 *Reanimación cardiopulmonar en microgravedad*). Estas técnicas siguen siendo evaluadas en diferentes estudios, con un solo rescatador e inclusive asociada con equipos de compresión automática, así como se realizan modificaciones para que sea más práctico el uso con una sola persona/rescatador en espacios pequeños, como lo son las cápsulas espaciales.<sup>30-33</sup>

Consideraciones especiales deben tenerse presente cuando se debe dar apoyo a la vía aérea. No se han reportado casos en los que se necesitara la intubación orotraqueal, la mayoría de los



casos de afectación de la vía respiratoria han sido por aspiración, neumonitis química e inhalación de humo o gases; casos que se han tratado sin requerimientos avanzados de la vía respiratoria. No obstante, con la planeación de misiones cada vez más prolongadas y la programación de viajes interplanetarios, el uso de dispositivos para tratamiento en el trauma, falla respiratoria o la práctica de procedimientos quirúrgicos complejos, hace que el entrenamiento del equipo médico y de todos los integrantes de la misión sea indispensable. Considerando que bajo microgravedad aplicar RCP es más complejo, se han realizado comparaciones simulando ésta en ambientes bajo sumersión de agua, mostrando que existe un riesgo mayor de falla con la inserción de algún dispositivo para control de la vía aérea. En vuelos parabólicos, se ha demostrado que se reduce este riesgo cuando se aplican técnicas de sujeción de cabeza, como el atrapamiento entre las rodillas. En la actualidad se hacen estudios de simulación en ambientes similares de viaje a Marte, en los que se ha demostrado que personal no médico, con entrenamiento mínimo, y siguiendo protocolos rígidos, pueden tener éxito en la atención de un paciente, principalmente en los casos de atención para anestesia.<sup>34,35</sup>

Consideraciones similares deben tenerse en la selección del equipo biomédico, instrumental, insumos que deben seleccionarse, éstos deben reunir características que permitan un óptimo funcionamiento en condiciones de aislamiento en un ambiente potencialmente dañino. Estos requerimientos mínimos son evaluados dependiendo de lo prolongado de las misiones. Uno de los objetivos a futuro es, sin duda, el entrenamiento médico indispensable a todos los tripulantes de la nave<sup>36</sup> (Cuadro 22.1).

Uno de los retos para la atención médica es el uso de imágenes diagnósticas, en este contexto las imágenes por rayos X no son útiles, en parte debido al montaje especial para su funcionamiento y por la interferencia con la radiación. Es probable que esto se solucione con las técnicas de ultrasonografía, que en la actualidad pueden realizarse con equipos más compactos y *software* más avanzado; una de las grandes ventajas es que ésta no es afectada por la radiación, no obstante la microgravedad puede afectar una diversidad de signos ultrasonográficos, como lo son los dependientes de los niveles de aire o líquidos y su baja penetración en hueso.<sup>37</sup>

Las lesiones traumáticas son uno de los más grandes riesgos de la exploración. A pesar de que hasta el momento no se han necesitado realizar procedimientos quirúrgicos en el espacio, es factible que deban considerarse salas quirúrgicas equipadas, al programar vuelos espaciales interplanetarios. Los transbordadores espaciales y la Estación Espacial Internacional sólo están

## Cuadro 22.1.

### Fármacos más comúnmente usados en los vuelos espaciales

Fármacos			
Antibióticos	Antihistamínicos	Antiinflamatorios	Narcóticos/otros
Ampicilina	Atropina	Paracetamol	Diazepam
Eritromicina	Dexametasona	Lidocaína	Meperidina
Cefalexina	Difenhidramina		Morfina
Penicilina	Epinefrina		Nitroglicerina
Tetraciclina	Hidroxicina		
	Prometazina		
	Proclorperazina		

equipados para realizar procedimientos quirúrgicos menores. La experiencia de la atención de lesiones traumáticas graves se centra en tratamientos sintomáticos como los protocolos de tratamiento en los submarinos de la Marina de Estados Unidos, que llegan a tener éxito hasta de 75 % de los casos. Los experimentos en animales, bajo microgravedad, han mostrado que los procedimientos basados en protocolos como ATLS (*Advance Trauma Life Support*) son factibles de realizar. Hasta el momento el uso de cristaloides como solución salina es factible en la reanimación del choque hipovolémico.<sup>38,39</sup>

## Conclusiones

La ambición del hombre por llegar a fronteras espaciales cada vez más lejanas implica un desarrollo tecnológico integral, en el cual se intenta resolver los grandes problemas de la atención médica, no sólo con la prevención y el estado óptimo de los exploradores antes de iniciar el vuelo, sino que también el ajuste de las técnicas, protocolos, recursos biomédicos, farmacológicos y técnicos existentes que en la Tierra se han probado como efectivos en salvar vidas. Procesos que son complicados por la limitada experiencia y la dificultad técnica que implica destinar recursos, espacio en las naves exploradoras y el desconocimiento del comportamiento de las enfermedades graves en el ambiente de la microgravedad. Sin duda estos problemas son tratados por científicos expertos y exploradores con la experiencia de viajes espaciales, de ahí que los estudios en condiciones similares, como las montadas para el viaje a Marte, darán luz a conocimiento nuevo e importante en el soporte médico de los vuelos espaciales interplanetarios.

## Referencias

1. Grigoriev AI, Orlov OI. Commentary: telemedicine and spaceflight. *Aviat Space Environ Med.* 2002;73:688-93.
2. White RJ, Averner M. Human in space. *Nature.* 2001;409:1115-18.
3. Stewart LH, Trunkey D, Rebagliati GS. Emergency medicine in space. *The Journal of Emergency Medicine.* 2007;32:45-54.
4. Tansley WA, Wilson JM, Schaefer KE. Analysis of health data from 10 years of *Polaris* submarine patrols. *Undersea Biomed Res Submar Suppl.* 1979;S217-46.
5. Harnett BM, Doam CR, Russell KM, et al. Wireless telemetry and Internet technologies for medical management: a Martian analogy. *Aviat Space Environ Med.* 2001;72:1125-31.
6. Graebe A, Schuck LE, Putcha LPL, Derendorf H. Physiological, pharmacokinetic, and pharmacodynamic changes in space. *J Clin Pharmacol.* 2004;44:837-53.
7. Kumar KV, Waligora JM, Powell MR. Epidemiology of decompression sickness under simulated space extravehicular activities. *Aviat Space Environ Med.* 1993;64:1032-9.
8. Cowell SA, Stocks JM, Evans DJ, et al. Review article: the exercise and environmental physiology of extravehicular activity. *Aviat Space Environ Med.* 2002;73:54-67.
9. Martin DS, South DA, Wood ML, et al. Comparison of echocardiographic changes after short- and long-duration spaceflight. *Aviat Space Environ Med.* 2002;73:532-6.

10. D'Annunzio DS, Dougherty AH, DeBlock HF, et al. Effect of shortand long-duration spaceflight on QTc intervals in healthy astronauts. *Am J Cardiol.* 2003;91:494–7.
11. Fritsch-Yelle JM, Leuenberger UA, D'Annunzio DS, et al. An episode of ventricular tachycardia during long-duration spaceflight. *Am J Cardiol.* 1998;81:1391–2.
12. Plett PA, Frankovitz SM, Abonour R, Orschell-Traycoff CM. Proliferation of human hematopoietic bone marrow cells in simulated microgravity. *In Vitro Cell Dev Biol Anim.* 2001;37:73–8.
13. Tipton CM, Greenleaf JE, Jackson CGR. Neuroendocrine and immune system responses with spaceflights. *Med Sci Sports Exerc.* 1996;28:988–98.
14. Talor GR, Konstantinova IV, Sonnenfeld G, et al. Changes in the immune system during and after spaceflight. *Adv Space Biol Med.* 1997;6:1–32.
15. Sonnenfeld G. Extreme environments and the immune system: effects of spaceflight on immune responses. *J Allergy Clin Immunol.* 2001;107:19–20.
16. Mims CA. *The pathogenesis of infectious disease*, 3rd ed. New York: Academic Press; 1987:8–47.
17. Taylor GR, Graves RC, Brockett RM, et al. Skylab environmental and crew microbiology studies. En: Johnston RS, Dietlein LF (ed). *Biomedical results from Skylab.* NASA SP-377. Washington, DC: NASA; 1977:53–63.
18. Leach CS, Johnson PC, Cintron NM: The endocrine system in space flight. *Acta Astronaut.* 1988;17(2):161–6.
19. Norsk P, Christensen NJ, Bie P, Gabrielsen A, Heer M, Drummer C. Unexpected renal responses in space. *Lancet.* 2000;356:1577–78.
20. Norsk P, Drummer C, Røcker L, Strollo F, Christensen NJ, Warberg J, et al. Renal and endocrine responses in humans to isotonic saline infusion during microgravity. *J Appl Physiol.* 1995;78(6):2253–59.
21. Christensen NJ, Drummer C, Norsk P. Renal and sympathoadrenal responses in space. *Am J Kidney Dis.* 2001;38(3):679–83.
22. Leach CS, Alfrey CP, Suki WN, Leonard JI, Rambaut PC, Inners LD, et al. Regulation of body fluid compartments during short-term spaceflight. *J Appl Physiol.* 1996;81(1):105–16.
23. Verbandt Y, Wantier M, Prisk GK, Paiva M. Ventilation-perfusion matching in long-term microgravity. *J Appl Physiol.* 2000;89(6):2407–12.
24. Prisk GK, Guy HJ, Elliott AR, West JB. Inhomogeneity of pulmonary perfusion during sustained microgravity on SLS-1. *J Appl Physiol.* 1994;76(4):1730–38.
25. Prisk GK, Guy HJ, Elliott AR, Deutschman RAD, West JB. Pulmonary diffusing capacity, capillary blood volume, and cardiac output during sustained microgravity. *J Appl Physiol.* 1993;75(1):15–26.
26. Grigoriev AI, Bugrov SA, Bogomolov VV, Egorov AD, Kozlovskaya IB, Pestov ID, et al. Preliminary medical results of the MIR year-long mission. *Acta Astronaut.* 1991;23:1–8.
27. Fitts RH, Riley DR, Widrick JJ. Functional and structural adaptations of skeletal muscle to microgravity. *J Exp Biol.* 2001;204(Pt.18):3201–08.
28. Leonard JI, Leach CS, Rambaut PC. Quantitation of tissue loss during prolonged space flight. *Am J Clin Nutr.* 1983;38(5):667–79.
29. Macho L, Kvetnansky R, Fickova M, Popova IA, Grigoriev A. Effects of exposure to space flight on endocrine regulations in experimental animals. *Endocr Regul.* 2001;35(2):101–14.
30. Rehnberg L, Russomano T, Falcao F, Campos F, Evetts SN. Evaluation of a novel basic life support method in simulated microgravity. *Aviat Space Environ Med.* 2011;82:104–10.
31. Dalmarco G, Calder A, Falcao F, Azevedo DFG, Sarker S, et al. Evaluation of external cardiac massage performance during hypogravity simulation. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2006;1:2904–7.
32. Evetts SN, Evetts LM, Russomano T, Castro JC, Ernsting J. Basic life support in microgravity: evaluation of a novel method during parabolic flight. *Aviat Space Environ Med.* 2005;76:506–10.
33. Jay GD, Lee PHU, Goldsmith H, Battat J, Maurer J, Suner S. CPR effectiveness in microgravity: comparison of three positions and a mechanical device. *Aviat Space Environ Med.* 2003;74:1183–9.
34. Komorowski M, Fleming S. Intubation after sequence induction performed by non-medical personnel during space exploration missions: a simulation pilot study in Mars analogue environment. *Extrem Physiol Med.* 2015;4:19. DOI 10.1186/s13728-015-0038-5
35. Keller C, Brimacombe J, Giampalmo M, et al. Airway management during spaceflight: a comparison of four airway devices in simulated microgravity. *Anesthesiology.* 2000;92:1237–41.
36. Putcha L, Cintron NM. Pharmacokinetic consequences of space flights. *Ann N Y Acad Sci.* 1991;618:615–8.
37. Houtchens BA. Medical care systems for long-duration space missions. *Clin Chem.* 1993;39:13–21.
38. Campbell MR, Billica RD, Johnston SL III, et al. Technical note: performance of advanced trauma life support procedures in microgravity. *Aviat Space Environ Med.* 2002;73:907–12.
39. Kirkpatrick AW, Dulchavsky SA, Boulanger BR, et al. Extraterrestrial resuscitation of hemorrhagic shock: fluids. *J Trauma.* 2001;50:162–8.

# 23. Anestesia y manejo de la vía aérea en microgravedad

Jorge Arturo Nava López, Anahy Lilian Beltrán Rodríguez, Laura Silva Blas, Eduardo Garrido Aguirre, Irma Guadalupe García Colmenero

## ■ Introducción

Han pasado más de 5 decenios desde que Yuri Alexéyevich Gagarin incursionó en la exploración del espacio y desde entonces uno de los objetivos primordiales de las misiones espaciales y de la vida en ambientes de cero gravedad ha sido el estudio y la preservación de la salud.

Los enfermos en la Tierra son descritos como personas que viven en un ambiente normal con una fisiología anormal, en cambio los astronautas son personas con fisiología normal en un ambiente anormal que ocasiona diversas alteraciones.

¿Qué ocurre con los astronautas sometidos a viajes espaciales? ¿Qué sucede con la anatomía, la fisiología y la psicología en ambientes de gravedad cero? ¿Es fácil la adaptación? ¿Qué efectos adversos existen? La respuesta a estos cuestionamientos los estudia y resuelve la medicina espacial, la cual es la rama de la medicina que se encarga de estudiar todo lo relacionado con la salud en ambientes de microgravedad, pero además, estudia cómo mejorar la salud terrestre a partir de la tecnología y el conocimiento generado en el espacio.

Una de las áreas en desarrollo de la medicina espacial es la anestesiología. Un viaje de la Tierra a Marte tomaría tres años, con un retraso en la transmisión del audio entre 8 y 40 minutos. Aunque la radiación, la pérdida de la densidad mineral ósea y los cambios de comportamiento han sido identificados como las tres principales alteraciones de los astronautas, las lesiones traumáticas representan un tema prioritario por sus efectos sobre la salud. La NASA (National Aeronautics and Space Administration) ha predicho que una emergencia médica requerirá para su evacuación 68 persona/mes, es decir, 10 200 horas trabajo-hombre por mes y conforme se incrementa el turismo espacial, este número será mayor.<sup>1</sup>

Existen diversos escenarios clínicos durante las misiones espaciales que requieren o requerirán la administración de sedación o anestesia. En 1998, la misión Neurolab STS-90 fue la primera en proporcionar anestesia en un modelo animal durante el espacio. Hasta la fecha no se han realizado aún procedimientos anestésicos fuera del planeta Tierra en humanos. Después de la misión Bion 11 en 1997, dos monos Rhesus fueron sometidos a anestesia para biopsias de músculo y hueso poco después de su regreso a tierra. Ambos monos tuvieron reacciones adversas a la anestesia y uno de ellos murió después de un paro cardíaco. Estos eventos han incentivado el estudio de la anestesia en escenarios de la gravedad cero.<sup>2</sup>

El realizar cirugías y procedimientos anestésicos durante las misiones de exploración es un reto enorme, dado que la capacidad tecnológica con la que se cuenta aún es limitada. Algunas técnicas quirúrgicas ya se empiezan a estudiar en vuelos simulados de gravedad cero, sin embargo, la investigación en anestesia es limitada.

A continuación se revisan algunos cambios fisiológicos que se presentan con los vuelos espaciales y que tienen una gran relevancia para el manejo anestésico, del cual hablamos posteriormente.

## Cambios fisiológicos en gravedad cero

La vida y el cuerpo humano se han desarrollado a todo lo largo de la evolución en presencia de la fuerza de gravedad, de modo que cuando se pierde esta influencia física ocurren cambios drásticos en la homeostasis corporal, algunos suceden de manera inmediata y otros se instalan paulatinamente con el paso del tiempo.

La microgravedad o gravedad cero se define como la ausencia de la fuerza de gravedad, es decir, los objetos no tienen peso, pero conservan su masa. Cuando el cuerpo humano se somete a la ausencia de gravedad, sufre diversos cambios en su fisiología que pueden perdurar hasta varias semanas después del regreso a la Tierra y que dificultan el manejo anestésico (Cuadro 23.1).

### Cuadro 23.1.

Línea de tiempo de aclimatación fisiológica y experimentada por los astronautas desde el lanzamiento hasta después del retorno a la Tierra

Efectos fisiológicos	Lanzamiento	Duración del vuelo			
		24 h	48 h	2 sem	> 1 m
Redistribución de líquidos	Redistribución del líquido al torso y a la cabeza. Disminuye 10% de volumen en las extremidades inferiores	Disminución del volumen plasmático en un 17%	Disminución gradual en la secreción de la eritropoyetina, llevando a una reducción de 10% del volumen sanguíneo total		
Efectos neurovestibulares	Mareo espacial				
Cambios musculares		Disminución gradual de la masa muscular en un 20%		Disminución gradual de la masa muscular en un 30%	
		Disminución gradual de la fuerza muscular (observada hasta en un 50%)			
Desmineralización ósea		Incremento en la pérdida de calcio 60-70% (urinario, fecal). Reduce la producción de hormona paratiroidea y vitamina D			
		Pérdida gradual de la densidad ósea (1-2% por mes)			
Efectos psicosociales	Fatiga, dificultad para dormir, aislamiento, efectos emocionales, estrés familiar del astronauta, etc.				
Desregulación inmunitaria		Posible reactivación del virus latente del herpes y deterioro de la inmunidad celular			

**Aparato respiratorio.** En las estaciones espaciales existe una atmósfera controlada compuesta en un 80 % por nitrógeno y 20 % por oxígeno (emulando la composición de los gases en la atmósfera terrestre) a una presión de una atmósfera, o lo que es lo mismo, la presión a nivel del mar.

El CO<sub>2</sub> es activamente removido por filtros de hidróxido de litio y el vapor de agua se mantiene entre 6 y 14 torr. Existe un incremento en la capacidad de difusión de la membrana alveolocapilar y un aumento del flujo capilar pulmonar para mejorar el intercambio gaseoso durante los primeros días de vuelo, retornando a valores basales una semana posterior al vuelo.

La capacidad residual funcional disminuye aproximadamente 300 mL, debido a la excurción cefálica que experimenta el diafragma. Durante los primeros días, la capacidad espiratoria forzada disminuye debido probablemente al aumento de flujo sanguíneo intratorácico que dificulta la expansión alveolar, lo cual se revierte al paso de dos semanas observándose un incremento de la capacidad vital.

Si la estancia espacial o el vuelo simulado se prolongará, se presenta una disminución del flujo espiratorio pico y de la capacidad vital forzada en el primer segundo, probablemente por la pérdida de acondicionamiento de los músculos de la ventilación.

<i>Periodo después del vuelo</i>			
<b>Aterrizaje</b>	<b>24 a 48 h</b>	<b>1 a 2 meses</b>	<b>1 año</b>
Hipotensión ortostática por retorno de líquido desde las piernas	Retorno a la distribución normal de líquidos		
Mareo espacial			
Dolor y rigidez muscular		Recuperación completa de la masa y fuerza muscular	
			Restauración completa o casi completa de la densidad ósea
	ambiente multicultural de la tripulación		
	Numerosos cambios celulares que conducen a alteraciones de la inmunidad	Mejora gradual de la inmunidad (días o semanas)	

**Aparato osteomuscular.** Durante el vuelo espacial, los astronautas presentan atrofia muscular por la pérdida de fuerza y masa debido a la ausencia de carga gravitatoria, afectando predominantemente a los músculos encargados de la postura.

Se ha visto que los astronautas tienen una ganancia de estatura de hasta 6 a 8 cm debido a que la falta de compresión axial permite la relajación de la columna con elongación de los músculos, ligamentos y nervios, todo lo cual es causa frecuente de dolor toracolumbar.

Posterior a un vuelo espacial de dos semanas, la masa muscular se reduce un 20% y en misiones de 3 a 6 meses. La pérdida puede ser mayor a 30%. Esto también se encuentra relacionado al cambio de la alimentación y a las situaciones de constante estrés.

La síntesis de proteínas en las fibras musculares se reduce y se incrementa su degradación. Se pierde un mayor número de fibras musculares tipo II que tipo I. Se han realizado al aterrizaje biopsias de músculo en las cuales se observan cambios fenotípicos de las fibras musculares tipo I al tipo II, ocasionando que los músculos se contraigan más rápido y se fatiguen más.

Después de 4 meses en el espacio, la masa muscular y la fuerza parecen alcanzar un nuevo estado de equilibrio, aunque la excreción aumentada de nitrógeno urinario persiste. El ejercicio durante el vuelo espacial es útil pero no previene la pérdida muscular. En la mayoría de los casos, la masa muscular y la fuerza se recuperan después de 1 a 2 meses en la Tierra.

Los astronautas presentan disminución de la fuerza muscular probablemente por una alteración de la composición y distribución de los receptores nicotínicos en la placa neuromuscular, es decir, el receptor tiene un cambio conformacional de la subunidad épsilon por la gamma, lo que lo convierte en inmaduro y hace que se exprese de manera extrasináptica. Este cambio conformacional ocasiona que el receptor nicotínico inmaduro permanezca abierto dos a diez veces más de lo normal y responda a la administración de agonistas con dosis 100 veces menores a las habituales.

**Desmineralización ósea.** La microgravedad induce una pérdida de la densidad ósea, secundario a la ausencia de luz y a la disminución de la producción de vitamina D<sub>3</sub>.

La desmineralización ósea comienza de forma inmediata a la llegada del espacio. Durante los primeros días de la misión espacial ya se puede advertir elevación de 60 a 70% del calcio urinario y fecal, los marcadores de resorción ósea aumentan en orina y se reducen los niveles sanguíneos de hormona paratiroidea y la producción de vitamina D. La pérdida ósea es de aproximadamente 1 a 2% al mes, principalmente en huesos que soportan peso como vértebras lumbares, pelvis, cuello femoral, trocánter, tibia y calcáneo; posterior a 6 meses en la estación espacial la pérdida ósea es de 8 a 12%. Los astronautas tienen un alto riesgo de desarrollar osteoporosis a edad temprana y formación de cálculos renales por la elevada excreción de calcio.<sup>3-5</sup>

**Sistema cardiovascular.** La posición supina prelanzamiento con las extremidades inferiores por encima del plano coronal toracoabdominal ocasiona una redistribución cefálica de líquido intravascular como consecuencia de la pérdida de gravedad.

Durante los vuelos espaciales, el volumen de las extremidades inferiores disminuye en un 10% (1 a 2 litros de líquido del espacio vascular). Todo ello condiciona un aumento de la presión y el volumen de llenado de las cavidades cardíacas, hasta en un 20% y del volumen latido con una disminución paradójica de la presión venosa central (PVC) de 8.4 a 2.5 cm H<sub>2</sub>O en los primeros minutos de microgravedad. El desplazamiento cefálico de los líquidos distiende los barorreceptores de la vasculatura central, lo que desencadena la supresión del sistema renina-angiotensina-aldosterona y la liberación del péptido natriurético auricular (PNA) que conduce a un aumento de la excreción renal de sodio y agua, y del tono vascular periférico.<sup>1</sup>

La distensión auricular desencadena la liberación de PNA, el cual genera vasodilatación y aumento de la permeabilidad vascular, lo que asociado al aumento de la presión transmural

cardiaca facilita la formación de edema, con contracción del volumen IV por fuga de ésta hacia el intersticio.

El control autonómico de la frecuencia cardiaca y la presión arterial se alteran poco durante el vuelo, sin embargo, es común que los astronautas presenten taquicardia con disminución de la presión arterial diastólica en un 25 %, lo cual retorna a la normalidad una semana después del regreso a la Tierra. Por lo anterior, es de vital importancia emplear fármacos que eviten el colapso cardiovascular.

La capacidad aeróbica puede mantenerse o mejorarse en el espacio, pero se reduce posterior al vuelo debido a una disminución del volumen de eyección y del gasto cardiaco en respuesta al cambio ortostático y de adaptación a la gravedad cero.

La administración de líquidos implica un reto desde el empaque y administración por la ausencia de gravedad. Realizar una reanimación hídrica guiado por objetivos en este escenario tal vez no sea posible, debido a todos los cambios en el volumen intravascular que ya se comentaron, por lo que habrá que desarrollar nuevas técnicas de monitoreo hídrico en escenarios de gravedad cero.

**Sistema renal.** En un ambiente de microgravedad se presenta una redistribución cefálica de los líquidos, con aumento del volumen intratorácico y del llenado auricular derecho. Esto ocasiona en las primeras horas una disminución de los niveles de renina que no tiene repercusión clínica significativa (este mecanismo aún no se encuentra bien definido). En las siguientes 24 a 48 horas se puede observar una disminución del filtrado glomerular y de la excreción urinaria de sodio y agua debido a una elevación de la concentración de renina, aldosterona y vasopresina, circunstancia que mantiene el astronauta hasta su retorno a la Tierra.

**Sistema hematológico.** En las primeras 24 horas de los vuelos espaciales, se produce una disminución de 17 % del volumen plasmático lo que se traduce transitoriamente en un nivel elevado de hematocrito. Al mismo tiempo esto causa una disminución en la síntesis de eritropoyetina ocasionando una reducción en la masa eritrocitaria. El efecto neto es una disminución global de aproximadamente 10 % en el volumen sanguíneo total.

**Sistema inmune.** La activación de los linfocitos se ve disminuida significativamente. Posterior al aterrizaje existe una distribución alterada de los leucocitos circulantes, producción anormal de citocinas, disminución de la activación de las células T, niveles anormales de inmunoglobulinas, inmunidad alterada a virus específicos como virus Epstein-Barr, expresión genética alterada, deterioro inmunológico neuroendocrino, entre otros. Por lo que un aumento en los niveles de glucocorticoides y catecolaminas durante el vuelo espacial puede mediar cambios en el sistema inmune.

**Síndrome de adaptación al espacio.** La mayoría de los astronautas experimentan síntomas de adaptación neurovestibular durante los primeros dos días después de su llegada al espacio. De la misma manera hay un periodo de readaptación a su retorno a tierra donde se pueden presentar principalmente mareo, palidez, sudoración fría, dolor de estómago, sensación de plenitud, cefalea, letargo y en algunos casos náusea y vómito. Se ha pensado que uno de los factores que podría desencadenarlo es la disminución de la motilidad gastrointestinal. La mitad de los astronautas lo refieren como un malestar extraño y temporal durante las primeras horas de gravedad cero.<sup>3,6</sup>

La redistribución cefálica de líquidos corporales en la microgravedad puede producir hipertensión intracraneal benigna transitoria y edema cerebral, sin embargo, este síndrome adaptativo es de corta duración con una rápida mejoría durante los primeros 2 a 3 días de la misión (Cuadro 23.2).



## Cuadro 23.2.

Las contramedidas para reducir al mínimo los riesgos para los astronautas antes, durante y después d

Efectos fisiológicos durante el vuelo	Antes del vuelo
<b>Cambios en los líquidos corporales (efectos cardiovasculares)</b> Larga y corta duración	Ninguno
<b>Mareo espacial (efectos neurovestibulares)</b> Larga y corta duración	Acondicionamiento vestibular (realidad virtual, vuelos parabólicos o acrobáticos). Medicamentos antieméticos
<b>Desmineralización ósea</b> Larga y corta duración	3 densitometrías por año
Larga duración	2 densitometrías, 6 meses después del vuelo
<b>Efectos psicosociales</b> Larga y corta duración	Criterios específicos para el reclutamiento y competencias conductuales específicas para la asignación de misiones. Formación didáctica, incluyendo trabajo en equipo en contextos multiculturales, y la formación sobre liderazgo y habilidades de los seguidores
Larga duración	
<b>Desregulación inmunitaria</b> Larga y corta duración	Programa de cuarentena Restricción de contacto con el público en general por una semana antes del vuelo

## Manejo anestésico en escenarios de microgravedad

Cuando la duración de las misiones más allá de la órbita terrestre es prolongada, se incrementa el riesgo de sufrir lesiones traumáticas y otros padecimientos que requieran sedación o anestesia. A partir de datos publicados en el reporte Mars-Tech-Care de la Agencia Espacial Europea, se conoce que el riesgo de ocurrencia de un evento que requiera anestesia es de 2.56% durante una misión a Marte de 950 días de duración y con una tripulación de seis ocupantes.<sup>7</sup>

## e los vuelos espaciales

<b>Durante el vuelo</b>	<b>Después del vuelo</b>
<p>Ejercicio Trajes de presión negativa para la parte inferior del cuerpo (que inducen una distribución mecánica de líquidos corporales equivalente a la Tierra, mientras se está en el espacio). En caso de reentrada: líquido isotónico vía oral, uso de un traje antigravedad a presión para minimizar la carga de líquidos en las piernas, uso de prenda de refrigeración líquida, líquido de refrigeración, posición de decúbito para los astronautas en misiones de larga duración</p>	<p>Se está tomando en cuenta el uso de midodrina (para contrarrestar la intolerancia ortostática después del vuelo)</p>
<p>Medicamentos antieméticos (prometazina, escopolamina), generalmente se administra con dextroanfetamina para contrarrestar el efecto sedante</p>	<p>Administración de antiemético intravenoso y líquidos para el síndrome de adaptación severo</p>
<p>Ejercicios de resistencia Suplementos con calcio y vitaminas D y K Otras medidas en consideración: bifosfonatos, citrato de potasio, hormona paratiroidea, vibraciones de baja y alta frecuencia.</p>	<p>4 densitometrías a los 3 años. Restricción temporal de algunas actividades (p. ej., pilotear aviones de alto rendimiento)</p>
<p>Horario de trabajo individualizado y vigilado por el equipo de apoyo con 8 horas de descanso al día. Hipnóticos de corta acción (para prevenir la pérdida de sueño y el déficit de sueño acumulativo) y modafinil (para mejorar el rendimiento después de cortos periodos de sueño.</p>	<p>Sesiones psicológicas</p>
<p>Exposición diaria a la gravedad artificial y se está considerando suplementación nutricional con nucleótidos</p>	<p>Toma de muestras para evaluar la función inmunitaria</p>

La NASA ha desarrollado un programa de investigación para disminuir y mitigar los potenciales riesgos sobre la salud de los viajeros espaciales, cuyo principal objetivo es ofrecer la tecnología e información más actual para la exploración humana segura en el espacio. Ante esto se creó el ExMC (*Exploration Medical Capability*) cuyos expertos desarrollaron un listado de 84 condiciones médicas que pueden presentarse en el espacio y de las cuales seleccionaron 17 como las que requieren de anestesia y/o cuidados intensivos (Cuadro 23.3).<sup>7</sup>

### Cuadro 23.3.

Condiciones médicas de la medicina espacial que pueden requerir técnicas anestésicas, ejemplos de procedimientos quirúrgicos y protocolo anestésico sugerido

Condición	Ejemplo de procedimiento quirúrgico	Anestesia sugerida
Lesión abdominal	Esplenectomía, resección intestinal	AG IET
Lesión en espalda, fractura de columna lumbar, lesión de cuello	Reducción de la fractura, halo de tracción cefálica, osteosíntesis	AG IET
Quemaduras	Parches, fasciotomía	AG VE
Celulitis	Incisión y drenaje	AG VE
Lesión de tórax/neumotórax	Toracotomía para hemostasia	AG IET
Síndrome compartamental	Laparotomía descompresiva	AG IET
Luxación de codo	Reducción	AG VE
Sangrado gastrointestinal	Hemostasia, cierre de la úlcera, resección intestinal	AG IET
Lesión craneal	Descompresión por trepano	AG IET
Hemorroides	Resección	AG VE
Fractura de miembros inferiores/cadera	Reducción, osteosíntesis, fijación externa	AG VE
Infección intraabdominal (diverticulitis, apendicitis, otras)	Resección intestinal, apendicectomía	AG IET
Nefrolitiasis	Nefrostomía percutánea, cistoscopia	AG VE
Luxación de hombro	Reducción	AG VE
Laceración de la piel	Sutura, parches	AG VE
Fractura de extremidad superior	Reducción, osteosíntesis	AG VE

AG EIT, anestesia general con intubación endotraqueal; AG VE, anestesia general con ventilación espontánea.

## Anestesia general vs. anestesia regional

La mayoría de la evidencia sugiere que la anestesia regional (AR) es más factible que la anestesia general (AG) en el espacio.<sup>2,8</sup> En tierra los estudios comparativos entre AR y AG no tienen preferencia por alguna técnica, sin embargo, en el espacio se espera que las ventajas superen a las potenciales desventajas de la AR y se pueda implementar preferentemente sobre la AG pese a los retos que esto implica.<sup>7,9</sup>

Se sabe que la curva de aprendizaje para bloqueos sencillos como el bloqueo femoral requiere de un mínimo de 20 procedimientos, mientras que para realizar bloqueos de plexo braquial con ultrasonografía se requiere experiencia previa con neuroestimulador y un mínimo de 15 procedimientos guiados. Existen procedimientos para los cuales la AR no es una alternativa, éstos incluyen a la cirugía profunda y de trauma que involucra al tórax, el abdomen, la cabeza

y el cuello. Otro peligro potencial de la AR es la toxicidad por anestésicos locales. Una de las principales razones por las que la AR es la técnica anestésica de primera elección en el espacio es poder prescindir de la intubación endotraqueal.

La anestesia general tiene más retos que vencer en el espacio en comparación con la AR, debido a los diferentes obstáculos a vencer entre los que destacan: la elección del inductor ideal al escenario clínico, la manipulación de la vía aérea con las dificultades propias del procedimiento, el uso de ventilación mecánica y el mantenimiento de la hipnosis mediante vapores anestésicos inhalados, entre otros. Por otro lado, la anestesia general ofrece la posibilidad de realizar 100 % de procedimientos en las diversas partes del cuerpo, es más rápida de administrar, proporciona protección fisiológica frente a diferentes estados de choque, disminuye el consumo de oxígeno y el metabolismo cerebral, ocasiona menos estrés y puede preservar la estabilidad hemodinámica con el uso de los anestésicos apropiados. Por último, se prefiere a la anestesia total intravenosa por encima de la inhalada para los procedimientos quirúrgicos realizados en condiciones de gravedad cero, debido a las complicaciones asociadas con la inhalación de vapores anestésicos, como la falta de interfaz aire-gas que se requiere para administrarla y la inevitable contaminación de la nave. Para la administración de anestesia total endovenosa se prefiere el uso de perfusiones controladas por objetivos (TCI) mediante bombas de asa cerrada, debido a su mejor predictibilidad y facilidad de uso.<sup>10</sup>

## Ketamina, el inductor espacial

El inductor ideal para la hipnosis en los escenarios de cero gravedad parece ser la ketamina de acuerdo con el doctor Komorowski.<sup>7</sup> Sus principales ventajas parecen ser:<sup>7,11-13</sup>

- tiene efecto hipnótico, analgésico y amnésico
- puede administrarse por diversas rutas: intravenosa, intramuscular, intraósea, intranasal e intrarectal
- larga vida de almacenamiento: hasta 20 años en forma de polvo o cristal
- segura debido a su alto índice terapéutico de 16 en comparación a tiopental que es de 7 y propofol de 5
- el equipo para su uso es mínimo, aun en la ausencia de oxígeno
- inicio rápido de acción después de la administración intravenosa: 60 segundos
- estimuladora del sistema nervioso simpático y cardiovascular
- favorece la venoconstricción y la dilatación arterial, por lo que tiene buena tolerancia en los pacientes hipovolémicos
- no ocasiona depresión del centro respiratorio
- los reflejos de protección de la vía respiratoria permanecen intactos en la mayoría de los pacientes, sin embargo, puede favorecer la presencia de náusea o vómito posoperatorio
- tiene efectos cerebrales protectores al mantener el flujo sanguíneo cerebral y disminuir el consumo cerebral de oxígeno
- es antihiperalgésica, antiinflamatoria y broncodilatadora
- no inhibe la vasoconstricción pulmonar hipóxica y disminuye los requerimientos de oxígeno suplementario
- no tiene riesgo de hipertermia maligna
- pertenece a los medicamentos básicos listados por la Organización Mundial de la Salud

Se sabe que cuando se asocia con alguna benzodiazepina como premedicación, la incidencia de efectos psicomiméticos desciende de 8 a 0%. La ketamina en pacientes con ventilación espontánea incrementa la presión intracraneana, lo cual se encuentra atribuido principalmente a que induce hipercapnia.<sup>12</sup>

Finalmente la ketamina no tiene contraindicaciones absolutas. Las contraindicaciones relativas incluyen enfermedades psiquiátricas, estenosis mitral o aórtica, hipertiroidismo no tratado, estados hipertensivos, epilepsia, enfermedad isquémica coronaria; en ausencia de catecolaminas circulantes tiene efecto inotrópico negativo y puede precipitar el colapso circulatorio y la depresión miocárdica en pacientes críticamente enfermos. Puede usarse en cirugía oftálmica aun a pesar de elevar la presión intraocular, siempre y cuando se utilice junto con benzodiazepinas, bloqueadores neuromusculares y ventilación mecánica.<sup>13</sup>

## **Bloqueadores neuromusculares en cero gravedad**

Como ya se mencionó, los astronautas cursan con debilidad muscular, sarcopenia y desmineralización ósea, además de un cambio conformacional de los receptores nicotínicos que ocasiona un comportamiento poco predecible de los bloqueadores neuromusculares, los cuales pueden además agravar la miopatía, favorecer la disfunción respiratoria y prolongar los días de ventilación mecánica. Afortunadamente en la actualidad se cuenta con sugammadex, que es una ciclodextrina que se une a moléculas de rocuronio y vecuronio revirtiendo en pocos minutos totalmente el efecto de estos bloqueadores neuromusculares.

El doctor Komorowski propone el uso de bloqueadores neuromusculares a pesar de los riesgos inherentes a su uso, debido a que favorecen el éxito de la intubación y son importantes para lograr un buen campo quirúrgico y acortar los tiempos de cirugía, además de ser necesarios en cirugía laparoscópica, torácica o abdominal. El rocuronio es el bloqueador recomendado por utilizarse en esquemas de intubación de secuencia rápida, por su corta acción y su fácil antagonismo con sugammadex.<sup>7</sup>

## **Manejo de la vía aérea en escenarios de microgravedad**

El abordaje de la vía aérea en tierra siempre tiene sus retos y peculiaridades. La falla en este procedimiento tiene consecuencias catastróficas e incluso la muerte. En el espacio o en vuelos simulados, el abordaje de la vía aérea ha reportado casos de fracaso en la intubación orotraqueal mediante laringoscopia directa (fracaso de hasta 85% en libre flotación), debido a que la fuerza ejercida durante la maniobra hace que la cabeza y el cuello puedan moverse fuera del campo de visión. La fuerza aproximada ejercida por los anesthesiólogos durante la laringoscopia directa es de 40 N y ésta puede ser ejercida durante 10 a 20 segundos. Por lo anterior, el uso de dispositivos supraglóticos tipo mascarilla laríngea han mejorado el número de intentos para asegurar la vía aérea, sin embargo, es necesario tener precaución con el uso de dispositivos supraglóticos ya que los astronautas pueden tener retraso del vaciamiento gástrico e íleo, lo que favorece el riesgo de aspiración pulmonar de contenido gástrico.<sup>1,14,15</sup>

Groemer<sup>15</sup> estudió el éxito de la realización de la laringoscopia en pacientes con libre flotación pero con la cabeza sostenida entre las rodillas del médico, en comparación con la sujeción

torácica del paciente, esto bajo un modelo de vuelo parabólico en un Airbus 300 que permitió 23 segundos de flotación. No observó diferencias en el éxito de ventilación del paciente o en el tiempo de inserción del tubo. Más de 90 % de la fallas para insertar el tubo traqueal se debió a la falta de tiempo (lograr la intubación dentro de los 23 segundos de vuelo parabólico). La tasa de éxito se incrementó a 92 % cuando el maniquí fue sujetado a una superficie mediante correas.

Otro factor que dificulta el abordaje de la vía aérea en el espacio es la migración del líquido intravascular en dirección cefálica, lo que favorece el edema facial, la congestión de la vía aérea y eleva la tasa de fallas en la intubación traqueobronquial. Es necesario continuar investigando y evaluando los retos y las complicaciones de la intubación endotraqueal en humanos sometidos a microgravedad.

## Conclusiones

Aunque la implementación de la anestesia en ambientes de microgravedad aún se encuentra en fase experimental, su contribución en la salud espacial y en el éxito de las misiones futuras, hace de su desarrollo y estudio un tema prioritario para la medicina espacial.

Aún falta comprender muchos de los cambios fisiológicos y cómo se pueden controlar en un procedimiento anestésico en gravedad cero, sin embargo, la formulación de fármacos más predecibles y la creación de tecnología innovadora, indudablemente permitirá en un futuro no muy lejano, realizar procedimientos anestésicos en microgravedad. La anestesia regional y la anestesia total endovenosa tienen en este escenario un campo lleno de posibilidades para explorar sus máximos beneficios.

# Referencias

1. Van der Walt J, Ernst AH. The anaesthetic management of microgravity-exposed individuals. *South Afr J Anaesth Analg.* 2013;19(5):243–7.
2. Agnew JW, Fibuch EE, Hubbard JD. Anesthesia during and after exposure to microgravity. *Aviat Space Environ Med.* 2004;75(7):571–80.
3. Williams D, Kuipers A, Mukai C, Thirsk R. Acclimation during space flight: effects on human physiology. *Canadian Medical Association Journal.* 2009;180(13):1317–23.
4. Kamiya A, Iwase S, Michikamia D, Fua Q, Mano T. Muscle sympathetic nerve activity during handgrip and post-handgrip muscle ischemia after exposure to simulated microgravity in humans. *Neuroscience Letters.* 2000;280(1):49–52.
5. Shackelford LC. Musculoskeletal response to space flight. En: Barratt MR, Pool SL (ed). *Principles of clinical medicine for space flight.* New York, NY: Springer New York; 2008: p. 293–306.
6. Young LR. Vestibular reactions to spaceflight: human factors issues. *Aviat Space Environ Med.* 2000;71(9 suppl):A100–4.
7. Komorowski M, Watkins SD, Lebuffe G, Clark JB. Potential anesthesia protocols for space exploration missions. *Aviat Space Environ Med.* 2013;84(3):226–33.
8. Barratt MR, Pool SL. *Principles of clinical medicine for space flight.* New York, NY: New York: Springer; 2008.
9. Liu SS, Strodbeck WM, Richman JM, Wu CL. A comparison of regional versus general anesthesia for ambulatory anesthesia: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Anesth Analg.* 2005;101(6):1634–42.
10. Albert RW, Drews FA, Syroid ND, Westenskow DR, Strayer DL, JA A. Evaluation of a graphical anesthesia drug display for space travel. 2013;1–7.
11. Smith CE. *Trauma anesthesia.* Cambridge University Press; 2008.
12. Himmelseher S, Durieux ME. Revising a dogma: ketamine for patients with neurological injury? *Anesth Analg.* 2005;101(2):524–34– table of contents.
13. Giannou C, Baldan M. *War surgery - Working with limited resources in armed conflict and other situations of violence - Volume 1.* Ginebra, Suiza: International Committee of the Red Cross; 2009.
14. Keller C, Brimacombe J, A FR, Giampalmo M, Kleinsasser A, Loekinger A, et al. Airway management during spaceflight: A comparison of four airway devices in simulated microgravity. *Anesthesiology.* 2000;92(5):1237–41.
15. Groemer GE, Brimacombe J, Haas T, De Negueruela C, Soucek A, Thomsen M, et al. The feasibility of laryngoscope-guided tracheal intubation in microgravity during parabolic flight: A comparison of two techniques. *Anesth Analg.* 2005;101(5):1533–35.

# 24. Perfil psicológico de los astronautas y adaptación al confinamiento en el Espacio

José Valente Aguilar Zinser, Fatima del Rosario Guzmán Pinedo, Rafael Akira Namba Bando, Gabriel Heredia Bretón

## ■ Historia de la psicología en los programas espaciales

El concepto de psicología aeronáutica ha evolucionado a través del tiempo; nace en el decenio de los treinta con el inicio de la aviación civil, con posteriores contribuciones del programa militar en el marco de la primera y segunda Guerra Mundial, principalmente por el interés multidisciplinario de psicólogos, médicos y personal involucrado en aviación, para analizar los aspectos cognitivos y del comportamiento en los pilotos secundario a la altura, velocidades de los vuelos y el medio ambiente al que están sujetos. Emerge de la necesidad de entender la interacción entre el humano y la aviación.

Durante los años cuarenta y cincuenta, los avances obtenidos en las investigaciones psicológicas espaciales se veían truncadas por decisiones políticas para dar prioridad al avance de los programas espaciales.

A finales de los años cincuenta e inicio del decenio de los sesentas, para la selección de los primeros astronautas sólo se contemplaban como candidatos a: pilotos militares, menores de 40 años, con conocimientos en ciencias e ingeniería, más de 1 500 horas de vuelo y graduados de la escuela de pilotos; esta selección tenía fundamento en el conocimiento y experiencia previa del medio, en donde los pilotos militares destacan. Los participantes que se tuvieron considerados tenían una alta tolerancia al estrés, adecuada toma de decisión, madurez emocional y capacidad de trabajar con otros.<sup>3</sup>

Estos programas tenían como objetivo evaluar el desempeño estructural de la aeronave, el desempeño del astronauta, determinar la confianza en los sistemas automatizados y las posibles mejoras en los sistemas de vuelo existentes, principalmente.<sup>3</sup>

La valoración psicológica era considerada como parte extraordinaria del programa,<sup>14</sup> y la decisión final para aceptar o rechazar a un candidato se establecía con información obtenida de valoraciones psiquiátricas y/o físicas.<sup>17,18</sup> Esta indiferencia por los aspectos psicológicos, durante la selección de astronautas, se motivaba en intereses nacionales, estableciendo como objetivo el de completar las misiones espaciales de forma exitosa.

Antes de 1980, los estudios psicológicos sobre los vuelos espaciales eran considerados innecesarios y su parte en la selección de astronautas mínima. Pero a partir de este decenio se abre la puerta a los estudios de los factores humanos: considerando los aspectos psicológicos, psicosociales, ergonómicos, entre otros; en donde se empezaba a estudiar la relación de sucesos o eventos fortuitos con el desempeño personal, social y del comportamiento del astronauta, particularmente en misiones de larga duración.<sup>3</sup>



Ante la necesidad de desarrollar, estudiar y mejorar la tecnología en el espacio, se favoreció la inclusión de astronautas especialistas y del sexo femenino.<sup>9</sup> Con la mejora de las condiciones medioambientales, se facilitó el aumento en la duración de tiempo de las misiones, a la par se observó la presencia de las siguientes cuestiones:<sup>2</sup> el aislamiento, el confinamiento, las fricciones interpersonales, juicio pobre, beligerancia, irritabilidad con las autoridades terrestres y violaciones disciplinarias.<sup>3</sup>

Con ello se establece la necesidad de contar con estudios psicológicos específicos debido al avance en la duración de las misiones de los programas espaciales. Estos estudios en los astronautas, durante las misiones espaciales, han sido analizados por el Instituto de Problemas Biomédicos de la Academia de Ciencias Rusa y originó la creación de la Fundación Nacional de Ciencia y Psicología, como parte del programa de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

A inicios de los años noventa Patricia Santy, primera cirujana de vuelo y psiquiatra, escribe sobre los test psicológicos, eran de menor importancia en la selección de los astronautas, lo único que importaba era su rendimiento. A partir de esta década se fortalece el desarrollo de la ergonomía y su influencia en la psicología del individuo. También se expanden los estudios sobre los efectos de la vibración, la ingravidez y la actividad extravehicular,<sup>1</sup> alteración de los ritmos circadianos, así como los trastornos del sueño.<sup>19,20</sup>

A partir del año 2000, se ha considerado que la valoración psicológica y psicosocial tiene la misma importancia que los factores de seguridad y salud, para el éxito de una misión;<sup>14</sup> algunos programas espaciales durante el análisis e investigación de misiones de larga duración, consideran que los aspectos importantes de estudio son los siguientes:<sup>21</sup>

- la adaptación al confinamiento y aislamiento
- la convivencia interpersonal en una misión de largo plazo
- la actividad extravehicular
- las cargas de trabajo

En la actualidad, estudios sobre la adaptación psicológica y psicosocial, se están realizando en ambientes extremos (misiones en la Antártica y mar profundo), como sustitutos del espacio exterior, los cuales se usan para poder estimar y predecir una respuesta física y psicológica de los astronautas al ambiente, por tener similitudes, como la alta dependencia en la tecnología, el aislamiento y confinamiento físico y social, el alto riesgo inherente, las demandas psicológica, fisiológica y cognitiva, interacciones críticas múltiples (humano-humano, computadora-humano y humano-ambiente)<sup>3</sup> y las necesidades mínimas críticas para la comunicación, cooperación y coordinación del equipo de trabajo.<sup>3</sup>

## Selección de personal astronauta

### Aspirantes a astronauta

Se consideran como requisitos de ingreso generales, mínimos e indispensables para ser seleccionado en un programa espacial:<sup>4,5,8,10</sup>

1. Inteligencia y habilidad por arriba del promedio<sup>2,3</sup>
2. Graduado de Universidad con orientación y conocimientos predominantemente en ciencias e ingeniería
3. Adecuado razonamiento<sup>4,5</sup> (manejo y toma de decisiones en situaciones adversas)
4. Concentración y memoria adecuada (capacidad de enfoque laboral)
5. Aptitud para orientación espacial y destreza manual
6. Alto sentido de responsabilidad (conciencia de la importancia del trabajo)
7. Condición física excelente (no padecer enfermedades que puedan poner en riesgo la misión)
8. Capacidad de adaptación y socializar elevados (extroversión)
9. Trabajo en equipo (confiabilidad e interacción laboral)
10. Estabilidad emocional y psicológica (establecido de acuerdo con las necesidades del proyecto y misión)
11. Alto nivel de tolerancia ante el estrés (físico o emocional) y la frustración
12. Conocimiento de procedimientos de operación de aeronaves y misiles
13. Manejo del aislamiento familiar por periodos extensos

## Perfil psicológico del aspirante

En el perfil psicológico específico, algunos programas parten de un sola frase: “contar con lo necesario”,<sup>10</sup> que contempla aspirantes con los siguientes atributos:<sup>14</sup>

- que reflejen independencia y capacidad de conseguir objetivos estratégicos
- adecuadas relaciones interpersonales e inteligencia emocional
- lidiar adecuadamente con tareas complejas y buscar la excelencia en las tareas
- orientados a trabajar de forma dura y adecuada (confidencia, competencia, experiencia)
- que no reflejen arrogancia, hostilidad o incapacidad de convivencia interpersonal
- tener conciencia del riesgo laboral (responsabilidad para evitar accidentes)

No deben poseer :

- altos niveles de competitividad, querer siempre ganar o tener la razón
- arrogancia, hostilidad, problemas interpersonales<sup>6,7</sup>
- impaciencia e irritabilidad
- agresividad (verbal o física)
- individualismo, en el contexto de incapacidad de trabajar en equipo, desobedecer órdenes o no tomar decisiones adecuadas

*Criterios de exclusión.* Dentro de los criterios psicológicos y psiquiátricos de exclusión se pueden considerar:

- neurosis
- alteraciones de la personalidad

- fobias, por su efecto deshabilitante
- abuso de sustancias ilícitas o estupefacientes
- consumo de medicamentos psicotrópicos
- condiciones psiquiátricas que puedan ser de riesgo o peligro para la seguridad del vuelo o la misión (psicosis, trastornos afectivos bipolares, depresión, alteraciones mentales secundarias a otra condición médica).

Dependiendo del programa espacial las pruebas psicológicas durante la selección pueden variar en la intensidad del estrés físico y mental, abarcando una valoración psicológica, que consiste en distintas fases: entrevistas (buscan valorar el grado de estabilidad y congruencia que el candidato presenta, su finalidad, es detectar psicopatologías generales);<sup>3</sup> valoración de características de personalidad; análisis psiquiátrico, que consiste en valoraciones prácticas que simulan las dificultades de vivir en el espacio, con la finalidad de definir las características individuales de acuerdo con las necesidades del puesto de trabajo y el estado mental ante la toma de decisiones.<sup>8, 9, 28</sup>

Antes de 1980 se realizaban aproximadamente 15 exámenes psicológicos<sup>7</sup> para la selección de astronautas, en donde se valoraba entre otras cosas, el coeficiente intelectual, el razonamiento matemático y el test de conocimientos en ingeniería. Actualmente los exámenes de inteligencia consideran la capacidad de abstracción, capacidad verbal, alteraciones del pensamiento, coordinación psicomotriz, inteligencia general (coeficiente intelectual) y los resultados se adecuan según la edad, estudios de personalidad, percepción y cambios personales e interpersonales, respuesta ante diversas circunstancias.

Debido a esto, el proceso de selección puede llevar años; la necesidad de predecir y establecer patrones de conducta del astronauta, considerando que la estabilidad y funcionamiento psicológico son factores importantes para el éxito de una misión.

Se debe recordar que los estudios psicológicos que se le realizan a los astronautas son multimodales porque abarcan reportes y entrevistas, cuestionarios, autoanálisis, observación, experimentación del comportamiento y las medidas bioquímicas, enfocado a una psicología compatible.

De manera habitual y constante se tendría que estar haciendo valoración psicológica para ver el estado mental de la persona una vez seleccionada.

## Astronautas

Los astronautas se pueden clasificar en dos tipos de categorías: los astronautas y astronautas de tripulación (no astronautas).<sup>9</sup>

1. Astronautas: piloto y especialista
2. Astronautas de tripulación o no astronautas: especialistas y observadores

Aquellos que cumplan con los requisitos científicos de su área, procederán al examen médico y psiquiátrico en donde los criterios se centran en: experiencia y pericia, motivación, compañerismo, habilidad de comunicación y adaptabilidad.

Los requerimientos psicológicos son los mismos para todos los aplicantes inicialmente, pero en la división de funciones y responsabilidades se podrán solicitar otras pruebas complementarias.

- El piloto tiene la responsabilidad de controlar y operar el vehículo. Los especialistas se encargan de la coordinación de las operaciones de la misión, los experimentos y en general todo el trabajo científico y técnico
- La tripulación considerada no astronauta: el especialista está entrenado para manejar y controlar sólo un tipo de aparato o función; y el observador es seleccionado por cuestiones meramente políticas

## Soporte psicológico a astronautas

Los aspectos psicológicos no pueden ser solamente valorados durante el ingreso de un astronauta a un programa espacial, tienen que ser valorados constantemente dependiendo de la situación laboral en la que se encuentren:<sup>1,3,14</sup> prevuelo, durante el vuelo, y posvuelo.

### Prevuelo

El aspecto social que envuelve al astronauta, considerando a todas aquellas personas como los amigos y familiares, proveen un soporte psicológico a los astronautas antes, durante y después del vuelo.

El soporte psicológico que se puede ofrecer a los astronautas previo a las misiones se considera vital para prepararlos. Es necesario ofrecer información y apoyo en áreas de autocuidado, administración y manejo de conflictos, valores culturales y entrenamiento de campo. Dentro del soporte psicológico también es conveniente que se les ofrezca información y explicaciones a las familias con la finalidad de evitar conflictos y brindar apoyo al astronauta. Es importante considerar que la situación ambiental-familiar previa a cualquier misión podría evitar conflictos personales e interpersonales durante la misión.

También se tiene que analizar el tiempo de la misión, por la lejanía del círculo familiar y cómo puede afectar el comportamiento y percepción del astronauta.

Se tiene que entrenar al astronauta en estrategias para contrarrestar el aislamiento y el confinamiento tanto a nivel personal como interpersonal. El análisis en esta fase puede ayudar a predecir el comportamiento del astronauta durante la misión, identificando el estado psicológico previo a cualquier misión.

Al analizar durante la selección de un astronauta dividiremos su capacidad de función de acuerdo con:

- el individuo (capacidad de funcionar bajo estrés y adaptarse al mismo)
- el grupo de trabajo (interacción social y su relación)
- la organización (administración, cultura y comportamiento)

### Durante el vuelo

El soporte se concentra en videoconferencias con familiares o compañeros para dar soporte psicológico: paquetes de cuidado (CCP) que contienen suplementos enviados por familia y amigos; soporte fisiológico sobre *hardware* y *software*, eventos sorpresa (llamadas de celebridades), videos con personal del área de la salud.

Los astronautas durante el vuelo cuentan con acceso a correo y teléfono para comunicarse a la Tierra.

Previo al regreso, se tienen que realizar conferencia con los astronautas sobre el estrés y alegría de volver a la Tierra.

La esposa o familiares pueden solicitar apoyo y ofrecer retroalimentación sobre el soporte psicológico durante la misión.

Es importante contar con medidas para evaluar al astronauta tales como, monitorear el comportamiento de cada individuo, poder intervenir de forma directa o por medio del personal sanitario para facilitar el contacto, diagnóstico y tratamiento adecuado dependiendo de las circunstancias.

## Posterior al vuelo

Se tienen que realizar varias juntas con la finalidad de beneficiar al astronauta y mantener el soporte psicológico de la persona, con la finalidad de evitar depresión, problemas sociales y maritales, e intervenir de forma oportuna. Se tiene que considerar que las modificaciones fisiológicas y la duración de la misión espacial tienen repercusiones diferentes en cada astronauta y que el soporte es vital para evitar complicaciones psicosociales graves.

## Preparación para el espacio

En estudios realizados en bases ubicadas en la Antártica<sup>3</sup> se han encontrado situaciones que se presentan meses después del inicio de la misión, como distracción mental y física, déficit de atención, disminución de la capacidad de alerta, presión laboral, relaciones interpersonales, trabajo en equipo, liderazgo inadecuado y otros problemas encontrados por el aislamiento y el confinamiento por problemas psicológicos de adaptación al ambiente, los cuales tienen un impacto negativo en la esfera psicosocial de los individuos.<sup>3</sup>

Dentro de los estudios considerados como los más adecuados son los de tipo submarinos<sup>3</sup> porque presentan similitudes con los viajes en el espacio, como la necesidad de presurización, considerando que en ambas situaciones es vital para la vida; la dependencia de una fuente de energía para poder mantener el hábitat activo; la dependencia de contar con medios para contener y mantener el oxígeno y la capacidad de adaptación del personal ante el aislamiento y el confinamiento, para poder realizar de la forma más óptima los objetivos.

En relación con las dificultades que ambas situaciones presentan desde el aspecto fisiológico y psicológico mencionamos la importancia de contar con instrumentos y procedimientos validados para la selección psicofísica de reclutas; la necesidad de adaptación a una atmósfera diferente y la capacidad del grupo e individuo para identificar motivadores, estresores y el manejo más adecuado para el desarrollo de estrategias para su manejo y adecuación.

Se ha observado que en submarinos y estaciones polares o submarinas, la estancia de larga duración sin soportes psicológicos adecuados provoca<sup>16</sup> irritabilidad, enojo, hostilidad, problemas interpersonales, ansiedad, alteraciones del sueño, disminución de actividad, fatiga, disfunción total del personal y del equipo de trabajo, depresión, ansiedad, apatía; es importante mencionar que dependiendo del tiempo de la misión, estos factores se pueden presentar o empeorarse.

En su contraparte también existen características para la adaptación al aislamiento, confinamiento y ambientes extremos:<sup>3</sup>

- el ciclo sueño-vigilia y la segmentación psicológica
- el ambiente, secundario a que no siempre se cuenta con herramientas para poder asimilar el ambiente

- aspectos sociales (salud del comportamiento), porque las características y estructura de un grupo tienen un impacto directo sobre cada individuo
- el componente salutogénico
- los factores humanos
- la adaptación psicológica (dentro de esta adaptación hay que tener en cuenta dos factores de cada persona: la percepción del confinamiento y la percepción de espacio)

El uso de ambientes similares provee de valores para el desarrollo individual, de grupo y su adaptación a ambientes extremos, en donde las situaciones tienen un componente de peligro real que permiten el análisis objetivo del comportamiento y el desempeño de astronautas. Éstos favorecen la mejora en la selección del personal según las necesidades individuales y grupales; el entrenamiento, ya que mejora la salud del equipo preparando las herramientas para mejorar la dinámica de grupo, así como la adaptación al ambiente; y el control y soporte, para prevenir y tratar de forma adecuada los eventos psicológicos que pudieran presentarse durante la operación.

Es importante señalar que la percepción de confinamiento y el espacio se ven ligados de forma directa con el volumen de espacio habitable, su distribución de acuerdo con las necesidades y tareas, y el tiempo de permanencia en dicho lugar. El espacio también se afecta por la densidad poblacional.

## Psicología espacial

El aumento en la duración de las misiones espaciales y la mejora en la ergonomía y tecnología espacial, exponen complicaciones que si bien, antes no se consideraban como fundamentales, actualmente han tomado gran importancia porque exponen otros riesgos, no sólo para la misión sino para toda la tripulación. Dentro de los retos que hoy se enfrentan son la psicología y todo el ambiente que la rodea, tanto desde la preparación, el desarrollo de un astronauta y hasta su estado psicológico posterior a los viajes.

## Ambiente y fisiología espacial

El ambiente espacial (temperatura, ingravidez, radiación, presión, aceleración, microgravedad, vibración, ruido, luz, etc.) presenta en los astronautas factores de estrés, a nivel fisiológico, biomédico y ambiental.<sup>1,24,25,29</sup>

**Ausencia de atmósfera.** La combinación de temperatura, presión y composición de la atmósfera terrestre, necesarias para la vida, disminuye conforme exista mayor distancia con la Tierra, provocando una presión atmosférica menor, a tal grado que aun con mascarillas presurizadas a una altura mayor a 13 000 metros, el oxígeno es insuficiente para poder vivir. Conforme se va aumentando la altura o distancia, los líquidos corporales empiezan a evaporarse por un efecto llamado “ebullismo”, hasta llegar a la exosfera en donde las moléculas de aire tienen una densidad de 1 a 20 mol/cm<sup>3</sup>.

**Ingravidez.** Los astronautas presentan alteraciones secundarias a la falta de gravedad en el espacio, por esta razón se busca generar microgravedad. Ésta afecta la habitabilidad, debido a la falta de adaptación del ser humano ante tales circunstancias.

Los tres problemas fundamentales que se deben a la ingravidez son los siguientes:

- a) cinetosis, provocando mareos
- b) redistribución de los líquidos, puede provocar alteraciones cardíacas o digestivas
- c) disminución de la actividad física y esfuerzo físico, provoca desmineralización ósea

**Radiación.** Los astronautas están más expuestos a la radiación porque se encuentran fuera de la protección del campo magnético terrestre, potenciando el riesgo de absorber dosis mayores por rayos gamma, con el potencial daño o muerte celular ante exposiciones agudas hasta el desarrollo de cáncer, maldesarrollo resultante del daño a las células reproductivas (riesgo genético fetal) o enfermedades degenerativas que contemplan enfermedades digestivas, cardíacas, neurológicas o visuales secundarias a una larga exposición.

**Temperatura.** La protección solar ofrecida por la atmósfera terrestre provee de una temperatura estable en la superficie y la regula en el ciclo día-noche. Pero a mayor distancia de la superficie, esta regulación disminuye. La ausencia de protección provoca que la exposición a los rayos solares aumente la temperatura a tal grado que pueda provocar lesiones o daño al equipo o material. Por otro lado, esta ausencia provoca que el calor se disipe rápidamente a tal punto que aquellos puntos sin sol normalmente se encuentran a temperatura de congelamiento. Estas variaciones han forzado a la necesidad de crear sistemas de control ambiental para mantener la estabilidad térmica.

A nivel fisiológico se presentan enfermedades espaciales, como la desmineralización, alteración de los líquidos, desacondicionamiento cardíaco, muscular, esquelético, inmunológico, nervioso, problemas vestibulares, alteraciones del sueño, alteraciones visuales, etc., las cuales se mencionan a continuación.

**Neurológico y sensorial.** La ingravidez afecta la percepción de ubicación, orientación y equilibrio de una persona, resultando en una desorientación, mareo, depresión, anorexia, vómito. Esto puede incapacitar tripulantes durante largos periodos, lo cual repercute en las obligaciones de la tripulación sana. Genera estrés, angustia, depresión y ansiedad por la enfermedad, dificulta el trabajo de equipo y la toma de decisiones que está influenciado por la relación interpersonal y por la frustración y enojo que se puede suscitar.

**Musculoesquelético.** La modificación de la capacidad propioceptiva (la interpretación que se da a los estímulos externos, en particular dada por la relación de la gravedad terrestre con los músculos y huesos) genera una desadaptación inicialmente manifiesta por disminución de la masa muscular y de la densidad ósea, que puede ser imperceptible, pero con consecuencias posvuelo de gran importancia porque se requiere una readaptación forzosa para el regreso a las condiciones normales de gravedad, con el fin de evitar lesiones o fracturas, un ejemplo de esto es cuando bajan del transbordador espacial, bajan corriendo, y se ponen en posición de abrir sus piernas para aumentar su base de sustentación y no caerse, debido a que se pierde temporalmente la propiocepción del equilibrio y desmineralización ósea. La probabilidad de que se presente una complicación puede provocar que el astronauta se tenga que enfrentar ante la angustia, estrés y ansiedad durante el regreso y en caso de presentarse se enfrentaría a una posible depresión, suicidio, abuso de sustancias y alcohol.

**Alteraciones visuales.** En el ambiente espacial o gravedad cero son las siguientes:<sup>26</sup>

- hipoxia
- descompresión
- vibración

- exposición a aceleraciones y desaceleraciones
- exposición a gravedad cero
- todos estos factores afectan produciendo disminución de la visión y visión borrosa según sea el agente estresor

**Sistema inmunológico.** Existe una disminución de la respuesta inmunológica debido a la ingravidez, por eso en las primeras misiones se les aislaba a su regreso en una cuarentena preventiva para que no fueran presa de una infección. Ejemplo de esto es la razón por la que sacaron al astronauta Ken Mantingly de la tripulación del Apollo XIII, esto fue debido a que él había tenido contacto con un familiar con sarampión, porque existía la probabilidad de contagiar a sus compañeros de misión, Jim Lovel y Fred Hayes.

**Apaparato cardiovascular.** Los efectos observados en la estancia prolongada en el espacio son:

- a) disminución del volumen sanguíneo
- b) disminución de la masa eritrocitaria<sup>26</sup>

En un estado de microgravedad, la disminución de resistencias provoca cardiomegalia por el flujo sanguíneo, conforme se va adaptando el corazón, se hipertrofia, provocando alteraciones ortostáticas al regreso a tierra, inhabilitando su funcionamiento; una exposición de seis meses se refleja en una recuperación de hasta 2 años.

Este efecto de “desacondicionamiento” cardiovascular incluye disminución de la capacidad de trabajo, reducción del volumen sanguíneo, deterioro de los reflejos barorreceptores y disminución de la tolerancia ortostática. Estas alteraciones reducen mucho la capacidad de los astronautas de estar en posición erguida y de realizar las actividades diarias normales después de volver a la gravedad completa de la Tierra.

Actualmente se están encontrando nuevos estresores, secundarios a la duración de los viajes, que impactan en el desarrollo y salud de los astronautas, los cuales abarcan alteraciones psicológicas y/o psicosociales.<sup>11</sup>

## Factores interpersonales

Dentro de los factores interpersonales en un grupo de trabajo espacial hay que considerar todas las situaciones que puedan intervenir en el ambiente, desde compatibilidad, edad, cultura, formación personal y social; considerando que las relaciones que se generan por el largo tiempo de convivencia produce microsociedades, que impactan en el comportamiento de cada uno de los integrantes. En caso de existir un conflicto entre varios tripulantes puede provocar que el éxito de una misión se vea afectado por la disminución del desempeño laboral (percepción, cognición, alerta, habilidades) y la elevación de la frustración ante la interacción con el problema, pudiendo resultar en actos hostiles entre tripulantes.<sup>11,15</sup>

La composición de un grupo de trabajo es importante en particular para el trabajo en equipo y la toma de decisiones ante circunstancias en las cuales varios miembros del grupo se pueden sentir capacitados y desafiar decisiones tanto del grupo como de la estación terrestre.<sup>15</sup>

Los aspectos culturales y de género influyen en las diferentes formas en que se toman decisiones y el trabajo en equipo.



# Incorporación de las mujeres a los programas espaciales

La introducción de las mujeres en el espacio marcó un cambio cultural y social de gran importancia, intentando establecer la igualdad de sexos. Los programas se tuvieron que enfrentar a que los vuelos espaciales eran considerados sólo trabajo para hombres, siendo las mujeres consideradas feminautas o mujeres espaciales, y no astronautas, término que sólo era definido para los hombres.

Los problemas que se encontraron eran similares a los que se presentaban en equipos interculturales, en las relaciones interpersonales, trabajo en equipo, la toma de decisiones, la importancia, la dirección de la misión.

En el programa espacial ruso, el 16 de junio de 1963, Valentina Tereshkova, a la edad de 26 años y a bordo del Vostok 6, se convirtió en la primera mujer en viajar al espacio. Su nombre en clave durante la misión fue Chaika (Чайка), es decir, Gaviota.

La creación de WISE (“Women in Space Earliest”), benefició a los programas al sugerir las diferentes características que el sexo femenino aportaba, entre ellas, mejor adaptación al confinamiento por su tamaño y, por ende, menos requerimientos para su mantenimiento.

Pero no fue hasta finales de los setentas y principios de los ochentas, que realmente se consideraba una mujer astronauta. Es el 24 de junio de 1983 cuando la primera mujer estadounidense, Sally Ride, es puesta en el espacio, en el transbordador espacial Challenger, como integrante de la misión STS7 encargada de poner en órbita satélites de comunicación.

A partir de la década de los ochentas, la aprobación de las mujeres como parte de la tripulación espacial brinda nuevos conceptos a la psicología, adoptando una mentalidad de cooperación en contra de una mentalidad competitiva, establecer mayor cooperación en misiones interculturales, para establecer una toma de decisión desde un punto de vista más sensible y no tan tajante, así como valorar diversas opciones antes de emitir un juicio.<sup>3</sup>

## Sexualidad y reproducción

La cuestión principal a ser considerada en la reproducción fuera de la Tierra es la falta de aceleración gravitacional. La vida en la Tierra, y como consecuencia los procesos reproductivos de todas las especies y generaciones que la han habitado, evolucionó bajo la influencia constante del campo gravitacional terrestre de 1G. Es imperativo estudiar cómo el ambiente espacial afecta las fases críticas de la reproducción mamífera y el desarrollo de eventos que influyen en la fertilización, embarazo, nacimiento y maduración, el cuidado paternal. La gravedad afecta todos los aspectos del desarrollo vertebral, incluyendo la estructura de células, desarrollo de sistemas e incluso el comportamiento. Mientras la gravedad regula la expresión genética de los mamíferos, existen implicaciones importantes para la procreación segura en ambientes espaciales.

## Alteración sueño-vigilia

La calidad del sueño se ve afectada porque los horarios y turnos laborales están determinados por las necesidades operacionales de la misión y por la variación de la exposición ante la luz y oscuridad, afectando los mecanismos circadianos; estas condiciones provocan que la calidad y tiempo de sueño se vean afectadas.

La falta de sueño reparador puede producir disminución en el rendimiento laboral aumentando los tiempos de reacción, deterioro de la memoria cognitiva y falta de atención; la pérdida

crónica de sueño da como resultado la alteración de los ritmos circadianos, como producto de la alteración del ritmo sueño-vigilia. Está demostrado que en ambientes de vuelo y en el espacio en los que pueden existir periodos continuos de 24 horas de trabajo, el ambiente neurobiológico del individuo puede alterar su equilibrio emocional, de esta forma personas perfectamente equilibradas se tornan inestables e irritables.<sup>26</sup> Los síntomas que se presentan son somnolencia, fatiga, trastornos del sueño, desempeño disminuido y alteraciones del humor. Para conocer la causa subyacente se realizaron estudios sobre la disminución de calidad y el tiempo de sueño en astronautas, en los que se concluye que no existían diferencias significativas en la calidad de sueño y que la carga de trabajo podría ser el factor clave como causa de alteraciones del sueño.

## Alimentación

Los viajes de corta duración pueden ser constantemente abastecidos de alimentos y líquidos, pero en los viajes de larga duración este es un tema crítico.

Las necesidades nutricionales de los astronautas son específicas, de una calidad superior para poder contrarrestar los efectos de una larga exposición a ingravidez, a fin de mantener un estado de salud y peso adecuado, y disminuir la probabilidad de presentar enfermedades.

Las deficiencias en la calidad y la variación de horarios de alimentación puede afectar no sólo a la salud del astronauta, sino también a la seguridad y operación de la misión; pudiéndose presentar hipoglucemias y deshidratación o alteraciones alimentarias por el contenido (grasas, sal, azúcar, cafeína).<sup>29</sup> La logística tendría que ser tan específica para los viajes de larga duración, que se tendrían que hacer envíos con una anticipación de meses.

Se tiene que considerar que los requerimientos no sólo se plantean desde el punto de vista nutricional, sino también de la variación de alimentos buscando contrarrestar los efectos negativos que rodean a los astronautas, por lo que se recomienda que la repetición de comida deba tener intervalos mensuales como mínimo, ya que puede provocar molestia entre los tripulantes, que culmine en depresión, enojo y conflictos interpersonales.

Las modificaciones en el cuerpo repercuten en modificaciones en la alimentación, la ingestión se ve alterada por los cambios en el volumen de líquidos corporales; la función gastrointestinal se modifica por los cambios en la microflora y alteraciones en la distribución del gas gastrointestinal. Las dietas se recomiendan con alto contenido de calcio y vitamina D, para mantener la densidad ósea, y baja en grasas saturadas para evitar enfermedades cardiovasculares.<sup>27</sup>

## Accidentes

La presencia de accidentes en los programas espaciales permite concluir que, el riesgo de presentarse, es resultado directo de la existencia de múltiples factores físicos y psicológicos, durante un momento específico. Su estudio se considera importante por el efecto estresor en la mente de los astronautas y sus esferas (social, familiar, laboral, etc.), no sólo por el riesgo sino por las consecuencias que conlleva un accidente.

Los accidentes tienen repercusiones en diversas áreas con características directas e indirectas y mediatas e inmediatas; con sus consecuencias psicológicas asociadas.

1. Astronautas:

- a. Directa

- i. Inmediata: pérdida de la vida, salud y/o trabajo (invalidez)

- ii. Mediata: incapacidad de trabajar en su área (física o psicológicamente), soporte económico familiar
- b. Indirecta
  - i. Inmediata: estrés familiar
  - ii. Mediata: dependencia económica, economía familiar

2. Programa espacial:

- a. Directa
  - i. Inmediata: pérdida económica, de personal entrenado y de confianza en el programa
  - ii. Mediata: presupuesto espacial, estudios y análisis de riesgos de nuevos accidentes, necesidad de predecir consecuencias, altera la percepción de las próximas generaciones sobre el éxito-fracaso de la misión, percepción y respuesta ante el riesgo de accidentes
- b. Indirecta
  - i. Inmediata: costo de indemnizaciones y soporte a las familias de los afectados
  - ii. Mediata: estrés en las futuras misiones, conciencia situacional

*Reseña de algunos accidentes.*

Vladimir Komarov perdió la vida en 1967 durante la misión espacial Soyuz 1. Los problemas técnicos de la aeronave imposibilitan el cumplimiento de la misión, motivo por el que se cancela. Durante el reingreso a la Tierra, los paracaídas fallan y la cápsula se estrella. Vladimir Komarov se convirtió en el primer ser humano en fallecer en una misión espacial.<sup>23</sup>

Apolo I, 7 de enero de 1967, la primera misión tripulada, posterior al proyecto Géminis. Un incendio acontecido en pruebas previas al vuelo provocó el fallecimiento de toda la tripulación. Virgil Grissom, Edward White y Roger Chaffe fueron las únicas víctimas del programa Apolo.<sup>23</sup>

En 1971, durante la misión del Soyuz XI, compuesta por la tripulación de reserva: Vladislav Volkov, Georgi Dobrovolski y Viktor Patsayev, consiguió el récord de permanencia en el espacio (23 días), aunque su tripulación no pudo contarle porque la aeronave sufrió una avería provocando la pérdida de oxígeno y presión interna; la incapacidad para solucionar el problema provoca la asfixia de toda la tripulación.<sup>23</sup>

El Apolo 13, que no llegó a alunizar, tuvo que luchar contra la energía limitada, la pérdida de calor en la cabina, la falta de agua potable y con la urgente necesidad de reparar el sistema de extracción de dióxido de carbono. A pesar de todos estos graves percances, la tripulación del Apolo 13 consiguió regresar a salvo a la Tierra el 17 de abril de 1973.<sup>22</sup>

El 28 de enero de 1986, en la misión STS -51 Challenger, el accidente surge de una falla en la junta tórica de uno de los cohetes de propulsión, provocando que 73 segundos después del despegue, explotara el transbordador, falleciendo toda la tripulación.<sup>22</sup>

El 1 de febrero de 2003, durante la misión STS-107, “Columbia microgravity research mission/Spacehab”, una falla en el escudo protector provoca un incendio total del transbordador durante su reingreso, como consecuencia fallece toda la tripulación posterior a una misión de 15 días y 22 horas.<sup>22</sup>

## Confinamiento y aislamiento

El confinamiento se define como la “restricción misma”, es decir que incluye la limitación del movimiento físico. El aislamiento es la separación de la persona al ambiente o los recursos te-

restres normales, este aislamiento gira en torno a todo el ambiente.<sup>29</sup> Las aeronaves espaciales se encuentran separadas de los recursos básicos para sobrevivir y una mala planeación, depleción o ausencia requiere de un gasto enorme de recursos para su entrega.

En el aspecto social, se consideran los efectos de la separación de la familia y los amigos, los límites y retrasos de la comunicación, así como las probables distorsiones en la imagen o el sonido<sup>7</sup> por tiempo indefinido, y el límite psicológico que la persona tendría que enfrentar principalmente en viajes de larga duración; también se consideran como parte del aislamiento social, la separación por diferencias grupales o de trabajo en una misión espacial.

Dentro de los aspectos culturales, la nacionalidad, raza, educación y alimentación puede provocar una separación entre los grupos e individuos al momento de tener que tomar decisiones o trabajar en equipo. En el contexto físico, los límites y la necesidad del contacto humano podría generar un estado mental alterado, generado por la búsqueda de establecer un nexo que no sólo sea intelectual o verbal, principalmente durante eventos que pudieran ser críticos.

Al realizar un análisis del aislamiento y el confinamiento es importante conocer la duración de la misión por la necesidad de establecer medidas preventivas y procedimientos por si se llegara a presentar, cómo lidiar con ellos. Los síntomas pueden ser: la desmotivación, fatiga, insomnio, cefalea, tensión social, depresión, irritabilidad, enojo, ansiedad y trastornos del proceso cognitivo, entre otras alteraciones.<sup>14,16</sup>

La experiencia y el análisis de misiones espaciales previas, así como estudios en ambientes simulados han establecido que los problemas psicológicos e interpersonales durante las misiones se relacionan con la ergonomía (de la aeronave, hábitat y el soporte vital) y las relaciones sociales con la familia, amigos y compañeros, que afectan el estado mental durante las misiones. Se debe tener en cuenta qué tipo de material y equipo se van a implementar tanto en naves como en los hábitats, planificar los espacios necesarios en hábitats y adecuar los procedimientos según las necesidades de los astronautas, a fin de disminuir la sensación de aislamiento y confinamiento, en la mayor medida posible.<sup>1</sup> Estos factores de adaptación psicológica (aislamiento y confinamiento) se han investigado desde los sesentas con la finalidad de valorar el desempeño y sus alteraciones durante tareas asignadas.<sup>3,13</sup>

Dentro de los avances en el estudio del comportamiento se realizaron investigaciones en cámaras hiperbáricas y ambientes extremos con la finalidad de determinar el comportamiento psicosocial de los participantes. Hay que considerar que este tipo de comportamiento tiene un impacto significativo en el resultado de la misión.<sup>14</sup> Porque el desarrollo de la misión tiene aspectos de desarrollo individual profesional, pero el éxito de las misiones está determinado por la cohesión del equipo de trabajo y la capacidad de poder mantener al equipo funcionando como una unidad.<sup>3</sup>

La dificultad para generar experiencia y estudios en el ambiente espacial real, obliga a realizar estudios en otros tipos de ambientes intentando duplicar las características del medio espacial, con la finalidad de predecir el comportamiento y estatus psicológico de los astronautas durante viajes espaciales, en particular de larga duración.

Es importante promover la adaptación psicofísica de los astronautas para acoplarse a su percepción de confinamiento, espacio y hacinamiento,<sup>16</sup> por lo que es necesario crear nuevas actividades o contramedidas psicológicas o psicosociales antes, durante y posterior a las misiones de mayor duración, abarcando la selección y composición del personal, entrenamiento, soporte durante las misiones, diseño de misiones y objetivos, delineación del hábitat y vehículo; con la finalidad de mejorar los “procedimientos y guías de planeación de misiones, protocolos de entrenamiento, requerimientos de la misión y servicios especializados, como la selección de astronautas, su entrenamiento y soporte clínico”.<sup>12,13,16</sup>

# Referencias

1. M. Ephimia Morphew M.S. (2001). Psychological and Human Factors in Long Duration Spaceflight. MJM.
2. Manfred Dietel, et. al. (2010). The Era of International Space Station Utilization, Perspectives on strategy from international research leaders. NASA.
3. A. Vakoch, Douglas. (2011). Psychology of Space Exploration; Contemporary Research in Historical Perspective. Washington D.C. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. pag. 4,7,10,11,13,14,20,26,33-43,53-77,97
4. Esa.int. (2012). How to become astronaut. 20 de febrero de 2016. De European Space Agency. Sitio web: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Human\\_Spaceflight/Astronauts/How\\_to\\_become\\_an\\_astronaut](http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Astronauts/How_to_become_an_astronaut)
5. Nasa.gov. (2015). Astronaut Requirements. 22 de febrero de 2016. De NASA. Sitio web: [http://www.nasa.gov/audience/forstudents/postsecondary/features/F\\_Astronaut\\_Requirements.html](http://www.nasa.gov/audience/forstudents/postsecondary/features/F_Astronaut_Requirements.html)
6. Nasa.gov. (2011). Astronaut selection and training. National Aeronautics and Space Administration. FS-2011-1-057-JSC
7. Daniel L. Collins, Capt, USAF. (1985). Psychological Issues relevant to astronaut selection for long-duration spaceflight: A review of the literature. NASA.
8. Esa.int. Astronaut Training Requirements. 20 de febrero de 2016. De European Space Agency. Sitio web: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Human\\_Spaceflight/Astronauts/Astronaut\\_training\\_requirements](http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Astronauts/Astronaut_training_requirements)
9. Terence F, McGuire MD. Astronauts; reflections on current selection methodology. Astronaut Personality, and the Space Station. NASA.
10. Tanya Lewis. (2014). The Right (Mental) Stuff: NASA Astronaut Psychology Revealed. 25 de febrero de 2016. De NASA. Sitio web: <http://www.space.com/26799-nasa-astronauts-psychological-evaluation.html>
11. McPhee JC, Charles J. (2009) Human health and performance risks of space exploration missions. National Aeronautics and Space Administration, United States.
12. History.nasa.gov. Long Duration Psychology. 01 de marzo de 2016. De NASA. Sitio web: <http://history.nasa.gov/SP-4225/long-duration/long.htm>
13. W. Stuster, Jack, Ph.D. (2015). Behavioral Issues Associated with isolation and Confinement: Review and Analysis of Astronaut Journals (Journals). De Johnson Space Center, Human Research Program, Houston, TX, United States. Sitio web: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/991.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/991.html)
14. Larrence A. Palinkas. (2001). Psychosocial issues in long-term space flight: overview. Gravit Space Biol Bulletin. Junio, 14(2):25-33.
15. Mohanty, Susmita. (2006). Psychological factors associated with habitat design for planetary mission simulators. space 2006. American Institute of Aeronautics and Astronautics, San Jose, California, AIAA 2006-7345.
16. Nicogossian AE. (1994). Space physiology and medicine. Ed. Lea & Febiger, 3 ed. pag. 424-34.
17. NASA.gov. (2002). How astronauts get along. 05 de marzo de 2016. De Science.Nasa.gov. Sitio web: [http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/21oct\\_getalong/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/21oct_getalong/)
18. Sipes WE, Vander A. Operational behavioral health and performance resources for International Space Station Crews and Families. Aviat Space Environ Med. 2005;76, no. 6, sec. II: B36-B41.
19. D. Meister; Baltimore, M.D. (1989). Conceptual aspects of human factors: Johns Hopkins University Press.
20. Chapanis A. The International Ergonomics Association: Its First 30 Years. Ergonomics. 1990;33, no. 3: 275-82.
21. Brady JV. Aviation "Behavioral Health: The propaedeutic requirement. Space Environ Med. 2005;76, no. 6, sect. II (June 2005): B13-B23.
22. Wallak W, Gonzalez G. (2012). Celebrating 30 years of space shuttle editing. NASA/NP-2012 01-835.
23. History.nasa.gov. (2015). Apollo I. 22 de marzo de 2016. De nasa.gov. Sitio web: <http://history.nasa.gov/Apollo204/>
24. Jarero I. (2007). 23 de marzo de 2016. De Revipast.com (Revista Iberoamericana de Psicopatología y Disociación. 7(1)ISSN: 2007-8544). Sitio web: <http://revipast.com/data/documents/IMPACTO%20DEL%20TRAUMA-1.pdf>
25. Jones PM, et al. (2011). Human factors in space exploration. De Nasa. Review of Human Factors an Ergonomics, Volume 6.
26. Guyton & Hall. Fisiología médica. 12a ed. México: Editorial Elsevier; 2013: p. 527-34.
27. Paris A. (2014). Physiological and psychological aspect of sending humans to Mars. De St. Petersburg College, FL.
28. Kennedy CH. (2013). Aeromedical Psychology. Ed. Ashgate Publishing, Ltd.
29. Davis JR, et al. (2008). Fundamentals of aerospace medicine. 4th ed. Florida, USA: Ed. Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins.

# 25. La odontología en el Espacio

María Ivette Cruz Aburto, Julio Basilio Robles Navarro

Desde los principios de la historia, el ser humano ha sido presa del majestuoso escenario que representa el espacio, su asombro ha despertado la inquietud y curiosidad en busca de respuestas, ve en el Cosmos una alternativa para encontrar el origen de la vida. Tales inquietudes lo han llevado a experimentar la sensación que provoca el volar, trasladarse en un tiempo corto entre distintos puntos, e incluso ha demostrado su interés por salir de nuestra atmósfera.

La gravedad puede alterar la fisiología de quienes exploran el espacio, en esa travesía durante diferentes periodos dependen de lo elemental y es necesario que el astronauta esté capacitado para cualquier eventualidad que pudiera presentarse en el equipo de la nave, instrumentos de precisión, pero también debe de contar con conocimientos y habilidades de atención médica para mantener su estado de salud general de la tripulación así como de él mismo, ya que algunas regiones del cuerpo humano son susceptibles a los cambios de presión atmosférica.

No cabe duda que la tripulación es sometida a diversas pruebas psicológicas, físicas y de resistencia, para comprobar que su estado de salud sea el más óptimo, con la seguridad de enfrentar los viajes espaciales, así como identificar su capacidad de adaptación en otra atmósfera. En este contexto, la salud de acuerdo con la OMS se define como: “La salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades o invalidez”.<sup>1-3</sup>

Una tripulación se encuentra expuesta a diversos factores de riesgos potenciales provocados por los cambios de altitud durante el vuelo y a las diferentes velocidades que se generan en una aeronave, por la estancia prolongada en una gravedad diferente a la usual podrían manifestar alteraciones de tamaño en tejidos y órganos, con la presencia de dolor, por la Ley de Boyle,<sup>4</sup> generando barotrauma.<sup>5</sup> Y también sufren el riesgo de la exposición a la radiación cósmica.

La odontología como rama de la medicina y en sus diferentes áreas, se le debe de dar la importancia necesaria para contribuir en el desempeño de los astronautas, porque, con frecuencia se observan problemas o alteraciones en la cavidad bucal, por ello el odontólogo o cirujano dentista, o el especialista que realiza el examen clínico debe de involucrarse de manera responsable en el diagnóstico, la prevención y atención de los padecimientos, desde luego con más énfasis en la prevención.

En este capítulo se aborda la descripción de manera general, de las alteraciones en la salud bucodental, la relación que tienen con la exposición a la radiación, la importancia del estrés como origen de alteraciones en las estructuras del aparato estomatognático, de las medidas de prevención, y recomendaciones que deben considerarse al momento de la evaluación física, y la exploración bucodental de la tripulación en incursiones espaciales, previo al viaje, durante y posterior al mismo.

Cabe mencionar que, para ser tripulante de los viajes espaciales, se recomienda gozar de excelente salud, sin embargo, dentro de los exámenes de rutina de la cavidad bucal, podrían omitirse el origen de algunas alteraciones que afecten el desempeño físico de los tripulantes, durante los viajes. Por ello, se recomiendan exámenes frecuentes, y apoyarse en las recomendaciones (conocer un protocolo) para la atención.

El malestar o dolor dental se presenta también en personas que tienden a viajar muy seguido en aviones. El organismo del ser humano reacciona a los cambios de presión en el caso de baja presión de aire dentro de una cabina de avión y la presencia de dolor se denomina “barotrauma” (*baro*, presión; *trauma*, lesión), por lo común se conoce como una “presión” y para el caso del dolor dental bajo estas características se le denomina “barodontalgia”.<sup>4,5</sup>

## Estructura dental

Dentro de la cavidad bucal se ubican los dientes de la maxila y la mandíbula, agrupados según su función, alojados en cavidades óseas denominadas alvéolos, formando una articulación del tipo gonfosis. Los dientes cuentan con cuatro tipos de estructuras: esmalte, dentina, paquete vasculonervioso (complejo dentino-pulpar) y cemento, tejido especializado que une el diente con el hueso alveolar a través del ligamento periodontal. Todo esto está protegido por el periodonto que comprende: la encía que rodea el cuello dentario y la unión dentogingival que une la encía al diente. Estas estructuras aíslan al periodonto de inserción del medio bucal séptico.<sup>6</sup>

El esmalte dental, compuesto en su mayoría de materia inorgánica que es la hidroxiapatita ( $\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6[\text{HO}]_2$ ) con un 95 %, 4 % de materia orgánica y 1 % de agua; la dentina, con 70 % de porción inorgánica constituida por cristales de hidroxiapatita, la porción orgánica con un 20 % en fibras de colágena (que constituyen 93 %) y el 10 % restante de agua; cemento, tejido conectivo mineralizado, muy similar al hueso, pero este es avascular. El 50 % con hidroxiapatita y una cadena de matriz orgánica de colágena, es una capa que forma parte del complejo dentino-pulpar.<sup>7</sup>

El complejo dentino-pulpar o también llamado pulpa dental, es un tejido no mineralizado, tejido conectivo y laxo, ricamente vascularizado, contiene vasos linfáticos y nervios. Ocupa las cavidades pulpares y conductos radiculares de los dientes. Histológicamente se observan odontoblastos, células de Höhl; fibroblastos, células mesenquimatosas indiferenciadas, macrófagos, mastocitos, leucocitos, linfocitos; fibras del tipo reticulares (III) y colágenas (I y V), las colágenas aumentan de grosor con edad y con los estímulos nocivos (caries, atrición, obturaciones, entre otros). Sustancia fundamental: gel denso compuesto por ácido hialurónico del tipo de los glicosaminoglicanos (GAG), glicoproteínas, agua y fibronectina. La función de la pulpa dental es el transporte de nutrientes y metabolitos.

La mucosa bucal, son tejidos blandos que tapizan la cavidad bucal, compuesta por un epitelio y un tejido conectivo, conectados por la membrana basal y se clasifica en mucosa de revestimiento, masticatoria y especializada o sensitiva.<sup>6,7</sup>

Mucosa de revestimiento, tapiza las mejillas, paladar blando, porciones laterales y ventrales de la lengua e interna de los labios, el epitelio que lo forma es plano, estratificado y no queratinizado.

Mucosa masticatoria, es la encía y el paladar duro, recibe las fuerzas durante la masticación. Su epitelio es plano, estratificado y paraqueratinizado, firmemente adherido al hueso y carece de movilidad.

Mucosa especializada o sensitiva, superficie dorsal de la lengua, en las papilas linguales tienen corpúsculos o botones gustativos, encargadas de percibir las sensaciones gustativas.<sup>6,7</sup>

## Saliva

A la saliva se le considera como un factor protector para mantener los tejidos bucales en un estado fisiológico óptimo.<sup>8</sup> Se sabe que las glándulas salivales mayores (parótida, submandibular y sublingual) producen la mayor cantidad que se deposita en la cavidad bucal, que es aproximadamente cerca de un litro y medio de saliva por día en un adulto. La generación de saliva disminuye por la noche durante el sueño y en personas de la tercera edad su producción de saliva es menor.

*Composición de la saliva.* El mayor porcentaje de la saliva está constituido por agua, y contiene minerales como, flúor, fosfato, bicarbonato, calcio; así como moco, lisozimas; además de diversas inmunoglobulinas y enzimas, con un pH entre 6.5 a 7.

El componente más abundante es el agua, entre 98.4 y 99.0 %; el resto son sólidos orgánicos (0.6 a 1.0 %) e inorgánicos (0.2 a 0.4 %), iones como Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, bicarbonatos y fosfatos. En pequeñas cantidades: amonio, bromuro, cobre, fluoruro, yoduro, litio, magnesio, nitrato, perclorato, tiocianato.

Las proteínas unidas a carbohidratos se encuentran en grandes proporciones en la saliva (300 a 400 µg/mL). Las mucinas son proteínas de alto peso molecular, altamente glicosiladas (hasta un 80 %), mientras que en las glicoproteínas, los glúcidos son menores (10 a 40 %); los carbohidratos en forma libre (glucosa, galactosa y manosa) se encuentran en muy pequeñas cantidades; la función de las proteínas unidas a carbohidratos es incrementar la viscoelasticidad de la saliva, prevención de la degradación de las enzimas (proteólisis) y de la precipitación ácida.<sup>9-11</sup>

Contiene restos sólidos orgánicos en 0.4 a 0.6 %, de éstos se encuentran los no proteicos como la bilirrubina, la creatinina y el ácido úrico que es el antioxidante por excelencia de la saliva. Sus componentes orgánicos más importantes funcionalmente, son un grupo de glicoproteínas complejas, mucopolisacáridos y mucinas. El contenido total de proteínas es de 0.5 a 3 mg/mL, siendo bastante estable e independiente de la tasa de flujo salival; la mayoría son producidas por las glándulas salivales (30 a 40 %), el resto por células mucosas e inmunológicas y/o microorganismos, o de origen sérico.

La saliva producida por las glándulas sublinguales, submandibulares y mucosas menores es muy rica en mucinas (MUC5B y MUC7), en contraste, la saliva de la glándula parótida es rica en amilasa (20 %), proteínas ricas en prolina (60 %), y fosfoproteínas-estaterina (7 %).<sup>9,11</sup> Dentro de sus funciones, la saliva ayuda en percibir los sabores, inicia la formación del bolo alimenticio para el proceso de la digestión, lubrica mucosas y dientes, necesaria para facilitar la dicción, permite la cicatrización y la protección de la cavidad bucal, conservando su pH neutro.

La saliva constantemente remineraliza las estructuras de los dientes por el intercambio de flúor y calcio; al exceso de saliva se denomina sialorrea; a la poca generación de saliva hiposalia y a la sequedad de la boca, se conoce como xerostomía; la poca o nula cantidad de saliva da origen a caries<sup>12</sup> o candidosis.

La frecuente exposición a la radiación ultravioleta o ionizada, puede alterar la estructura de las glándulas, provocando desde la disminución de la saliva, hasta afectar el DNA originando cáncer. La saliva es considerada como un biomarcador para identificar enfermedades sistémicas, síndromes y hasta cáncer.<sup>12-15</sup>



# Caries dental

La caries dental es una enfermedad crónica, infectocontagiosa, multifactorial, que afecta a un 90 % de la población mundial, son lesiones de las estructuras duras del diente, inicia con una desmineralización (parte inorgánica) en la superficie dental provocada por los ácidos de microorganismos presentes en boca, principalmente *Streptococcus mutans*; reblandeciendo la parte orgánica que da paso a una cavidad que involucra las diferentes capas del diente como: esmalte, dentina, infectando el paquete vasculonervioso, finaliza con la atrofia y necrosis de éste, formando probablemente periodontitis apical o afectación de los tejidos periodontales <sup>2,3,6,8,13-16</sup> (Cuadro 25.1).

A continuación se listan factores que predisponen el origen de la caries dental.

Enfermedades sistémicas no controladas asociadas con la aparición de la caries dental como diabetes e hipertensión. <sup>2,3,12-14,17</sup>

**Xerostomía:** por efectos secundarios de farmacoterapia para el control de enfermedades sistémicas; exposición frecuente a la radiación ultravioleta ionizada en cabeza y cuello; alteraciones de glándulas salivales por presencia de quistes o tumores <sup>12-14,18-20</sup>

**Anatomía dental:** dificulta la limpieza en zonas profundas del esmalte (surcos, fosas, fisuras), quedando atrapados restos de alimentos.

**Mal posición dentaria:** puede provocar retención de alimentos, que incrementaría con ello el número de colonias de microorganismos y sus productos nocivos que afectan la estructura dental.

**Ingesta de alimentos:** alimentos saturados en azúcares refinados, como los dulces, bebidas gaseosas (refrescos), postres, pastelillos con alto contenido de azúcar refinada, frituras con condimentos artificiales.

**Hábitos de higiene:** poca frecuencia en el cepillado dental para eliminar restos de alimentos, así como disminuir el porcentaje de microorganismos en boca, desconocimiento en el uso de cepillo interdental e hilo dental para los espacios interproximales; presentándose placa dentobacteriana y cálculo dental (sarro).

**Estilos de vida:** tabaquismo, frecuencia en la ingesta de alcohol.

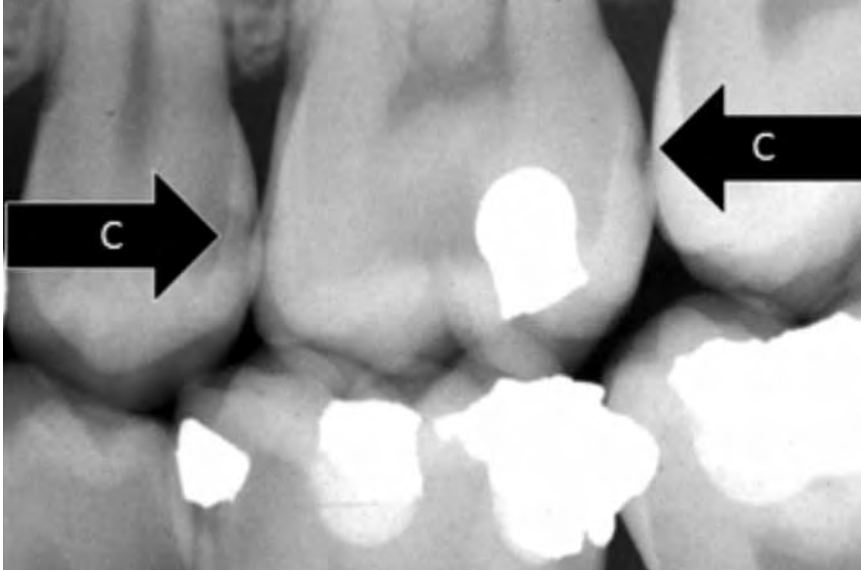
**Prevención:** anamnesis completa para identificar cualquier enfermedad de vida pasada y presente del paciente, análisis de dieta, apoyo de estudios en imagenología de rutina, ortopantomografía, dentoalveolar, aleta de mordida, aplicaciones de flúor local, colocación de selladores de fosas y fisuras.

Recomendación del cepillado dental después de cada alimento, evitar las entrecomidas, y alimentos con grandes cantidades de carbohidratos. Uso del hilo dental, enjuagues con flúor, uso de algún dentífrico con flúor y visitar al dentista cada 6 meses <sup>2,3,14,16,19-21</sup> (Figura 25.1).

## Cuadro 25.1.

Grado de caries y estructura del diente que afecta

Grado de caries	Tejidos que afecta
I	Esmalte
II	Esmalte y dentina
III	Esmalte, dentina y cemento
IV	Todos los tejidos (necrosis pulpar)



**Figura 25.1.**

Radiografía aleta de mordida de paciente masculino de 24 años de edad, se observa caries (C) interproximal en la cara distal del segundo premolar superior izquierdo y en la cara distal del primer molar superior del mismo lado. Zonas que no se observan durante la exploración clínica y se recurre a estudios de imagenología para descartar la presencia de caries.

## Enfermedad periodontal

La enfermedad periodontal es la afectación e inflamación de los tejidos que circundan al diente, por la formación de placa y el sarro que se acumulan en la base de los dientes, creando una bolsa periodontal que provoca lesión de soporte óseo, movilidad y pérdida del diente. La infección e inflamación se diseminan desde la gingiva hasta el ligamento y el hueso alveolar; la placa dentobacteriana contiene microorganismos, favoreciendo una infección dental y destrucción ósea.<sup>8,16</sup>

*Factores de riesgo.* Enfermedades sistémicas, se asocia con diabetes, hipertensión, síndrome de Sjogren, anemia, enfermedades autoinmunes, presencia de enfermedad periodontal y caries.<sup>2,3,10,12-14</sup>

Mal posición dentaria, apiñamiento dental y, por consecuencia, alimentos acumulados en espacios interdientales que dificultan su eliminación.

Invasión del espacio biológico, por obturaciones que rebasan el sellado cervical del margen protésico; así como el excedente de material de cementación en el espacio biológico.<sup>22</sup>

Trauma oclusal, por estrés y bruxismo que afecta al periodonto.

Tabaquismo, provoca un efecto tóxico sobre la vascularización, inhibiendo el proceso de protección y retardando el de cicatrización.

*Prevención.* Anamnesis completa, para identificar cualquier enfermedad que esté cursando el paciente. Uso de imagenología de rutina como la ortopantomografía. Identificación de lesiones,

## Cuadro 25.2.

### Fármacos que provocan boca seca

Acción medicamentosa	Fármaco
Anticolinérgicos	Atropina, difenhidramina
Diuréticos	Furosemida, clorotiazida
Antihipertensivos	Captopril, metildopa, enalapril
Ansiolíticos y sedantes	Diazepam, triazolam
Relajantes musculares	Ciclobenzaprina, tizanidina
Analgésicos opioides	Codeína, meperidina, tramadol
Antihistamínicos	Loratadina, clorfeniramina
Anticonvulsivos	Carbamazepina

así como el registro del sondeo periodontal, disminuir el estrés. Identificar la cantidad de saliva producida por día

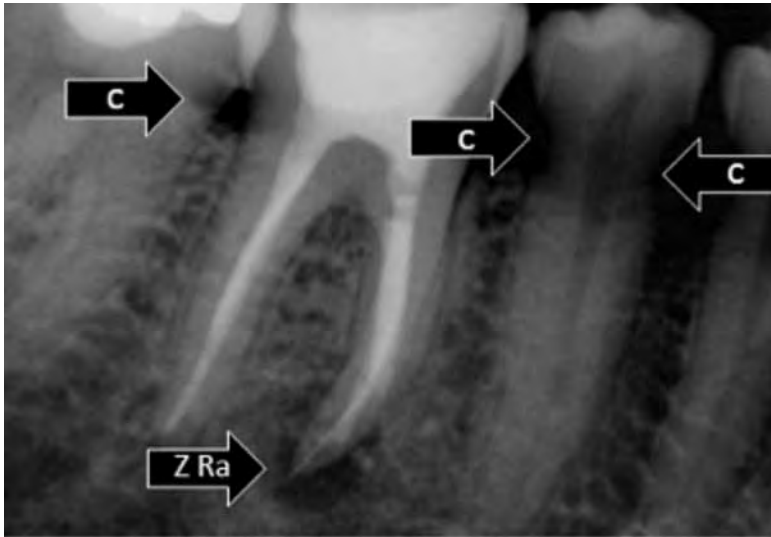
Higiene bucal, cepillado para eliminar restos de alimentos, uso de hilo dental, cepillos interdentarios, uso de enjuagues con antisépticos como la clorhexidina a 2 %. Visita periódica con el dentista.<sup>2,3,10,12-14</sup> (Cuadro 25.2).

## Endodoncia y afecciones periapicales

La odontalgia es el motivo más frecuente por el que una persona se acerca para atención, dentro de este cuadro doloroso el clínico generalmente no puede establecer de forma precisa un diagnóstico del estado pulpar, hasta evaluar y analizar los síntomas que son subjetivos.

Dependiendo de los datos obtenidos, se establecerá un plan de tratamiento dental, si se requiere de un tratamiento de conductos para mantener todavía más tiempo el diente en el aparato estomatognático o de la decisión de un tratamiento de extracción dental; considerando la intensidad, duración e historia de la odontalgia, se recomienda estudios de imagenología (rayos X) para apoyar el diagnóstico e identificar si el dolor es provocado por caries dental con presencia o ausencia del tejido vasculonervioso (pulpitis reversible o pulpitis irreversible), fractura dental o radicular, si existe algún tipo de restauración que no se ajuste a la cavidad preparada, valorar el aspecto en la integridad y tonalidad de la corona dental, presencia de inflamación de tejido blando, fistulas, enfermedad periodontal. De existir dudas, realizar pruebas de sensibilidad pulpar, como: las térmicas, eléctricas, de percusión, palpación, anestésicas, y de referencia dolorosa.<sup>6,8,23-25</sup>

Pilotos han referido odontalgia o barodontalgia al realizar simulacros en las cabinas de simulación y experimentar cambios de altitud; se sugiere que dentro del cuadro de medicamentos permitidos, sean considerados analgésicos y antiinflamatorios no esteroideos (AINE), que se usan para tratar tanto el dolor como la inflamación, mientras se establece el plan de tratamiento adecuado<sup>26-29</sup> (Figura 25.2).



**Figura 25.2.**

Radiografía dentoalveolar (periapical), se observan en las caras mesial y distal del 2° premolar inferior derecho a nivel del tercio cervical zonas radiolúcidas provocadas por caries (C) y que involucran la raíz, así también en la cara mesial del 2° molar inferior, en el periápice de la raíz mesial del primer molar inferior derecho se observa zona radiolúcida (Z Ra) por una terapia de conductos sin éxito; estas zonas no son observables a simple vista, por lo que se empleó estudios de imagenología para el apoyo en el diagnóstico.

## Dolor

El dolor dental (odontalgia) puede aparecer por caries, enfermedad periodontal, maloclusiones o alguna otra afección bucodental que se haya identificado o no, también existe la posibilidad de la hipersensibilidad dental que puede manifestarse como una sensación dolorosa aguda breve o prolongada por la capacidad de respuesta que tiene el organismo humano a diversos estímulos externos, que pueden ser originados por la ingesta de alimentos o bien, bebidas frías o calientes, otras sustancias como dulces o ácidos e incluso mecánicos como en el caso de la propia acción del cepillado dental cuando este es enérgico y utilizando cepillos con cerdas duras, provocando recesión gingival.<sup>28-33</sup> El bruxismo también induce a la exposición de la dentina por el desgaste del esmalte, las crisis de bulimia y las personas que sufren trastornos alimentarios por el reflujo gastroesofágico, provocan lesiones ácidas erosionando al esmalte y dejando al descubierto la dentina.<sup>34-35</sup>

La hipersensibilidad dental es un problema común que se presenta entre 9 y 30% de la población, afectando a adultos entre 25 y 45 años.<sup>31</sup> La hipersensibilidad dental se produce por la exposición progresiva de la dentina que contiene terminaciones nerviosas y está llena de líquido,<sup>36</sup> la teoría de la hidrodinámica es aceptada como uno de los mecanismos de inducción de la respuesta pulpar dolorosa, debido a que los estímulos provocan el movimiento del líquido cuando la dentina se encuentra expuesta y los túbulos dentinarios estén abiertos y permeables;<sup>30</sup> el movimiento de este

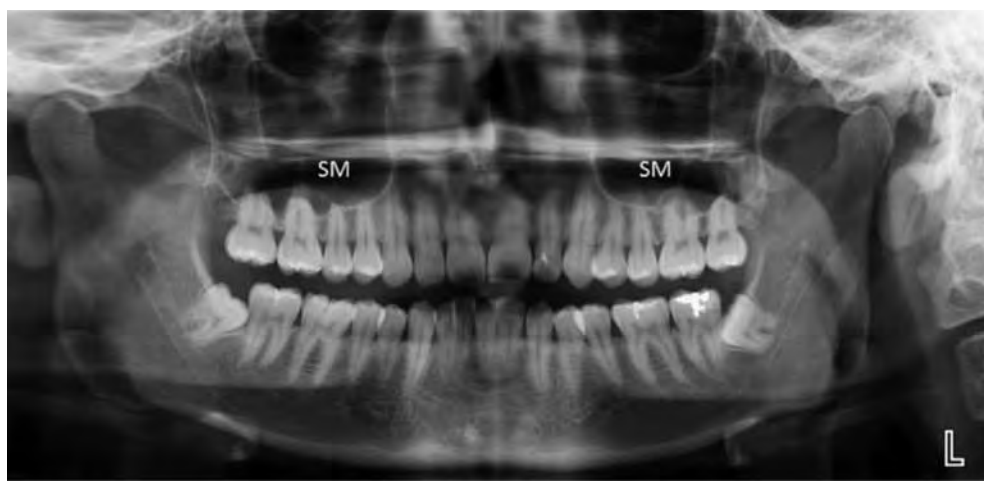
líquido hace que los extremos de los nervios reaccionen provocando dolor a la pulpa.<sup>37</sup> El especialista es quien brindará la atención si es requerido el plan de tratamiento de endodoncia.

Las afecciones dentales que involucran caries, pulpitis reversible o irreversible, necrosis pulpar, enfermedad periodontal, fracaso de tratamiento endodóntico, pueden dejar secuelas en la zona periapical del diente, manifestándose con inflamación, abscesos, fistulas, flegmón, acompañados de dolor, malestar general, halitosis. Otros factores como la presión (barotrauma), temperatura, estímulos químicos y mecánicos pueden exacerbar el cuadro doloroso; asimismo, cualquier defecto del diente como fractura, lesión de caries, obturación o restauración incorrecta y asociado con la discrepancia entre la presión externa e interna en el momento de los vuelos, puede llevar a una odontalgia, término que se emplea para esto es la barodontalgia.<sup>38</sup>

Se ha considerado a la fuerza excesiva ejercida por los músculos de la masticación, así como el desplazamiento de la mandíbula hacia los lados, que afecta a las estructuras del periodonto y a los componentes del diente, haciendo referencia al esmalte, cuando al generarse fricción entre los dientes superiores e inferiores se desgastan, fracturan e incluso hasta provoca la pérdida parcial de la corona clínica, debido a la gran presión a la que son sometidas las diferentes áreas de contacto al recibir una fuerza de mordida promedio de 74 kg, en adultos jóvenes,<sup>39</sup> originando alteraciones como la abrasión dentaria, exposición de dentina, fractura dentaria, abfracción dentaria; fracturas con o sin exposición del complejo dentino-pulpar.

## Barotrauma

Los cambios en el ambiente exterior (presión) del cuerpo humano pueden causar problemas en las estructuras internas que están llenas de aire y se encuentran entre paredes rígidas, como el



**Figura 25.3.** Ortopantomografía (radiografía panorámica digital) de paciente masculino de 27 años, se observa la cercanía del piso del seno maxilar (SM) a los ápices de los premolares y molares superiores.

oído medio y las cavidades del cráneo como los senos paranasales, seno maxilar, senos etmoidales, senos frontales.<sup>40-42</sup>

Los senos más grandes en el cráneo son los paranasales (senos maxilares) localizados en el maxilar, se debe tener en cuenta que sus paredes más bajas se encuentran muy cercanas a los ápices de las raíces de los dientes, sobre todo premolares y molares superiores e incluso algunas veces se localizan los ápices dentro de estas cavidades. La innervación de estos dientes superiores posteriores es a través de los nervios alveolares posteriores y medios, que son ramas terminales del nervio maxilar, rama del trigémino (V par) que también brinda innervación a las mucosas que recubren a estas paredes óseas de los senos maxilares, los cuales pueden relacionarse con odontalgia intermitente o constante de dientes posteriores superiores que indiquen presencia de inflamación y dolor en los senos maxilares (barosinusitis) y viceversa, este dolor referido es a causa de los nervios comunes<sup>40-42</sup> (Figura 25.3).

## Absceso

Los procesos infecciosos encapsulados y sin atención pueden provocar exacerbación de dolor dental, pero también hacer evidente las afecciones no identificadas a través de la exploración clínica, las pruebas de imagenología nos brindan las herramientas para el diagnóstico y la implementación de un plan de tratamiento.

Un absceso es material purulento localizado en los tejidos peridentales, se puede presentar con rubor, dolor, inflamación, supuración, enrojecimiento, hipersensibilidad del diente a la percusión, resultado de la actuación de los polimorfonucleares contra las bacterias o sus productos, y está compuesto principalmente por células muertas, detritus, polimorfonucleares y macrófagos.<sup>43,44</sup>

Estos abscesos periodontales se pueden clasificar de la siguiente manera:

**Absceso apical agudo:** un absceso perirradicular agudo se identificará por la sintomatología dolorosa a la presión (morder), percusión y palpación, el diente sin respuesta a ningún estímulo de vitalidad pulpar y asociado con movilidad, el pliegue mucobucal y los tejidos faciales próximos al diente mostrarán cierto grado de tumefacción, se puede acompañar con fiebre, ganglios linfáticos cervicales y submandibulares hipersensibles a la palpación.<sup>25</sup>

**Absceso apical crónico:** el diente probablemente tenga cambio de color oscuro, no presentará síntomas clínicos, no responderá a las pruebas de vitalidad pulpar y la radiografía mostrará una radiolucidez perirradicular, y tal vez una supuración intermitente.<sup>25</sup>

**Absceso gingival:** lesión localizada, dolorosa, que afecta al margen gingival o papila interdental; respuesta inflamatoria aguda de los tejidos de la mucosa provocada por la introducción de material o cuerpo extraño en la encía (surco gingival).<sup>8</sup>

**Absceso periodontal:** es una infección localizada purulenta de los tejidos periodontales, cursa con dolor e inflamación localizada por el repentino paso de bacterias a la pared blanda de la bolsa periodontal. Los tejidos involucrados son la raíz del diente, con depósitos de cálculo y placa bacteriana, y la pared interna de la bolsa. Cuanto más profunda sea ésta, más posibilidades hay de que se produzca el desequilibrio entre la microflora bacteriana de la bolsa y las defensas del huésped dando origen al absceso,<sup>43,45,46</sup> estas patologías si no se identifican por los diferentes medios de diagnóstico, pueden exacerbarse durante la travesía en el espacio, acompañándose de inflamación y dolor.

En este desequilibrio pueden influir factores locales como la eliminación incompleta del cálculo y placa bacteriana de la superficie radicular durante el tratamiento periodontal. También influyen anomalías anatómicas como perlas de esmalte, surcos de desarrollo, furcas de molares muy invaginadas, maloclusiones, la impactación de alimentos o cuerpos extraños.<sup>24</sup>



**Figura 25.4.** Hallazgos durante la toma de radiografía dentoalveolar (periapical) en la que se identifica zona radiolúcida en el periápice del incisivo lateral superior derecho, a la exploración clínica no se apreciaba alteración de tejidos blandos ni manifestaba dolor el paciente al momento de la percusión vertical y horizontal.

Al identificar la microflora predominan bacilos gramnegativos (66.2%), negropigmentados y anaerobios estrictos<sup>5,6,12</sup> como *Porphyromonas gingivalis* (55 a 100%) y *Prevotella intermedia* (25 a 100%). También son frecuentes otros patógenos anaerobios como *Fusobacterium nucleatum* (44 a 65%)<sup>24,44,46</sup> (Figura 25.4).

## Hiperplasias de tejidos blandos

Las hiperplasias de los tejidos blandos bucales son inflamaciones o masas generadas por un aumento de tamaño de un órgano o tejido, a causa del aumento de células, ya sea de tejido epitelial o conjuntivo; en boca su etiología puede ser por traumatismos, irritación, como una respuesta al estímulo presentando aumento de volumen en la encía, y labios.<sup>47</sup> El astronauta debe evitar morder labios, lengua o carrillos en momentos de alta tensión (estrés).

## Hiperplasias reactivas y tumores de tejidos blandos

Los tumores de tejidos blandos son entidades que se caracterizan por un crecimiento anormal en la boca o lengua con poca probabilidad de extenderse a otras partes del cuerpo; los tumores benignos de la boca o lengua generalmente se presentan solos y crecen muy lento durante un periodo de entre 2 y 6 años, pueden aparecer en labios, encía, paladar, piso de la boca o lengua.

Los signos y síntomas más frecuentes son: abultamiento en cualquier parte de la boca o lengua, puede presentar úlceras y sangrar, e interferir con la adhesión adecuada de las prótesis dentales parciales o totales.<sup>48</sup>

Las hiperplasias reactivas de tejidos blandos se pueden presentar por infecciones, traumatismos del orden físicos y químicos o reacciones alérgicas; normalmente tienen una aparición

rápida y pueden fluctuar de tamaño, con una posible regresión; suelen ser sensibles o dolorosas. La superficie de la lesión puede manifestar desde un color azul o morado, hasta un color normal; estas lesiones reactivas se asocian con ganglios linfáticos sensibles y manifestaciones sistémicas, como la fiebre y el malestar. La tripulación tendrá cuidado en no lesionar el tejido blando de la boca con cuerpos extraños o hábitos parafuncionales.<sup>49</sup>

Algunas lesiones hiperplásicas reactivas son: mucocele (fenómeno de extravasación salival), sialometaplasia necrosante, abscesos periodontales, abscesos radiculares (periapicales), hiperplasia fibrosa, hiperplasia papilar inflamatoria.<sup>50</sup> El tratamiento más adecuado, una vez identificada la hiperplasia, es retirar el agente causal, y de ser posible, realizar una biopsia y estudios histopatológicos para identificar su naturaleza benigna o maligna.

## Quiste periapical

El quiste periapical o quiste radicular es la lesión pulpoperiapical más frecuente, se clasifica como inflamatorio por considerarse que el crecimiento del componente epitelial está desencadenado por productos inflamatorios y es odontogénico porque se origina de los restos epiteliales de Malassez de las células del ligamento periodontal, que a su vez son restos de la vaina radicular de Hertwig (epitelios interno y externo del esmalte).<sup>51</sup>

Es producido por fenómenos inflamatorios progresivos asociados con la invasión bacteriana, la muerte y degradación de la pulpa dentaria, que posteriormente será un granuloma dental; se presenta en ambos sexos, sin preferencia de edad, es asintomático y levemente doloroso a la percusión dental vertical. Los quistes radiculares se originan de granulomas periapicales, produciendo una cavidad con líquido revestida de epitelio, signos clínicos según su evolución, podría presentar aumento del volumen en las corticales y producir adelgazamiento de éstas.<sup>52</sup>

Radiográficamente presenta una imagen radiolúcida redondeada delimitada, en la zona apical de un órgano dental o varios. El tratamiento conservador sería realizar tratamiento de conductos en los dientes involucrados, abordaje quirúrgico para realizar el curetaje y eliminación del tejido patológico, apicectomía y obturación retrograda.

## Xerostomía parcial

La xerostomía, también denominada boca seca o hiposialia, es una sensación de sequedad de la boca, alteración que afecta a las glándulas salivales, que pueden ser lesiones reactivas y obstructivas, por infecciones, trastornos inmunopatológicos y neoplasias (cáncer). Pueden presentarse con aumento de volumen y sintomatología dolorosa o con tumefacción y sin dolor.<sup>11-14,21</sup>

Se genera por la estenosis o angostura en la luz de un conducto, o por la segmentación del mismo, con acúmulo de mucina llamada sialolitiasis; esta obstrucción en la salida de saliva de una glándula mayor, se presenta principalmente por el depósito de masas calcificadas en la luz del conducto de excreción. Esta mineralización (la composición de cálculos de sales de calcio, en menor porcentaje magnesio, amonio, carbonato y materia orgánica) puede incluir células epiteliales exfoliadas, moco, e incluso colonias de microorganismos. El 75 % afecta a la glándula submandibular debido a la anatomía del conducto de Wharton y a la alcalinidad de la saliva, seguida de la glándula parótida y la glándula sublingual.<sup>21,53,54</sup>



Epidemiológicamente, la sialolitiasis corresponde a 30 % de la patología salival, es más frecuente en los adultos entre 30 y 60 años, con un ligero predominio en los varones, el tratamiento definitivo es la eliminación del cálculo, muchos pueden eliminarse mediante manipulación manual del cálculo a través del orificio del conducto principal.<sup>55</sup>

Los factores de riesgo en el desarrollo de los cálculos salivares son:

**Factor bioquímico:** saliva con incremento de iones de calcio (Ca) y fosfato (PO<sub>4</sub>), un pH alcalino y formación de matriz orgánica

**Factor infeccioso. Factor mecánico:** alteración en el trayecto y forma del conducto de Warthon e hiposialia.

Otro factor a considerar para el desarrollo de la xerostomía es la exposición a la radiación producida por equipos, maquinaria o por los rayos espaciales, principalmente a gran altura, estas radiaciones pueden afectar a las glándulas salivales en la generación de la cantidad y calidad.<sup>56</sup>

La mayor exposición acumulada de radiación se da en los grupos de personas que mantienen una ocupación como los pilotos, asistentes de vuelo, astronautas, personal médico o los encargados del departamento de imagenología (rayos X), o quienes trabajan dentro o cerca de una planta de energía nuclear, personal que manipula material radioactivo. La exposición a la radiación ionizante puede aumentar las probabilidades de desarrollar algún tipo de cáncer, que depende de cuanta radiación recibió y la edad a la que se expuso.<sup>56</sup>

La radiación de zonas expuestas del cuerpo altera las funciones de los órganos, hay ciertos factores que influyen en este tipo de lesiones, como la dosis total, la velocidad de administración de la dosis, la cantidad de tejido radiado, la sensibilidad celular y la edad de la persona que recibe la radiación; en estos casos se debe evitar la radiación en pequeñas zonas como es la cavidad bucal, que además es una zona muy vascularizada, ya que el efecto acumulativo a largo plazo pudiera manifestarse como daños en la mucosa de la boca, una membrana húmeda que reviste la cavidad oral, altamente susceptible al efecto de la radiación sobre ella provocando alteraciones que van de leve a grave.<sup>56</sup>

La radiación puede provocar afectaciones locales en boca como: mucositis (alteraciones de la mucosa); inicialmente se observa un enrojecimiento de la mucosa bucal que ocasiona ligeras molestias, según aumenta la dosis recibida, comienzan a aparecer pequeñas heridas en la mucosa (aftas), por lo general muy molestas y podrían requerir tratamiento médico específico; estas alteraciones desaparecen tras finalizar la exposición a la radiación.

Infección por micosis, debido a la alteración de la mucosa y disminución de la saliva por la radiación, puede producir una infección por hongos.

Alteración de las glándulas salivales, la radiación destruye las células que forman dichas glándulas por lo que disminuye la calidad y cantidad de saliva segregada, dando como resultado una boca seca (xerostomía), alterando el sentido del gusto por efecto de la radiación sobre las papilas gustativas.

Cuando la radiación pasa por las glándulas salivales se producen alteraciones en el volumen, viscosidad y pH, así como de los componentes orgánicos e inorgánicos de la saliva, estos cambios predisponen un aumento de caries y enfermedad periodontal. La recuperación de la función salival es leve, el riesgo de caries y enfermedad periodontal es alto, por lo que debe iniciarse un programa de prevención a base de flúor, profilaxis y reforzar la higiene bucal para mantenerla en excelentes condiciones.<sup>57</sup>

## Dolor articular

Los candidatos para calificar a astronautas y los mismos astronautas, previo a las misiones espaciales, se someten a rigurosos entrenamientos para desarrollar habilidades de adaptación y fortalecer la capacidad física y psicológica, durante este tiempo destinado a su preparación teórica y práctica en el uso de los equipos, materiales, así como en las propias aeronaves y simuladores, mantienen presente que una equivocación en el curso de una misión, por mínima que sea, puede perderse la gran inversión realizada y hasta vidas humanas, todo esto origina estrés a niveles muy elevados. Los astronautas están sujetos a presiones extremas y aplican una máxima concentración para llevar a cabo las misiones espaciales en las que depende mantener la integridad y supervivencia de toda la tripulación.

El estrés genera apretar los dientes de manera involuntaria durante la conciencia al momento de realizar alguna actividad, o durante el sueño, a este evento se le denomina *bruxismo*. Provoca afectación del aparato estomatognático en sus diferentes componentes manifestándose como: odontalgia, cefalea y mialgia en la región de la cabeza y cuello. El aparato estomatognático está constituido por dientes, músculos, huesos, articulaciones y ligamentos, este conjunto de órganos permite realizar expresiones faciales, así como de las funciones fisiológicas de: hablar, comer, deglutir, sonreír, respirar, entre otras.<sup>58,59</sup>

La articulación temporomandibular (ATM) se compone de: fosa o cavidad mandibular (hueso temporal), cóndilo mandibular (mandíbula), disco articular, cápsula articular y sinoviales (membranas de tejido conectivo, ricamente vascularizado y líquido sinovial, que lubrica la articulación), la ATM puede alterarse e indicar dolor por una restauración con puntos prematuros de contacto modificando la oclusión dental, por bruxismo y por estrés. Los músculos de la masticación pueden contraerse y también refieren dolor (mialgia), presentándose desde un aumento en la percepción, hasta un dolor intenso y fuerte, acompañado de una limitación de los movimientos de la mandíbula y ruidos como el chasquido.<sup>2,3,58-62</sup>

El diagnóstico oportuno de los factores de riesgo, como hábitos parafuncionales, pérdida de dientes prematuramente, interferencias oclusales, así como el estrés y bruxismo, evitará el dolor articular, el dolor en músculos de la masticación, músculos del cuello como el esternocleidomastoideo, en algunos otros episodios hasta el trapecio, y la región occipital. Muchos síntomas relacionados con la ATM son causados por efectos del estrés físico y emocional sobre las estructuras de la articulación, músculos de la masticación, de cabeza y cuello, ligamentos, vasos sanguíneos y nervios cercanos, así como los dientes.<sup>2,3,58-62</sup>

Los componentes de los dientes como el esmalte, puede sufrir fracturas por la fuerza ejercida con el bruxismo, perdiendo continuidad de esta capa, queda expuesta la dentina en la que se encuentran terminaciones nerviosas que transmiten la hipersensibilidad a diferentes estímulos como los físicos, químicos y cambios térmicos.

## Bruxismo

El bruxismo se entiende como la acción involuntaria de apretar los dientes, produciendo daño en la estructura de los mismos, por el acúmulo de estrés que es el principal factor de riesgo para que se origine el bruxismo, afectando de forma directa a la salud bucodental.<sup>61</sup>

El bruxismo es un trastorno parafuncional que consiste en “rechinar” o apretar los dientes con fuerza excesiva con movimientos de lateralidad de la mandíbula, presentándose más

frecuentemente durante el periodo del sueño, sin omitir que durante actividades de suma concentración y derivado de la importancia de la misma durante los viajes espaciales, podrían también generar apretar los dientes o durante el esfuerzo físico en un entrenamiento. Se identifica el daño cuando se observan en los dientes faceta de desgaste en la corona dentaria a nivel del tercio incisal o en las caras oclusales, asociado o no a sonidos perceptibles, contractura o dolor en los músculos masticatorios y disfunción de la ATM.<sup>60,61,63,64</sup>

Las consecuencias del bruxismo se manifiestan con: *abrasión* (se ha relacionado también con una mala técnica de cepillado agresiva, o por el tipo de cerdas del cepillo dental). *Atrición* (desgaste mecánico limitado a las superficies de contacto oclusales), se da de manera fisiológica, cuando contactan las superficies de los dientes durante el proceso de la masticación y con los años, es normal observar ese desgaste en las caras oclusales principalmente, a diferencia de que puede ser leve el desgaste hasta en exceso en las cúspides, se podría pensar en una atrición patológica, normalmente causada por el bruxismo.

*Abfracción* dental (desgaste dentario en la región cervical o cuello del diente, donde se ve afectada la unión amelocementaria por carga oclusal), la palabra abfracción dental es una microfractura mecánica de la estructura de los dientes, en un estudio donde se analizaron las diferentes fuerzas a las que el diente puede ser sometido, se demostró que el mayor estrés lo recibe la zona cervical, siendo así más propensa a la abfracción por las fuerzas verticales y posiciones de tracción; el tratamiento de lesiones cervicales debe ser la eliminación o control de la etiología del problema, que incluso pueden estar asociadas con afecciones periodontales y musculoesqueléticas.<sup>63,65</sup>

Otras alteraciones en la estructura dental se han identificado como: fracturas dentarias, provocadas por las fuerzas ejercidas sobre las piezas dentales que tiende a fracturar el esmalte. Hipersensibilidad dentaria, sensación intermitente por el contacto con alimentos o bebidas fríos o calientes. Problemas periodontales, con estudios de imagenología se puede apreciar alteraciones en el espacio del ligamento periodontal. Mialgia del masetero y temporal, unilateral o bilateral, por la contracción muscular o puede presentarse sin dolor debido a la capacidad de adaptación<sup>66,67</sup>

En los casos de bruxismo el tratamiento de elección son las férulas o protector bucal con una efectividad de 70 a 90 % en la reducción de los síntomas, además de lograr controlar el constante desgaste de las superficies dentarias<sup>66</sup>

## Hipersensibilidad

Se entiende como dolor agudo, inducido por el contacto con alimentos y bebidas frías o calientes principalmente.<sup>30</sup> Estudios realizados demuestran que entre 9 y 30 % de la población adulta padece de hipersensibilidad, frecuentemente se presenta entre 20 a 30 años de edad, sin distinción de género, a partir de los 40 años hay una disminución de esta sintomatología debido probablemente a cambios escleróticos en los túbulos dentinarios, cuyo diámetro disminuye gradualmente con la edad resultando en una reducción en el movimiento del fluido dentinario e hipercalcificación de los espacios pulpares.<sup>31</sup>

La hipersensibilidad más común es al frío siendo más frecuente encontrarla en los dientes caninos (25 %), luego en los premolares (24 %), observándose más en las caras vestibulares (93 %) y generalmente asociadas a recesiones gingivales (68 %); la diferenciación entre un diente y otro está relacionada con el espesor de la dentina y el esmalte.<sup>30</sup>

Se ha demostrado que las superficies hipersensibles es dentina expuesta principalmente por retracción gingival, abrasión, abfracción, terapéutica periodontal (en el tratamiento de alisado puede



**Figura 25.5.** Ortopantomografía (radiografía panorámica digital) de paciente masculino de 27 años, se observa la cercanía del piso del seno maxilar (SM) a los ápices de los premolares y molares superiores.



**Figura 25.6.** Se pueden observar en los dientes anteriores, áreas incisales afectadas, así como zonas de las cúspides bucales de los premolares con pérdida de esmalte y dejando al descubierto la dentina por el bruxismo.

perderse el cemento radicular), restauraciones defectuosas o caries.<sup>31,40,68</sup> Así como preparaciones de dientes para su rehabilitación y las técnicas de blanqueamiento dental (provocando desecación, deshidratación por la presión de aire, cambios en la osmolaridad, de temperatura y pH).

La hipersensibilidad se manifiesta también sobre las caras oclusales que han perdido parcial o totalmente esmalte debido al bruxismo.<sup>69,70</sup> La intensidad de la hipersensibilidad es subjetiva, cada persona puede referir desde una leve molestia intermitente hasta un dolor intenso y constante, afectando en muchos casos la calidad de vida, frecuencia en hábitos de higiene bucodental e incluso modificar la ingesta de alimentos (Figuras 25.5 y 25.6).

## Erosión

La erosión se define como la pérdida patológica en la estructura dentaria (esmalte y dentina), causada por un agente químico cuyo pH sea inferior a 5.5, provocando hipersensibilidad u odontalgia, e incluso puede alterar la estética de los dientes. Es multicausal, puede deberse al contacto de las superficies de los dientes con ácidos intrínsecos o extrínsecos o por la combinación de éstos.<sup>37</sup>

La erosión intrínseca es causada por ácidos gástricos que incluye reflujo gastroesofágico y vómito recurrente como parte de cuadros de desórdenes alimentarios, cinetosis (mareos), cefalea, migraña, ansiedad, estrés, bulimia, anorexia, quimioterapia, radioterapia y cáncer.<sup>30,34,35,37</sup> Desgastando en mayor porcentaje las caras palatinas de los dientes anteriores superiores. A pesar de todo el entrenamiento recibido, los astronautas pueden experimentar náusea, vómito y mareos durante el simulacro o el despegue en una misión.

Los ácidos extrínsecos, derivados de cítricos, bebidas carbonatadas, bebidas alcohólicas, y algunos medicamentos como vitamina C.<sup>3-5</sup>

## Dientes incluidos o impactados

Los dientes incluidos o impactados son aquellos dientes cuya erupción es parcial o totalmente obstruida por tejido óseo o bien por otros dientes, pueden ser:

*Retención (no erupción):* detención total o parcial de la erupción de un diente dentro del intervalo de tiempo esperado en relación con la edad del paciente. Puede estar íntegramente rodeado por tejido óseo (retención intraósea) o estar cubierto por la mucosa gingival (retención subgingival). El diente no ha perforado la mucosa y no ha adquirido su posición normal en la arcada dentaria, incluye tanto los dientes en proceso de erupción como los dientes impactados.<sup>71,72</sup>

*Impactación:* detención total o parcial de la erupción de un diente dentro del intervalo de tiempo esperado en relación con la edad del paciente, por interferencia o bloqueo del trayecto normal de erupción de la pieza debido a la presencia de un obstáculo mecánico, otros dientes, hueso de recubrimiento excesivamente denso, fibrosis, exceso de tejidos blandos. El saco pericoronario puede estar abierto en boca o no.

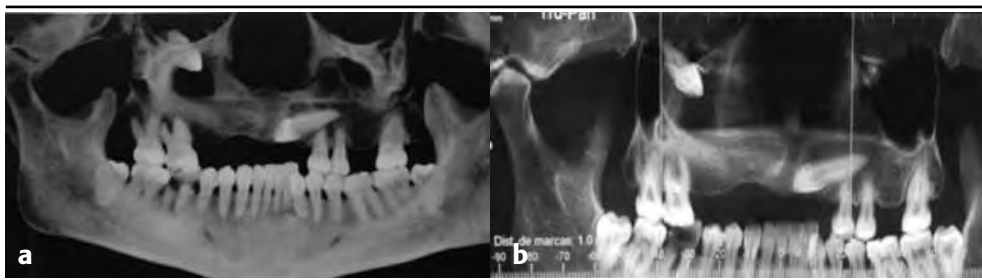
*Inclusión:* detención total de la erupción de un diente dentro del intervalo de tiempo esperado en relación con la edad del paciente por interferencia o bloqueo del trayecto normal de erupción de la pieza debido a la presencia de un obstáculo mecánico. Éste queda retenido en el hueso maxilar rodeado aun de un saco pericoronario intacto, con o sin patología asociada.<sup>73,74</sup>

*Malposición o ectopia:* se refiere al diente incluido en una posición anómala pero cercana a su lugar habitual. La *heterotopia* es una inclusión en una posición irregular pero más alejada de su localización normal (órbita, seno maxilar, proceso coronoideo, cóndilo mandibular).<sup>74</sup>

Estas anomalías en la posición de dientes se ven con mayor frecuencia en los terceros molares inferiores (35 %) y caninos superiores (34 %) [Figuras 25.7 a 25.9].

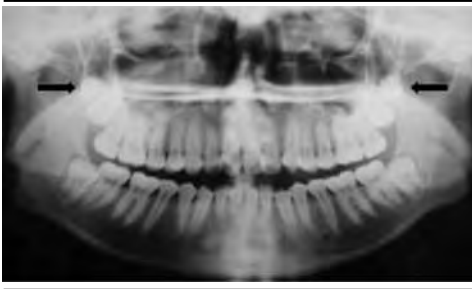
## Consideraciones

El propósito de un entrenamiento permite a los astronautas exponerse a diferentes variables al estar en una misión, para aminorar efectos relacionados con la gravedad, el tiempo de exposición a la ra-



**Figura 25.7.**

**a**, Imagen de tomografía computada y **b**, radiografía panorámica con la que se ejemplifica la heterotopia dental, se observa incluido el canino superior derecho en piso de órbita, y canino izquierdo no erupcionado, en un paciente femenino de 32 años de edad, cuando se realizaban estudios para el diagnóstico y viabilidad de la rehabilitación con implantes y prótesis.



**Figura 25.8.**  
Radiografía panorámica que revela la presencia de cuartos molares superiores en ambos lados, hallazgos durante estudio preoperatorio en paciente masculino de 26 años de edad.



**Figura 25.9.**  
Radiografía panorámica en la cual se observa canino inferior derecho incluido en zona de molares, paciente femenino de 24 años.

diación y la capacidad de adaptación durante el tiempo que se mantendrán en órbita. Los astronautas deben gozar de una condición física y mental superior al promedio, los entrenamientos deben de programarse para fortalecer el aspecto físico y las habilidades mentales, así como el manejo del estrés.

El mantener el estado físico en óptimas condiciones, también requiere de revisiones y evaluaciones para identificar alteraciones de manera prematura. La cavidad bucal no se encuentra fuera de esta exploración física, la cual debe ser constante y con ello en medida de las posibilidades intervenir para que no se agrave el daño. La tripulación que estará en órbita debe de tener capacitación orientada a ofrecer ayuda entre los integrantes, para resolver los padecimientos que se identifiquen.

En los entrenamientos los astronautas se enfrentan a situaciones recreadas, antes del lanzamiento, durante el despegue, el manejo de equipo, materiales e instrumentos, acoplamientos, salida de la órbita, aterrizaje y otros protocolos que deben seguir. Uno de los protocolos que conocerán, será el de atención médica y odontológica, siendo éste de los más importantes para que la misión tenga éxito, sobre todo en mantener la integridad física de los que participan en esas excursiones.

Realizar una historia clínica completa no sólo ayuda a establecer el diagnóstico, sino que también proporciona información sobre la susceptibilidad del paciente y su reacción a los procesos infecciosos, sangrado, medicamentos prescritos, así como su estado emocional. Para poder dar un diagnóstico, es esencial realizar un examen clínico en el cual es de suma importancia el interrogatorio o anamnesis, que efectúa en el paciente con la finalidad de obtener antecedentes de salud.

## Recomendaciones

Los astronautas deberán realizarse exámenes médico-odontológicos. Todos serán sometidos a una exploración clínica y radiográfica minuciosa para identificar cualquier alteración y llevar a cabo un plan de tratamiento adecuado, así continuar con su preparación para los viajes (exploración física por zonas, labios, mucosa, paladar, piso de boca, istmo de las fauces, glándulas salivales, ATM, lengua).

Bajo los siguientes objetivos: obtener y conservar una óptima salud bucal, dental y periodontal. Identificar y eliminar con excelente pronóstico y baja posibilidad de recidiva cualquier

foco de infección crónico o agudo. Detectar cualquier alteración potencial que pudiese desencadenar procesos inflamatorios y/o infecciosos. Inicialmente a la tripulación que se le identifique caries incipiente será sometido a operatoria dental para eliminar todo tipo de caries.

## Alternativas de tratamiento

**Tejidos dentales:** la extracción dental será preferible, cuando la destrucción cariosa sea extensa y que reduzca las posibilidades de éxito con la operatoria.

**Periodontal:** dientes con periodonto dudoso, con enfermedad avanzada, compromiso de furca, o que muestren complicaciones endoperiodontales, estará indicada su extracción.

**Patología pulpar:** todo diente con procesos inflamatorios pulpares será necesario el tratamiento de conductos; pero en dientes endodónticamente desfavorables o con lesiones periapicales estables, conductos curvos y sin posibilidad de éxito, lesiones periapicales crónicas o recidivantes, perforaciones y otras condiciones donde se prevea que la manipulación endodóntica es complicada o de resultados impredecibles estará indicada la extracción.

**Articulación temporomandibular:** todo paciente será sometido a una exploración clínica y radiográfica del funcionamiento temporomandibular. Deberá explorarse la presencia de ruidos como chasquidos o crepitación, así como dolor articular, el desequilibrio funcional proinflamatorio denotará gran importancia debido a que los trastornos articulares son progresivos y de igual modo son originados por diversos factores, como el estrés, ansiedad, bruxismo, cambios hormonales, alteraciones de la oclusión, interferencias oclusales, entre otros.

**Trauma oclusal:** deberá detectarse cualquier tipo de trauma oclusal, puntos prematuros de contacto y bruxismo, los cuales pudiesen desencadenar alteraciones inflamatorias del tejido de soporte del diente.

**Tejidos blandos:** se deberá valorar y explorar mucosas intraorales y tejidos peribucales en busca de lesiones primarias y/o secundarias, como úlceras, nódulos, pápulas, máculas, vesículas, de tal modo que se descarte alguna patología sistémica con manifestaciones clínicas bucales así como procesos inflamatorios y/o infecciosos bacterianos, virales y fúngicos. En caso de detectar algún tipo de lesión en tejido blando debemos establecer la etiología y brindar un tratamiento hasta la remisión de las lesiones.

**Glándulas salivales:** deberá realizarse una exploración detallada del funcionamiento glandular salival, identificando o no la presencia de patologías, a través de palpación bimanual en busca de dolor, aumento de volumen, tumoraciones y determinar el adecuado gasto de saliva.

Protésicamente cualquier procedimiento con aparatología fija, debe ser colocado con suficiente tiempo como para evaluar la respuesta endodóntica y periodontal de los dientes pilares. Vigilando que hayan sido controlados los focos de infección e inflamación de cualquier origen en el organismo, incluidos los bucodentales y establecido un programa estricto de control personal de placa dentobacteriana, el astronauta estará en las mejores condiciones.

La tripulación deberá ser entrenada o adiestrada para hacer frente a los procedimientos de emergencia médico-odontológicos, la capacitación será con base al manejo y aplicación de fármacos, como antimicrobianos y analgésicos, administración de anestésicos locales, indicaciones de restauraciones temporales, o para cementar prótesis, tratamientos cuando haya exposición pulpar, extracción dental, apoyándose del equipo interdisciplinario desde la base en tierra para su orientación en el manejo de las eventualidades hasta el regreso a la Tierra.

En México existe un gran atraso en materia de medicina espacial, por lo que es necesario involucrar a los profesionistas del área de salud en programas de prevención y atención a pilotos y tripulación, con ello motivar y fomentar la investigación con el objetivo de que México participe y contribuya en el desarrollo de esquemas para mejorar la salud de los astronautas en incursiones espaciales.

# Referencias

1. World Health Organization. Frequently asked questions. [Online]; 2016 [consultado: 12 abril 2016]. Disponible en: <http://www.who.int/suggestions/faq/es/>.
2. Higashida HBY. Odontología preventiva. 2a ed. México: McGraw-Hill; 2009.
3. Harris ON, García-Godoy F. Odontología preventiva primaria. 6a ed: México: El Manual Moderno; 2005.
4. González S, Machuca P, Bullon F. Hipótesis fisiopatológicas de las barodontalgias. *Med Oral*. 2009 Abril;19(3): p. 180-201.
5. Amézcuca LG. Ambiente atmosférico y de cabina. Medicina aeronáutica para el medico de familia.
6. Gómez F, Campos M. Histología, embriología e ingeniería tisular bucodental. 3a ed. México: Ed. Médica Panamericana; 2009.
7. Nanci A. Ten Cate oral Histología. 8a ed. Madrid: Elsevier; 2014.
8. Carranza, Newman, Takei, Klotfeld. Periodontología clínica. Amolca; 2014: p. 60-80.
9. Juárez RP, Celia AC. Rol de la saliva en la homeostasis de la cavidad bucal y como medio de diagnóstico. *Revista Dental de Chile*. 2015;106 (2): p. 15-18.
10. Walsh LJ. Aspectos clínicos de biología salival para el Clínico Dental. *Revista de Mínima Intervención en Odontología*. 2008;1(1).
11. Sánchez-Martínez PM. La saliva como fluido diagnóstico. Educación continuada en el laboratorio clínico: *Cont Lab Clín*; 2012-2013.
12. Mohammad A, Ahad S, Durand, Simon D. Saliva as a diagnostic tool for oral and systemic diseases. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2016 Enero-Abril; 6(1): p. 67-76.
13. Belstrøm D, Holmstrup P, Bardow A, Kokaras A, Fiehn NE, Paster B. Temporal stability of the salivary microbiota in oral health. *Plos ONE*. 2016;11(1).
14. Llena PC. La saliva en el mantenimiento de la salud oral y como ayuda en el diagnóstico de algunas patologías. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*. 2006;11: p. 449-55.
15. Balwant R, Jasdeep K, Bernard H F. Evaluation by an aeronautic dentist on the adverse effects of a six-week period of microgravity on the oral cavity. *International Journal of Dentistry*. 2011.
16. Dogan O. Dental caries : The most common disease worldwide and preventive strategies. *Int J B*. 2013; 5(4): p. 55-61.
17. Castellanos SL, Díaz GM, Gay ZÓ. Medicina en Odontología. México: El Manual Moderno; 2015.
18. Del Rosario PM. Radiación ionizante y salud. *Revista de Salud Ambiental*. 2010;10: p. 1-3.
19. Organización Mundial de la Salud. OMS. [Online]; 2016 [consultado: 12 abril 2016]. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>.
20. Ibañez MNG. Hiposalivación/xerostomía. *Med Oral*. 2011 Junio;2: p. 58-64.
21. National Institute of Dental and Craniofacial Research. National Institute of Dental and Craniofacial. [Online]; 2012 [consultado: 13 abril 2016]. Disponible en: [http://www.nidcr.nih.gov/Espanol/SaludOral/Complicaciones/Documents/HeadAndNeckRadTreatment\\_060713\\_508c.pdf?\\_ga=1.28833020.1590693910.1463023175](http://www.nidcr.nih.gov/Espanol/SaludOral/Complicaciones/Documents/HeadAndNeckRadTreatment_060713_508c.pdf?_ga=1.28833020.1590693910.1463023175).
22. Matta-Valdivieso E, Alarcon-Palacios M, Matta-Morales C. Espacio biológico y prótesis fija: Del concepto clásico a la aplicación tecnológica. *Rev Estomatol Herediana*. 2012;22(2): p. 116-120.
23. Argüello RGF. Diagnóstico pulpar. *Odontología Clínica*. p. 10-17.
24. Merino. Absceso periodontal-absceso endodóncico. *Gaceta Dental*. 2013;246: p. 117.
25. Stephen C. Vias de la pulpa. España: Elsevier; 2011.
26. Zadik Y. Aviation dentistry: current concepts and practice. *British Dental Journal*. 2009;206(1): p. 11-6.
27. Zadik Y, Zapnick L, Goldstein L. In-flight barodontalgia: analysis of 29 cases in military aircrew. *Aviat Space Environ Med*. 2007 June;78(6): p. 593-6.
28. Bobbio AS, Ghersi M, Hernández A. Manejo farmacológico coadyuvante al tratamiento endodóncico. *Revista Estomatológica Herediana*. 2011 Abril;21(2): p. 110-5.
29. Miranda N, Martín R, Hidalgo G, Betancourt V. Comportamiento epidemiológico de los tratamientos pulporradiculares. *Archivo Médico de Camagüey*. 2007;11(1).
30. Ardila M. Hipersensibilidad dentinal: Una revisión de su etiología, patogénesis y tratamiento. *Avances en Odontostomatología*. 2009;25(3): p. 137-46.
31. Tortolini P. Sensibilidad dentaria. *Avances en Odontostomatología*. 2003;19(5): p. 233-7.
32. Fresno MC, Angel P, Arias R, Muñoz A. Grado de acidez y potencial erosivo de las bebidas energizantes disponibles en Chile. *Rev Clin Periodoncia Implantol Rehabil Oral*. 2014;7(1): p. 5-7.
33. Sauro S, Mannocci F, Watson TF, Sherriff M, Mongiorgi R, Piemontese M. The influence of soft acidic drinks in exposing dentinal tubules after non-surgical periodontal treatment: A SEM investigation on the protective effects of oxalate-containing phytocomplex. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*. 2007 Nov;12(7): p. 542-8.
34. Ochoa GL, OD, T dL. Principales repercusiones en la cavidad oral en pacientes con anorexia y bulimia. *Odontológica Mexicana*. 2008 Marzo;12(1): p. 46-54.
35. Ochoa GL, OD, T dL. Principales repercusiones en la cavidad oral en pacientes con anorexia y bulimia. *Odontológica Mexicana*. 2008;12(1): p. 46.
36. Reyes-Gasga H. Observación del esmalte dental humano con microscopía electrónica. *Tamé*. 2013;1(3): p. 90-6.
37. Navarro C, Rivera Á. Hipersensibilidad dentinaria. *Dental de Chile*. 2002;93(2): p. 20-4.
38. Yehuda Z. Barodontalgia: what have we learned in the past decade? *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2010;109: p. 65-9.



39. Patricia E, Alfaro M. Fuerza de mordida: su importancia en la masticación, su medición y sus condicionantes clínicos. *ADM*. 2012 Marzo-Abril;LXIX(2): p. 53-57.
40. Lakshmi D. Aviation dentistry. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*. 2014 Mar;8(3): p. 288-90.
41. Zadik Y, Einy S, Pokroy R, Dayan Y, Goldst L. Dental fractures on acute exposure to high altitude. *Aviation*. 2006;77(6).
42. Lalitagauri M, Shagun G. Aviation dentistry: New horizon, new challenge. *Int J Contemp Dent Med Rev*. 2015: p. 4.
43. Martínez M. Absceso periodontal-absceso endodóncico. *Gaceta Dental*. 2013 Abril 8.
44. Peña SM, Peña SL, Díaz FA, Ceiruz D, Lao SN. La enfermedad periodontal como riesgo de enfermedades sistémicas. *SciELO*. 2008;45(1).
45. Pérez-Salcedo L, Bascones-Martínez A. Formas agudas de periodontitis. *Avances en Periodoncia e Implantología*. 2008;20(1): p. 49-58.
46. Jaramillo A, Arce R, Herrera D, Betancourth M, Botero J, Contreras A. Clinical and microbiological characterization of periodontal abscesses. *Journal Clinical of Periodontology*. 2005;32: p. 1213-18.
47. Neville B, Damm D, Allen C, Bouquet J. *Oral & maxillofacial pathology*. 2nd ed. Philadelphia: Saunders WB; 2002.
48. Regezi JA SJJR. *Patología oral: Las correlaciones clínicas patológicas*. 4th ed. Philadelphia: WB Saunders; 2003.
49. Sapp J, Eversole L, Wysocki G. *Contemporánea patología oral y maxilofacial*. 2a ed. Mosby; 2003.
50. Woo SSS. Las úlceras aftosas recurrentes: Una revisión del diagnóstico y tratamiento: *JADA*; 1996.
51. Wood N, Goaz PW. *Diagnóstico diferencial de lesiones orales y maxilofaciales*. 5th ed. Madrid: Harcourt Brace; 1998.
52. Regezi JA. *Patología bucal*. México: Interamericana; 1991.
53. Yiu A, Kalejaiye A, Amdur R, Tood HH, Bandyopadhyay B. Association of serum electrolytes and smoking with salivary gland stone formation. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2016 Marzo;45(6): p. 764-8.
54. Ge N, Peng X, Zhang L, Cai Z, Guo C, Yui G. Partial sialoadenectomy for the treatment of benign tumours in the submandibular gland. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2016 Junio;45(6): p. 750-5.
55. Torres LD, Barranco PS, Serrera FÁ, Hita IP, Martínez-Sahuquillo MA, Gutiérrez PJJL. *Medicina oral, Patología oral y cirugía bucal* (Internet). [Online]; 2006 [consultado: 10 marzo 2016]. Disponible en: [http://scielo.sci.ii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1698-69462006000100018&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sci.ii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1698-69462006000100018&lng=es&nrm=iso).
56. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU. Servicio de Salud Pública, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. [Online]; 1999 [consultado: 14 abril 2016] Disponible en: [www.atsdr.cdc.gov/es](http://www.atsdr.cdc.gov/es).
57. National Institute of Dental and Craniofacial Research. National Oral Health Information Clearinghouse. [Online]; 2012 [consultado: 14 abril 2016] Disponible en: <http://www.nidcr.nih.gov/espanol>.
58. Barreto JF. Sistema estomatognático y esquema corporal. *Colombia Médica*. 1999;30(4): p. 173-80.
59. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos. Institutos Nacionales de la Salud, Los trastornos de las articulaciones y de los músculos temporomandibulares. [Online]; 2013 [consultado: 16 abril 2016] Disponible en: <http://www.nidcr.nih.gov/espanol>.
60. González OH, López SF, Pérez NA. Prevalencia de disfunción de la articulación temporomandibular. *Revista Odontológica Mexicana*. 2016 Enero-Marzo;20(1): p. 8-12.
61. Alcolea RJR, Herrero EP, Ramón JM, Labrada SET, Pérez TM, Garcés LD. Asociación del bruxismo con factores biosociales. *Correo Científico Médico de Holguín*. 2014.
62. Okeson J. *Tratamiento de oclusión y afecciones temporomandibulares*. 3rd ed. Madrid: Mosby; 2009.
63. Fajardo SMC, Mafía CAC. Diagnóstico y epidemiología de erosión dental. *Salud UIS*. 2011 Agosto;43(2).
64. Chan RJ. En el conocimiento de la abfracción dental: ¿La etiología y el diagnóstico clínico? *Revista Científica Odontológica*. 2009;5(2): p. 77-84.
65. Matarrita AE, Sotela TP. Reporte de caso clínico: Tratamiento de abfracción a causa del bruxismo. *Revista electrónica de la Facultad de Odontología*. 2014;7(2).
66. Mallqui HLL, Hernández AJF. Traumatismos dentales en dentición permanente. *Revista Estomatológica Herediana*. 2012 Enero-Marzo;22(1): p. 42-9.
67. Braga AS, Piatto LD, Fagundes TFS, Serrato CB, Fernando GA, Pizzato E, et al. The relationship of a clinical protocol and emergency treatment success of dental trauma running head: clinical protocol in dental trauma. *RSBO Revista Sul-Brasileira de Odontología*. 2013 Octubre-Diciembre;10(4): p. 313-7.
68. Orit L, Yehuda Z, Shmuel E, Tarrasch R, Raviv G, Goldstein L. Bruxism in military pilots and non-pilots. Tooth wear and psychological stress. *Aviat Space Environ Med*. 2007 February;78(2).
69. Aldini AB, Ecco ST, Ioffi DC, Ongoni LS. Gnatho-postural treatment in an air force pilot. *Aviat Space Environ Med*. 2012 Mayo;83(5): p. 522-6.
70. Menon A. Review of spaceflight dental emergencies. *Medical Branch*. 2012 Sep.
71. Moreno G, Collado L, Monje G, Serrano G, Morillo S, Mateo A. Tercer molar ectópico a nivel de región infraorbitaria-seno maxilar. *Española de Cirugía Oral y Maxilofacial*. 2007;29(3): p. 173-7.
72. Corral I, Flores F. Prevalencia de inclusión dental y patología asociada en pacientes de la Clínica de la Facultad de Odontología Mexicali de la UABC. *Odontológica Mexicana*. 2005;9(2).
73. Arcas A. Opciones quirúrgicas en la fenestración de dientes incluidos. *Española de Ortodoncia*. 2001;31(2): p. 99-105.
74. Vargas M, Melendez A, Centeno S. Ectopia testicular: Evaluación y manejo de tres casos. *Mex Cir Ped*. 2004;18(3): p. 141-6.
75. Vicuña IM, Oyonarte WR. Asociaciones entre signos clínicos de bruxismo, ansiedad y actividad electromiográfica maseterina utilizando el aparato Bite StripR en adolescentes de cuarto medio. *Int J Odontostomat*. 2010;4(3): p. 245-53.

# 26. Cambios hematológicos en microgravedad.

## La fascinante aventura espacial

Agustín Omar Rosales Gutiérrez, Isis Espinoza de los Monteros Estrada

*“El carácter de los jóvenes se temple en la adversidad”.*

GUILLERMO HARO

*Astrónomo, investigador y académico mexicano.*

### ■ Introducción

A medida que se desarrolla la tecnología en la era espacial, aumenta la fascinación del hombre de conocer el bello, lejano e insondable Espacio, y que éste y sus innumerables misterios estén más cerca del conocimiento humano. El 12 de abril de 1961 un hombre rompió todas las barreras y borró los límites de lo posible: aquel día el cosmonauta soviético Yuri Gagarin realizó el primer viaje al espacio de la historia de la humanidad. Exactamente a las 9:07 h se dio la orden de encendido y dio comienzo el lanzamiento del cohete espacial Vostok-1, en el aire se escuchó la voz de Yuri Gagarin “*Poyejali*” (“*Vámonos*”), pasados 3 minutos el primer cosmonauta de la Tierra dijo: “Veo la Tierra, qué belleza”.

A las 9:21 h el cosmonauta entró en el estado de microgravedad, estaba sobrevolando el Continente Americano. En el cohete espacial Vostok-1 el teniente mayor Yuri Gagarin dio una vuelta a la órbita de la Tierra a una altitud de 302 kilómetros y una velocidad de unos 28 000 km/h. Fue el primer ser humano que pudo comprobar con sus propios ojos que nuestro mundo es redondo, azul y muy hermoso.

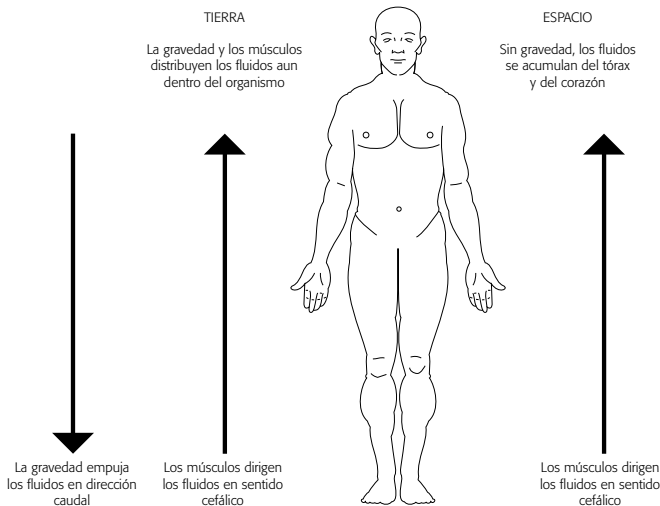
Los problemas de ingeniería asociados con el abandono de la Tierra y el desarrollo de sistemas de propulsión espacial han sido examinados en el siglo pasado, y millones de horas de investigación fueron invertidas en ellos. En años recientes, ha habido un incremento en la investigación sobre cómo los humanos pueden sobrevivir y trabajar en el espacio en un ambiente de microgravedad por largos periodos (al que Yuri Gagarin estuvo expuesto 108 min). Esta cuestión requiere ayuda de la física y biología, y se ha convertido en uno de los retos más grandes de cara a la exploración espacial. Un paso fundamental en la superación de este reto es tratar de entender los efectos y el impacto del viaje espacial largo en el cuerpo humano.

A continuación se exponen los puntos torales de los cambios del sistema hematológico ante el adverso estado de microgravedad.

# Microgravedad

La ingravidez se define como el estado en el que un cuerpo que tiene mucha fuerza es equilibrado por otra fuerza o sigue en caída sin sentir los efectos de la atmósfera. Cuando estamos de pie en nuestro planeta éste ejerce una fuerza igual y opuesta a la fuerza de gravedad, que nos empuja atrae hacia el centro del planeta. Lo que percibimos como peso es justamente la fuerza del planeta sobre nosotros, en cambio cuando un astronauta se encuentra en una nave espacial orbitando en el espacio, la fuerza que actúa sobre él es la gravedad (pero muy disminuida). La microgravedad es el estado en el cual la única fuerza que actúa sobre un cuerpo es la gravedad. Ese estado se logra durante una caída libre (en un precipicio, por ejemplo) o en una órbita alrededor de un planeta (como la órbita de las estaciones espaciales), que es una especie de caída perpetua. Por consiguiente, hablar de microgravedad es hacer referencia a un ambiente en el cual los efectos locales de la gravedad se hallan reducidos, no se elimina la fuerza de la gravedad en sí misma, contrario a lo que sucede en condiciones de “ingravidez” o “gravedad cero”. Un ambiente de microgravedad es aquel que imparte una aceleración de pequeña magnitud a un objeto en comparación a la ejercida por la Tierra.<sup>1,2</sup>

La mayoría de los sistemas corporales son afectados por la microgravedad, y el ser humano tiene que adaptarse a una superalteración de la fisiología normal, esta última es puesta a prueba en extremo. Durante los vuelos espaciales se producen diversas alteraciones similares a las que ocurren con el envejecimiento y con ciertas enfermedades. Se afecta al sistema vestibular, al sistema cardiovascular, al sistema musculoesquelético, al sistema hematológico y al inmunológico. Esto es una de las causas que detiene la posibilidad de vuelos espaciales largos. Por lo que la investigación avanza a pasos agigantados para resolver esta cuestión.<sup>3</sup> En la Figura 26.1 se observan los cambios hemodinámicos en microgravedad.



**Figura 26.1.**  
Cambios hemodinámicos en microgravedad.

## Cambios inmunológicos en microgravedad

Observaciones realizadas en astronautas basadas en su condición inmune después del despegue, muestran numerosos cambios, tales como: distribución alterada de la circulación leucocitaria, producción anómala de citocinas, disminución en la actividad de los linfocitos *natural killer* (NK), función deprimida de los granulocitos, activación abolida de los linfocitos T, niveles alterados de inmunoglobulinas, inmunidad viral específica alterada y respuestas neuroendocrinas alteradas. Un hecho común durante los vuelos espaciales es el incremento de los niveles de glucocorticoides y catecolaminas en la circulación, lo que podría mediar los cambios en el sistema inmune. La habilidad de los astronautas para desarrollar y mantener apropiadas respuestas del sistema inmune celular y humoral en microgravedad en los vuelos espaciales es un punto crítico dentro de su misión, especialmente en vuelos prolongados.<sup>4</sup> Evidencia experimental demuestra que los tejidos o células puestas a prueba por antígenos de memoria o por activadores policlonales en un modelo de microgravedad, se anula su capacidad para producir anticuerpos y citocinas, así como aumentar su actividad metabólica. En contraste, si las células fuesen puestas a prueba antes de ser expuestas al ambiente de microgravedad, ellas mantendrían su respuesta. Lo que demuestra que la activación inmune de células del tejido linfóide se encuentra severamente afectada tanto en modelos de microgravedad como en la microgravedad misma.<sup>5</sup>

Otra de las células afectadas son las células NK, estos son linfocitos citotóxicos que poseen la capacidad para destruir células infectadas por virus u oncogénicamente transformadas y promover la liberación de citocinas sin la necesidad de una previa inmunización. Son una importante conexión entre los sistemas inmunes innatos y adaptativos y juegan un rol pivote en los mecanismos antiinflamatorios, vigilancia de tumoraciones y la regulación de desórdenes autoinmunes. El efecto de la microgravedad en la actividad y función de las células NK durante los vuelos espaciales es un problema particularmente interesante. Investigaciones han demostrado disminución en la actividad y en la producción de interferón inducida por las células NK, 7 días posteriores al viaje.<sup>6</sup>

## Cambios hematológicos en microgravedad

La adaptación inicial se da desde el momento del despegue debido a la posición adoptada que es en decúbito supino con las piernas elevadas por arriba del plano toracoabdominal, lo cual produce una redistribución del volumen intravascular hacia el tronco y la cabeza y esto continúa en el viaje en órbita.

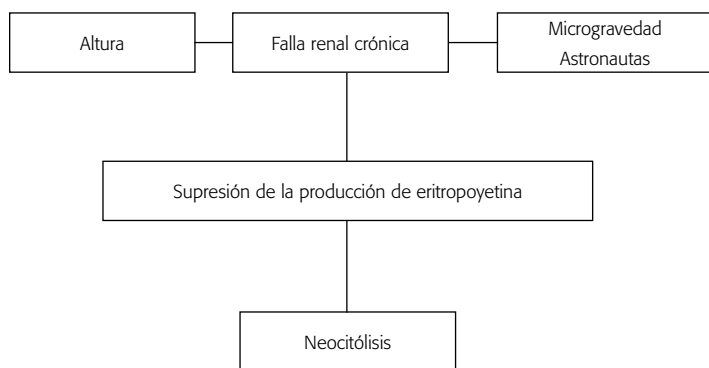
Charles y otros investigadores observaron que durante los vuelos espaciales los astronautas se sometían a una serie de cambios en múltiples sistemas. A nivel hematológico destaca una disminución del volumen plasmático de hasta un 20 % durante las primeras horas, porque al entrar a un estado de microgravedad los vasos sanguíneos de la microvasculatura (vénulas y capilares) colapsan debido a que el peso de la sangre en ese momento no consigue la fuerza necesaria para mantener las paredes vasculares permeables. De tal manera que la sangre es redistribuida centralmente en donde la ocupación sanguínea es menos dependiente de la gravedad, generando una hipervolemia virtual en un ambiente normóxico que da lugar a una serie de procesos como es aumento de la uresis, trasudado hacia los tejidos que se manifiesta como edema facial y dorsal, que posteriormente genera hemoconcentración con aumento del hematocrito. El cuerpo humano

reacciona a estos cambios en microgravedad produciendo un ajuste mediante la reducción del volumen plasmático, disminución de la cuenta de eritrocitos (eritrólisis) y la reducción de la producción de EPO (eritropoyetina) en los primeros días de estancia en el espacio.

Después se genera hemoconcentración pero esta no es como se esperaría, debido a una rápida disminución del conteo eritrocitario y una hemólisis selectiva de neocitos (neocitólisis). En las observaciones realizadas se encontró que la disminución del conteo eritrocitario total de los astronautas (hemoglobina y hematocrito) presenta una disminución marcada al compararlos con la disminución habitual de la masa eritrocitaria sometida al marcaje de los eritrocitos con  $\text{Cr}^{51}$ , razón por la cual un proceso hemolítico debería explicar la caída de la masa eritrocitaria, ya que el porcentaje de reducción de la masa eritrocitaria es considerable para que ocurra en un intervalo de tiempo tan pequeño. Como es sabido el proceso de eritropoyesis tarda alrededor de 9 días y un eritrocito promedio tiene una vida media de 120 días, transcurridos 10 días la reducción teóricamente debería de ser de 8% y no de 10 a 15% como se observó. Al marcar los eritrocitos con  $\text{Cr}^{51}$  dos semanas antes del lanzamiento con el objetivo de observar la supervivencia celular y corroborar el proceso hemolítico, los hallazgos fueron los menos esperados ya que aunque la curva de supervivencia dada por el  $\text{Cr}^{51}$  no presenta alteraciones, los parámetros hematimétricos seguían mostrando una disminución en la masa celular eritrocitaria.<sup>7-10</sup>

Existía otra posibilidad y es que la hemólisis fuera tan selectiva que destruyera los eritrocitos con menor tiempo de marcaje, es decir eritrocitos menores a 12 días (neocitos), esto fue comprobado en la misión espacial Géminis V en la que se observó una disminución más acentuada en la masa de eritrocitos que fueron marcados sólo 7 días antes del lanzamiento.<sup>11</sup> En la Figura 26.2 se observan los eventos desencadenantes de neocitólisis

Un aumento central del hematocrito es un estímulo negativo para la secreción central de EPO por parte del riñón, ya que los niveles séricos de esta hormona caen en forma acelerada, a lo que sigue una disminución del hematocrito y de la masa eritrocitaria la cual se evidencia al regresar a la Tierra en donde se genera una reducción del volumen plasmático y hemodilución, en consecuencia se produce un déficit de eritrocitos que lleva a la hipoxia y al restablecimiento de la secreción de EPO, es decir una reducción en un momento específico de los niveles que contribuye a la neocitólisis.

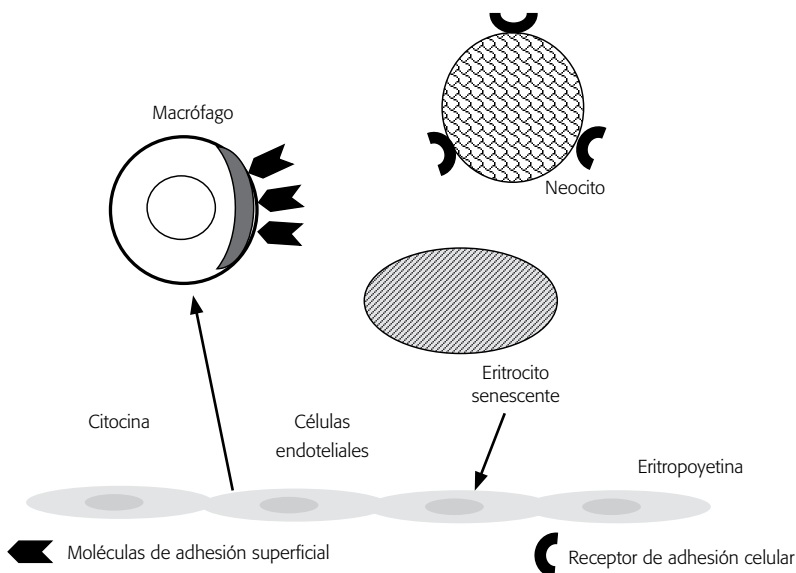


**Figura 26.2.**  
Eventos desencadenantes de neocitólisis.

Para determinar la masa eritrocitaria que puede llegar a presentar neocitólisis se ha propuesto modelos humanos que involucran la administración de EPO recombinante humana, por periodos variables para después estudiar las consecuencias de un retiro súbito; la neocitólisis involucra un cambio en la relación neocito–macrófago, estando involucradas moléculas de adhesión celular que promueven a su vez la maduración de la serie eritroide y que persisten en algún grado en las células recién formadas. En la Figura 26.3 se esquematiza el modelo de neocitólisis. En algunas células endoteliales se han encontrado receptores de EPO como son las células endoteliales esplénicas ricas en estos receptores, las cuales tienen la capacidad para responder a la estimulación de EPO incrementando la permeabilidad e interactuando con macrófagos que llevan a neocitólisis. Otras moléculas involucradas en neocitólisis son: CD 35, CD 36, CD 44, CD 47, CD 49E, CD 55, caderina, glicoforina, ICAM-4, sulfato de condroitín.<sup>12-14</sup>

En análisis de sangre a cosmonautas rusos, no se determinó la presencia de esquistocitos o estomacitos después de un viaje a la estación espacial, pero sí un aumento de los niveles de lactato lo que sugiere las condiciones de anaerobiosis durante el viaje, los niveles de glutatión el cual tiene propiedades antioxidantes, al inicio del viaje se encontraban disminuidos y al final del viaje éstos aumentaron; también aumentaron los niveles de fosfatidilcolina que se asoció con un aumento de la rigidez de la membrana eritrocitaria.

Los cambios en las propiedades fisicoquímicas del plasma y la membrana de los eritrocitos (microviscosidad y permeabilidad) pueden influir en la eficiencia de la transferencia de oxígeno, el estado de la hemoglobina y cambios en la conformación de la molécula de hematoporfirina. Sin embargo, con la readaptación a la Tierra aparece una estimulación de la eritropoyesis la cual está dirigida a mantener el nivel óptimo de las células rojas de la sangre, necesaria para el aumento de la demanda de oxígeno en los tejidos en las condiciones de la gravitación de la Tierra.<sup>7,12-15</sup>



**Figura 26.3.**  
Eventos desencadenantes de neocitólisis.

# Conclusiones

La exposición a la microgravedad durante los vuelos espaciales se asocia con diversos riesgos para la salud, haciendo a los sistemas de órganos susceptibles a diferentes condiciones secundarias, como en el sistema hematológico con la neocitólisis y la anemia del espacio. Se requiere continuar con la investigación de la medicina espacial para que los cosmonautas puedan orbitar en condiciones más seguras, exponiendo su salud al mínimo riesgo posible durante los viajes espaciales.

## Referencias

1. Haber H, Gerathwohl S. Physics and psychophysics of weightlessness. *J Aviat Med.* 1952;22:180-9.
2. Rogers M, Vogt G, Wargo M. *Microgravity, A teacher's guide with activities in science, mathematics, and technology.* Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 1997.
3. Liu J, Verheyden B, Beckers F, Aubert AE. Haemodynamic adaptation during sudden gravity transitions. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112:79-89.
4. Sonnenfeld G, Shearer W. Immune function during space flight. *Nutrition.* 2002;18(10):899-903.
5. Fitzgerald W, Chen S, Walz C, Zimmerberg J, Margolis L, Grivel J. Immune suppression of human lymphoid tissues and cells rotating suspension culture and onboard the International Space Station, in vitro cell. *Dev Biol Anim.* 2009;45:622-32.
6. Li Q, Mei Q, Huyan T, Xie L, Che S, Yang H. Effects of simulated microgravity on primary human NK cells. *Astrobiol.* 2013;13(8):703-14.
7. Scholnik-Cabrera A, Labastida-Mercado N. How is hematology involved in the era of aerospace medicine?: Systemic and hematological changes in the astronaut. *Rev Hematol Mex.* 2014;15:122-8.
8. Harris B, Epstein P. Out of thin air: the evolving enigma of erythropoietin and neocytolysis. *Ann Intern Med.* 2001 Apr 17;134(8):710-2.
9. Cogoli A. Hematological and immunological changes during space flight. *Acta Astronaut.* 1981 Sep-Oct;8(9-10):995-1002.
10. Ivanova S, Morukov B, Labetskaya O, Yarlikova Yu, Levina A, Shishkanova Z. Red blood of cosmonauts during missions aboard the International Space Station (ISS). *Hum Physiol.* 2010;36:877-81.
11. Fischer C, Johnson P, Berry C. Red blood cell mass and plasma volume changes in manned space flight. *JAMA.* 1967 May 15;200(7):579-83.
12. Peñuela O, Palomino F, Gomez L. Recombinant human erythropoietin beta improves storage lesion and decreases apoptosis-like indices on blood bank erythrocytes. *Transfusion.* 2007;47(35 supplement): 85A-86.
13. Chang C, Chen Y, Modi K, Awar O, Alfrey C, Rice L. Changes of red blood cell surface markers in a blood doping model of neocytolysis. *J Investig Med.* 2009 Jun;57(5):650-4.
14. De Santo NG, Cirillo M, Kirsch KA, Correale G, Drummer C, Frassl W. Anemia and erythropoietin in space flights. *Semin Nephrol.* 2005 Nov;25(6):379-87.
15. Rice L, Alfrey C. The negative regulation of red cell mass by neocytolysis: physiologic and pathophysiologic manifestations. *Cell Physiol Biochem.* 2005;15(6):245-50.

# 27. Cirugía en el Espacio

Luis Daniel Carrillo Córdova, Carlos Alberto Carrillo Córdova,  
Elba Luz Villena López, Jorge Raúl Carrillo Córdova

## ■ Introducción

El 12 de abril de 1961 el primer teniente de la Fuerza Aérea de la URSS, Yuri Alexéyevich Gagarin, realizó en la nave Vostok el primer vuelo tripulado al espacio en la historia. En una misión que duró una hora y 48 minutos, orbitando alrededor de la Tierra a una altura de 367 km. El 5 de mayo de 1961, 23 días después del primer vuelo orbital del cosmonauta soviético, Shepard realizó un vuelo suborbital a bordo de la cápsula de la nave Mercury Redstone 3. Los estadounidenses lo consideran el primer astronauta de Estados Unidos (aunque el primer vuelo orbital estadounidense lo realizó John Glenn a bordo del Friendship 7 el 20 de febrero de 1962). La nave de Shepard alcanzó una altitud de 187 kilómetros, en un vuelo que duró 15 minutos.

Estos eventos empezaron una nueva era para la humanidad, la era de la exploración espacial, la cual a lo largo de 40 años nos ha permitido caminar sobre la Luna, enviar vehículos no tripulados a la superficie de Marte, construir estaciones espaciales que permiten realizar misiones tripuladas de meses de duración.

Durante el primer decenio de esta era, se analizó la posibilidad de vivir y trabajar en el espacio. Previo al lanzamiento del Mercury, existían muchas dudas sobre la capacidad de los humanos para sobrevivir en el espacio, así como un total desconocimiento sobre los cambios fisiológicos experimentados en estados de microgravedad. Este decenio finaliza con los primeros pasos del ser humano sobre la Luna cuando Armstrong en julio de 1969, como comandante de la misión de alunizaje Apolo 11, pronunció la célebre frase “Es un pequeño paso para un hombre, pero un gran salto para la humanidad”. Caminó junto a Buzz Aldrin por la superficie de la Luna y la exploraron durante dos horas, mientras su compañero Michael Collins les esperaba en la órbita lunar a bordo del módulo de mando.

Durante el segundo decenio, se analizó la adaptación y desempeño durante misiones prolongadas en ambientes de microgravedad en la estación espacial Skylab a cargo de la NASA, diseñada por Raymond Loewy, fue lanzada (en misión no tripulada) el 14 de mayo de 1973, impulsada por el cohete Saturno V (misión SL-1). La primera tripulación realizó tareas de reparación profundas en un paseo espacial y permaneció 28 días en la estación. Las siguientes misiones (SL-3 y SL-4) comenzaron el 28 de julio de 1973 y el 16 de noviembre de 1973 y duraron 59 y 84 días, respectivamente, con una ocupación total de 171 días. La última tripulación de la Skylab volvió a la Tierra el 8 de febrero de 1974.

Durante estas misiones se identificó una pérdida importante de la masa ósea y muscular de los astronautas, aun después de implementar un plan de ejercicio. Un dispositivo de presión negativa aplicado en la parte inferior del cuerpo fue utilizado por primera vez para determinar la



respuesta cardiovascular a un esfuerzo ortostático simulado en órbita, encontrando que el gasto cardiaco se adaptaba de cuatro a seis semanas en el espacio sin aparente deterioro de la salud de la tripulación o el rendimiento de la misma.

El tercer decenio se centró en el uso del primer vehículo de lanzamiento reutilizable, el Transbordador Espacial, STS (*Space Transport System*) el cual era una nave espacial de la NASA parcialmente reutilizable para órbitas terrestres bajas. En 1981 se realizó el primero de cuatro vuelos orbitales de prueba, abriendo paso a vuelos operacionales en 1982. Misiones operacionales lanzaron varios satélites, sondas interplanetarias y el Telescopio Espacial Hubble (HST); realizaron experimentos científicos en órbita y participaron en la construcción y el servicio de la Estación Espacial Internacional (EEI). El tiempo total de misión de la flota de Transbordadores fue 1 322 días, 19 horas, 21 minutos y 23 segundos.

Esto contribuyó en gran parte a la formación de la Estación Espacial Internacional, centro de investigación en la órbita terrestre, cuya administración, gestión y desarrollo está a cargo de la cooperación internacional. El proyecto funciona como una estación espacial permanentemente tripulada, en la que rotan equipos de astronautas e investigadores de las cinco agencias del espacio participantes: la NASA (National Aeronautics Space Administration), la Agencia Espacial Federal Rusa (FKA), la Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA), la Agencia Espacial Canadiense (CSA) y la Agencia Espacial Europea (ESA).

El comandante Bill Shepherd, subcomandante Yuri Gidzenko y el ingeniero de vuelo Sergei Krikalev formaron la primera tripulación a bordo de la EEI en noviembre de 2000. Habitar de manera permanente en la órbita terrestre requiere un nivel sin precedentes de cooperación entre todos los socios internacionales.

Durante el próximo decenio, a partir de sus diversos módulos, la EEI proporcionó acceso a una plataforma de investigación única para los científicos de todo el mundo. La investigación llevada a cabo en la EEI permitió comprender cómo optimizar la salud y el rendimiento de los astronautas que trabajan periodos prolongados en condiciones de microgravedad.

Las estancias prolongadas de seres humanos en el espacio así como el progreso de la exploración espacial por el sector privado representan una mayor posibilidad de que se presenten escenarios clínicos que requieran atención quirúrgica.

La cirugía de espacio es una subdisciplina de la medicina espacial con asociaciones cercanas a otros campos relacionados con el espacio, siendo su pionero e impulsor el doctor Iaroshenko en 1967 con sus trabajos sobre roedores en la Agencia Espacial Rusa.<sup>1</sup> Hasta el momento, ningún procedimiento quirúrgico se ha llevado a cabo en un ser humano durante los vuelos espaciales. A pesar de que, la cirugía con anestesia, intervenciones, y supervivencia se llevó a cabo con éxito en roedores por primera vez en la misión STS-90 Neurolab, donde se realizaron procedimientos diversos como craneotomía, disección de miembro pélvico, toracotomía, laminectomía y la laparotomía, utilizando las técnicas quirúrgicas convencionales; se analizó la respuesta a la anestesia general, el cierre de heridas, cicatrización de heridas, hemostasia, control de líquidos quirúrgicos, sujeción del operador y el control de instrumentos quirúrgicos. No se encontró disminución en la destreza manual de la tripulación, aunque el tiempo quirúrgico fue más largo en comparación con la experiencia de suelo debido a la necesidad de mantener la restricción de los suministros e instrumentos quirúrgicos. Concluyendo que procedimientos quirúrgicos pueden ser factibles en los seres humanos en viajes de larga duración.<sup>2</sup>

Los eventos médicos a los que con mayor posibilidad podrían estar expuestos los astronautas y podrían ser manejados con cirugía durante los vuelos espaciales son los traumatismos contusos y penetrantes (impacto de escombros, durante las actividades fuera del vehículo espacial, construcciones y reparaciones, acoplamiento del vehículo y de reabastecimiento de combustible),

las lesiones químicas y quemaduras y de menor importancia lesiones dentales y otras patologías quirúrgicas menores.<sup>3-5</sup> Es evidente que un caso de cirugía mayor en el espacio impactará directamente los objetivos de la misión y los resultados, lo que además exige una infraestructura médica que garantice la seguridad de los astronautas y el éxito de la misión espacial.

## Trauma y ATLS

Los resultados médicos adversos asociados con trauma pueden ocurrir durante las misiones espaciales, algunos ejemplos son lesión de la vía aérea, quemaduras directas o por inhalación, aspiración de cuerpo extraño y paro cardíaco. Hasta la fecha, la intervención de la vía aérea nunca ha sido necesaria en los vuelos espaciales tripulados; sin embargo, como la duración de las misiones es más prolongada y a que existen esfuerzos para que la exploración humana continúe, aumenta el riesgo de que se presenten urgencias médicas, lo que exige la necesidad de brindar la atención médica urgente y adecuada.

Se ha demostrado que el manejo de la vía aérea es posible durante el vuelo espacial, permitiendo que el operador mantenga el tubo de intubación y lo guíe hacia la vía aérea.<sup>7</sup> Otros estudios han demostrado que una variedad de procedimientos de estabilización de pacientes se puede lograr en los vuelos espaciales y no son más difíciles de realizar que en el entorno de normogravedad, incluyendo traqueotomía por dilatación percutánea, ventilación artificial, infusión intravenosa usando un tubo de pie y sistema de bolsa de presión, la inserción del tubo torácico y de una sonda Foley.<sup>5,8</sup> En conjunto, estos estudios demuestran que muchos conceptos de ATLS<sup>6</sup> (*Advanced Trauma Life Support*) se pueden lograr con éxito en un ambiente de microgravedad.

## Evaluación diagnóstica

Las alteraciones fisiológicas que se producen en estados de microgravedad tendrán un impacto en la presentación, diagnóstico, evaluación, tratamiento y manejo de la enfermedad. La mejor herramienta diagnóstica, en vuelos espaciales es la ecografía, con especial aplicación en la evaluación de la necesidad de intervención quirúrgica emergente.<sup>9-12</sup> La ecografía en la Tierra depende de la gravedad, al localizar líquido libre en ubicaciones en el tórax y el abdomen, lo que sugiere que las presentaciones patológicas pueden alterarse en los viajes espaciales con microgravedad. A pesar de esto, los estudios han demostrado que la evaluación de ultrasonido de varias condiciones se puede realizar con éxito, incluyendo neumotórax,<sup>13,14</sup> evaluación de senos paranasales.<sup>15</sup> La aspiración percutánea guiada por ecografía intraperitoneal fue exitosa realizada en cerdos en microgravedad.<sup>16</sup> La desventaja es que el ultrasonido es una tecnología usuario-dependiente, razón por la cual existen algunas iniciativas, como la guía de manera remota por usuarios con experiencia en la Tierra.<sup>17-20</sup>

## Anestesia

Se ha realizado muy poca investigación sobre los efectos de la anestesia en vuelos espaciales. Poco se sabe sobre los posibles cambios en la farmacocinética y farmacodinámica de fármacos

en microgravedad, que es esencial para el manejo de anestésicos y otros medicamentos. La investigación ha demostrado excelentes resultados de la anestesia general en los roedores a bordo de la misión STS-90.<sup>21,22</sup> Sin embargo, los anestésicos inhalatorios que se utilizan en la Tierra siguen siendo un desafío para los miembros de la tripulación ya que una fuga de gas anestésico podría contaminar el medio ambiente de circuito cerrado en la EEI.<sup>23</sup> La anestesia espinal también plantea un problema en los vuelos espaciales ya que el anestésico puede ser distribuido de manera diferente secundario al desplazamiento de líquidos que se produce en condiciones de microgravedad, lo que limita su uso.<sup>5</sup> Una técnica más prometedora para la administración de anestesia es la anestesia intravenosa.<sup>21</sup> El bloqueo local y regional prometen ser excelentes opciones, aunque no se cuenta con experiencia de uso de estas técnicas en estado de microgravedad. Aún se necesitan muchos estudios para determinar la mejor técnica anestésica y para establecer los protocolos necesarios para llevarla a cabo con seguridad y éxito.

## Campo estéril y manejo de la hemorragia

El establecimiento de un campo estéril es posible en el ambiente de microgravedad establecido en un vuelo parabólico, que comprende enguantado, preparación de la piel, lavado, uso de batas y drapeado.<sup>24</sup> Estaciones de trabajo quirúrgicas fueron creadas para abordar la preparación de los procedimientos de cirugía menor en los viajes espaciales. Diferentes cámaras quirúrgicas se han desarrollado para proteger al campo quirúrgico estéril y al mismo tiempo aislar el ambiente de la cabina, éstas consisten en una cámara expansible quirúrgica<sup>25</sup> con flujo laminar,<sup>23,26</sup> así como un sistema de contención.<sup>27</sup> Estas estaciones quirúrgicas son útiles para proporcionar atención quirúrgica eficaz para los miembros de la tripulación, para el paciente y para proteger el ambiente de la cabina.

La hemorragia arterial y venosa parece formar cúpulas sobre el vaso sangrante secundario a la mayor tensión superficial.<sup>29</sup> El sangrado por lo general se puede controlar esponjando y cauterizando.<sup>5,23</sup> El otro aspecto que fue motivo de investigación, fue la posibilidad de la sangre y otros líquidos corporales de contaminar la cabina, motivo por el cual se crearon las cámaras portátiles que aíslan el campo quirúrgico.

## Técnica quirúrgica

Muchos aspectos de la fisiología humana se alteran en el ambiente de microgravedad, incluyendo el comportamiento de los líquidos y órganos. Los órganos se comportan de manera diferente en el entorno de microgravedad, el intestino flota en el campo quirúrgico al igual que el riñón cuando se libera de la fascia de Gerota.<sup>28</sup>

Una variedad de estudios han demostrado la viabilidad de la realización de procedimientos quirúrgicos complejos en el entorno de microgravedad simulada y en los vuelos espaciales, incluyendo drenaje abierto peritoneal,<sup>8</sup> disección de miembro pélvico,<sup>24</sup> colocación de catéter ureteral doble j,<sup>30</sup> toracotomía,<sup>24</sup> toracoscopia,<sup>31</sup> laparotomía,<sup>24</sup> laparoscopia,<sup>32,33</sup> craneotomía,<sup>24</sup> y la microcirugía.<sup>34</sup> Los estudios han demostrado que la sutura manual en microgravedad es similar pero más lenta que en la Tierra.<sup>35</sup> La evaluación subjetiva sugiere que el rendimiento quirúrgico disminuye cuando el operador no se aclimata al ambiente de microgravedad,<sup>24</sup> lo que puede llevar a una falla en el procedimiento que el operador realizaba sin dificultad en la Tierra.<sup>36</sup>

# Cicatrización

Informes preliminares sobre la cicatrización de heridas en animales no ofrecen ninguna conclusión definitiva. Incisiones realizadas en roedores en los viajes espaciales en la misión STS-90 parecían sanar bien después de la cirugía sin evidencia de dehiscencia o infección después de 48 h. Otros estudios observacionales no mostraron cicatrización de incisiones de roedores en condiciones de ingravidez simulada.<sup>37</sup> Por último, una variedad de estudios *in vitro* demuestran resultados ambiguos con migración anormal celular, la formación de colágeno, aumento de la inflamación y la disminución de la organización celular.<sup>38,36</sup>

## Referencias

1. Iaroshenko GL, Terent'ev VG, Mokrov MN. Peculiarities of surgical intervention under conditions of weightlessness. *Voen Med Zh.* 1967;10:69–70.
2. Campbell MR, Williams DR, Buckley Jr. JC, Kirkpatrick AW. Animal surgery during spaceflight on the Neurolab Shuttle mission. *Aviat Space Environ Med.* 2005;76:589–93.
3. Kirkpatrick AW, Campbell MR, Novinkov OL, Goncharov IB, Kovachevich IV. Blunt trauma and operative care in microgravity: a review of microgravity physiology and surgical investigations with implications for critical care and operative treatment in space. *J Am Coll Surg.* 1997;184:441–53.
4. McCuaig KE, Houtchens BA. Management of trauma and emergency surgery in space. *J Trauma.* 1992;33:610–25. (discussion 625–16).
5. Campbell MR. A review of surgical care in space. *J Am Coll Surg.* 2002;194:802–12.
6. Price A, Hughes G. Training in advanced trauma life support. *Br Med J.* 1998;316:878.
7. Keller C, Brimacombe J, Giampalmo M, Kleinsasser A, Loekinger A, Giampalmo G, et al. Airway management during spaceflight: a comparison of four airway devices in simulated microgravity. *Anesthesiology.* 2000;92:1237–41.
8. Campbell MR, Billica RD, Johnston 3rd SL, Muller MS. Performance of advanced trauma life support procedures in microgravity. *Aviat Space Environ Med.* 2002;73:907–12.
9. Kirkpatrick AW, Jones JA, Sargsyan A, Hamilton DR, Melton S, Beck G, et al. Trauma sonography for use in microgravity. *Aviat Space Environ Med.* 2007;78:A38–42.
10. Kirkpatrick AW, Hamilton DR, Nicolaou S, Sargsyan AE, Campbell MR, Feiveson A, et al. Focused assessment with sonography for trauma in weightlessness: a feasibility study. *J Am Coll Surg.* 2003;196:833–44.
11. Sargsyan AE, Hamilton DR, Jones JA, Melton S, Whitson PA, Kirkpatrick AW, et al. FAST at MACH 20: clinical ultrasound aboard the International Space Station. *J Trauma.* 2005;58:35–9.
12. Hamilton DR, Sargsyan AE, Kirkpatrick AW, Nicolaou S, Campbell M, Dawson DL, et al. Sonographic detection of pneumothorax and hemothorax in microgravity. *Aviat Space Environ Med.* 2004;75:272–7.
13. Sargsyan AE, Hamilton DR, Nicolaou S, Kirkpatrick AW, Campbell MR, Billica RD, et al. Ultrasound evaluation of the magnitude of pneumothorax: a new concept. *Am Surg.* 2001;67:232–5. (discussion 235–6).
14. Luks AM, Swenson ER. Travel to high altitude with pre-existing lung disease. *European Respiratory Journal.* 2007;29:770–92; DOI: 10.1183/09031936.00052606.
15. Benninger MS, McFarlin K, Hamilton DR, Rubinfeld I, Sargsyan AE, Melton SM, et al. Ultrasound 64 L. Drudi et al. / *Acta Astronautica* 79 (2012) 61–66 evaluation of sinus fluid levels in swine during microgravity conditions. *Aviat Space Environ Med.* 2009;80:1063–65.
16. Kirkpatrick AW, Nicolaou S, Campbell MR, Sargsyan AE, Dulchavsky SA, Melton S, et al. Percutaneous aspiration of fluid for management of peritonitis in space. *Aviat Space Environ Med.* 2002;73:925–30.
17. Fincke EM, Padalka G, Lee D, Van Holsbeeck M, Sargsyan AE, Hamilton DR, et al. Evaluation of shoulder integrity in space: first report of musculoskeletal US on the International Space Station. *Radiology.* 2005;234:319–22.

18. Chiao L, Sharipov S, Sargsyan AE, Melton S, Hamilton DR, McFarlin K, et al. Ocular examination for trauma; clinical ultrasound aboard the International Space Station. *J Trauma*. 2005;58:885–9.
19. McBeth PB, Crawford I, Blaivas M, Hamilton T, Musselwhite K, Panebianco N, et al. Simple, almost anywhere, with almost anyone: remote low-cost telementored resuscitative lung ultrasound. *J Trauma*, 2001;71:1528–35.
20. Dyer D, Cusden J, Turner C, Boyd J, Hall R, Lautner D, et al. The clinical and technical evaluation of a remote telementored telesonography system during the acute resuscitation and transfer of the injured patient. *J. Trauma*. 2008;65:1209–16.
21. Campbell MR, Billica RD, Johnston 3rd SL. Animal surgery in microgravity. *Aviat Space Environ Med*. 1993;64:58–62.
22. Campbell MR, Williams DR, Buckey Jr. JC, Kirkpatrick AW. Animal surgery during spaceflight on the Neurolab Shuttle mission. *Aviat Space Environ Med*. 2005;76:589–93.
23. Norfleet WT. Anesthetic concerns of spaceflight. *Anesthesiology*. 2000;92:1219–22.
24. McCuaig K. Aseptic technique in microgravity. *Surg Gynecol Obstet*. 1992;175:466–76.
25. Rock JA. An expandable surgical chamber for use in conditions of weightlessness. *Aviat Space Environ Med*. 1984;55:403–4.
26. American Telemedicine Association, *Telemedicine Defined*, American Telemedicine Association, Washington, 2011.
27. Markham SM, Rock JA. Microgravity testing a surgical isolation containment system for space station use. *Aviat Space Environ Med*. 1991;62:691–3.
28. Satava RM. Surgery in space. Phase I: Basic surgical principles in a simulated space environment. *Surgery*. 1988;103:633–7.
29. Campbell MR, Billica RD, Johnston 3rd SL. Surgical bleeding in microgravity. *Surg Gynecol Obstet*. 1993;177:121–5.
30. Jones JA, Johnston S, Campbell M, Miles B, Billica R. Endoscopic surgery and telemedicine in microgravity: developing contingency procedures for exploratory class spaceflight. *Urology*. 1999;53:892–7.
31. Campbell MR, Kirkpatrick AW, Billica RD, Johnston SL, Jennings R, Short, et al. Endoscopic surgery in weightlessness: the investigation of basic principles for surgery in space. *Surg Endosc*. 2001;15:1413–18.
32. Campbell MR, Billica RD, Jennings R, Johnston 3rd S. Laparoscopic surgery in weightlessness. *Surg Endosc*. 1996;10:111–7.
33. Campbell MR, Kirkpatrick AW, Billica RD, Johnston SL, Jennings R, Short D, et al. Endoscopic surgery in weightlessness: the investigation of basic principles for surgery in space. *Surg Endosc*. 2001;15:1413–18.
34. Pinsolle V, Martin D, De Coninck L, Techoueyres P, Vaida P. Microsurgery in microgravity is possible. *Microsurgery*. 2005;25:152–4.
35. Kirkpatrick AW, Doarn CR, Campbell MR, Barnes SL, Broderick TJ. Manual suturing quality at acceleration levels equivalent to spaceflight and a lunar base. *Aviat Space Environ Med*. 2008;79:1065–66.
36. Pietsch J, Bauer J, Egli M, Infanger M, Wise P, Ulbrich C, et al. The effects of weightlessness on the human organism and mammalian cells. *Curr Mol Med*. 2011;11:350–64.
37. Davidson JM, Aquino AM, Woodward SC, Wilfinger WW. Sustained microgravity reduces intrinsic wound healing and growth factor responses in the rat. *FASEB J*. 1999;13:325–9.
38. Infanger M, Kossmehl P, Shakibaei M, Bauer J, Kossmehl-Zorn S, Cogoli A, et al. Simulated weightlessness changes the cytoskeleton and extracellular matrix proteins in papillary thyroid carcinoma cells. *Cell Tissue Res*. 2006;324:267–77.

## Sección 4

28. Recomendaciones  
Sobre la creación de una política de Estado para impulsar el desarrollo de la medicina espacial y las ciencias biológicas espaciales que coadyuven en la solución de problemáticas de salud



# 28. Recomendaciones

Sobre la creación de una política de Estado para impulsar el desarrollo de la medicina espacial y las ciencias biológicas espaciales que coadyuven en la solución de problemáticas de salud

Francisco Javier Mendieta Jiménez, Raúl Carrillo Esper, David Muñoz Rodríguez, Fabiola Vázquez Torres, Benito Orozco Serna

## ■ Introducción

Se entiende a la Medicina Espacial como una rama de la medicina que se dedica al estudio, control y adaptación del cuerpo humano fuera de la Tierra, en un entorno tanto de alta gravedad como de microgravedad, y aceleración extrema, entre otros, y a las Ciencias Biológicas Espaciales como el estudio de los fenómenos biológicos en entornos diferentes a los usualmente encontrados en la superficie de la Tierra. Si bien podemos afirmar que la Medicina Espacial y las Ciencias Biológicas Espaciales son disciplinas relativamente nuevas, su importancia es creciente en la comunidad internacional donde un mercado espacial va en aumento. Ha sido una característica de las tecnologías espaciales su derrama hacia otros escenarios científicos y tecnológicos. Y México sigue de cerca los avances en el ámbito de medicina espacial incrementando nuestro entendimiento científico y tecnológico en esta importante disciplina.

Por un lado, la medicina espacial sólo puede ser “probada” estando en el espacio y reproducirlo no es tan sencillo. Los altos costos de las misiones se estiman en miles de millones de dólares. Con respecto a las ciencias biológicas espaciales, el tema ha sido más explorado, ya que la búsqueda de vida fuera de la Tierra ha tenido otras vías, entre otras cosas, reproducir ambientes que permiten probar la existencia de vida microscópica (extremófilos), la medición de la temperatura de las estrellas con el fin de entender el origen de la vida, etc. La NASA en su publicación *Spinoff* 2016, señala “Si la prevención y el tratamiento de los problemas de salud son complicados en la Tierra, es aún más difícil en el Espacio, donde los recursos son limitados y los profesionales de la salud están presentes de manera remota”.

Si bien es cierto que el desarrollo del conocimiento vinculado al tema de la medicina espacial es de gran relevancia para el sector espacial en general, es importante mencionar que para fines de esta propuesta, se enfatizan las aplicaciones científicas y tecnológicas con un impacto en el sector salud.

Muchas de las soluciones que se han obtenido con fondos de la NASA y de otras agencias espaciales, se basan en desarrollos que han logrado, entre muchas otras cosas, construir tecnología, hoy utilizada de manera exitosa en tierra, como medir de manera rápida y fácil la pérdida de densidad ósea (lo cual es inminente en ambientes de microgravedad), o la atención de especialistas de manera remota, a través de la Telemedicina. Otra de las grandes innovaciones de impacto en el sector salud, proveniente del sector espacial, son los estudios afines a la tecnología de rayos X.



Siendo pues que gran parte de las aportaciones de la tecnología de medicina espacial, diseñadas originalmente para misiones fuera del planeta, son aplicables y están disponible ya en tierra, actualmente el gobierno mexicano a través de la Agencia Espacial Mexicana (AEM) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), redobla esfuerzos para desarrollar esta área del conocimiento, enfocándose en el impulso de la investigación científica y el desarrollo tecnológico espacial aplicado a la medicina, como una de las estrategias del Programa Nacional de Actividades Espaciales (PNAE), que contribuye al Plan Nacional de Desarrollo (PND), en el que la presente administración federal introdujo por primera vez en la historia el tema espacial.

Una primera tarea, entonces, es precisamente el impulsar una agenda interinstitucional para estimular la aplicación y el desarrollo de la investigación científica y tecnológica de la medicina espacial y las ciencias biológicas espaciales en nuestro país.

También se busca la gradual incorporación de la tecnología de telecomunicaciones a tareas como la de hacer llegar servicios de salud a distancia a la población, y el monitoreo satelital de enfermedades (denominadas telesalud y cibersalud, respectivamente), con gran beneficio potencial, sobre todo para aquellos sectores más desprotegidos de la sociedad y que viven en poblados remotos y sin conectividad física, a los que sólo es posible llegar vía satélite.

En la búsqueda del objetivo de impulsar la medicina espacial se han evaluado las estrategias que se deben aplicar para lograr el impulso de este sector en sus distintos ámbitos: académico, industrial, gobierno, investigación, legislación, etc. El diseño de la estrategia exige sin lugar a dudas el establecimiento de metas a largo y mediano plazos, líneas de acción, programas de estímulo a la formación de capital humano, etcétera.

Las estrategias presentadas tienen como criterio central, que las acciones que se deriven de ellas, se hagan mediante cambios en las organizaciones y que los recursos necesarios provengan también de fuentes novedosas, como de alianzas intersectoriales. Asimismo, el documento precisa a las instituciones que juegan un rol central en cada etapa del proceso y las líneas en que podrían participar. Al final del documento se sugieren las estrategias y las líneas de acción que podrían efectuarse para el éxito de la propuesta.

## Antecedentes

Al día de hoy alrededor del tema de medicina espacial y ciencias biológicas espaciales, la Agencia Espacial Mexicana interactúa con diversas instituciones del ámbito académico, gubernamental e industrial, con el fin de tener sólidos grupos de trabajo inter- e intrainstitucionales que permitan el desarrollo de proyectos científicos y tecnológicos afines a las políticas establecidas en el sector espacial. El mapa de redes de colaboración está compuesto por las siguientes instituciones.

**Academia Nacional de Medicina de México (ANMM).** La estrecha relación que existe entre la AEM y la ANMM se enfoca principalmente al desarrollo de la medicina espacial, siendo actualmente una de las instituciones que impulsan con mayor énfasis el tema al publicar el presente documento.

**Sociedad Mexicana de Medicina del Espacio y Microgravedad (SoMMEM).** Es una sociedad que busca el desarrollo en México de la medicina espacial y las ciencias biológicas espaciales a través de la organización de foros y congresos especializados. Es una de las instituciones que junto con la AEM y la ANMM que más ímpetu han mostrado en el desarrollo de las actividades.

**Academia Mexicana de Cirugía.** Es la institución con la que la AEM ya cuenta un convenio marco de colaboración en materia de medicina espacial.

**Universidad Autónoma de San Luis Potosí.** En la UASLP se encuentra un grupo de desarrollo muy importante que maneja los temas de epidemiología a través de información satelital, seguimiento de enfermedades provocadas por vector, seguimiento de plagas, etc. Y todo lo relacionado con el procesamiento de imágenes satelitales aplicado a la salud. En la UASLP se llevó a cabo en agosto de 2015 el Primer Congreso Mexicano de Medicina Espacial, estableciendo un hito muy importante en la rama, y en el que se presentaron alrededor de 300 especialistas interesados y atendieron el evento de forma remota más de 500 personas.

**Universidad Nacional Autónoma de México.** Es con diversas instituciones de la UNAM con las que se cuenta la voluntad y potencialidad de colaboración en el tema de la medicina espacial y ciencias biológicas espaciales, una de las más importantes es la Facultad de Medicina, en la que se propone que sea la institución que incube a la primera especialidad en Medicina Espacial.

**Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** La SCT aparte de ser cabeza de sector de la AEM, se encarga entre otras cosas del desarrollo de importantes programas para lograr el derecho que tienen las personas a estar conectadas, es a través de esta infraestructura que se logrará un avance muy significativo en la medicina a distancia (Telemedicina), siendo esta última una rama de la medicina emanada de las misiones espaciales, y que con cada misión se resuelven más y mayores retos de salud. Asimismo, la Dirección General de Protección y Medicina Preventiva en el Transporte de la SCT ha participado en actividades de medicina espacial, y seguramente será un colaborador relevante.

**Instituto Mexicano del Seguro Social.** Es a través de la infraestructura existente en las instituciones más importantes de salud en el país con la que se podría empezar a trabajar en cuestiones concretas. El IMSS es una institución que tiene una estructura de formación e investigación muy bien definida, así como infraestructura desarrollada que podría servir para empezar a desarrollar proyectos en el tema de medicina espacial.

**Universidad Autónoma del Estado de Morelos.** La UAEM tiene infraestructura muy avanzada para el estudio de la vida en otros cuerpos del sistema solar, cuenta con laboratorios especializados en la emulación de las características que tienen otras atmósferas, etcétera.

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.** El INAOE cuenta con la infraestructura astronómica de las más importantes del país, dispone del Gran Telescopio Milimétrico, el cual se utilizará para el estudio de la materia orgánica en el Universo en otros planetas, entre otras funciones. También cuenta con laboratorios muy especializados, en los que se puede llevar a cabo la construcción de nanosatélites.

**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.** La BUAP tiene una excelente tradición en el desarrollo de ciencia y tecnología espacial, sobre todo en el área de sistemas eléctricos y electrónicos de potencia. También tiene un grupo muy importante que desarrolla proyectos en el tema de fisiología humana bajo condiciones extremas.

**Escuela Médico Naval de la Secretaría de Marina.** Es una institución que ha participado en todas las actividades de la AEM en medicina espacial que se han desarrollado a través de ponencias en los diferentes eventos, así como también la inclusión del tema en eventos propios.

**Sección de Medicina Aeroespacial de la Dirección General de Sanidad de Sedena.** La sección de Medicina Aeroespacial de la Secretaría de la Defensa Nacional es una institución que ya cuenta con una especialidad en Medicina Aeroespacial, y es a través de ellos y otros actores que estaríamos buscando la inclusión de la especialidad en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad que tiene Conacyt, con el objetivo de que mediante el uso de becas y de su

respectiva movilidad, podamos formar especialistas en el área de medicina espacial en el extranjero, mediante los diferentes convenios internacionales que como Agencia Espacial se tienen.

**Asociación Mexicana de Bioseguridad, A.C. (Amexbio).** Es una asociación con la que la AEM ha tenido una muy estrecha relación en cuanto a la promoción del tema de la medicina espacial y las aplicaciones de la bioseguridad en el espacio.

**Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER).** Es una institución que ha albergado al Simposio Internacional de Bioseguridad y Biocustodia (SIBB), en el cual se ha impulsado el tema de la medicina espacial.

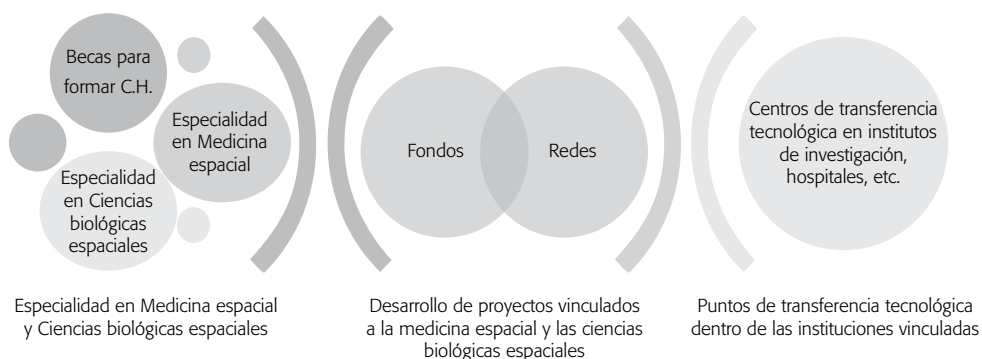
## Objetivo general

Establecer la estrategia de desarrollo de la medicina espacial y las ciencias biológicas espaciales en México, con el fin de coadyuvar en la solución de problemáticas de salud pública.

## Estrategias y líneas de acción

En México se estudian fenómenos de clima espacial y su impacto en la infraestructura de comunicaciones, en la vida y en salud de los seres humanos. Asimismo, la medicina espacial y los efectos de los vuelos espaciales, suborbitales y en el espacio aéreo, son motivo de estudio acucioso y de relevancia para la medicina preventiva de la población, así como también el desarrollo de experimentos biológicos en ambiente de microgravedad, la astrobiología y la geomedicina, son nichos de desarrollo detectados, por lo que la AEM dispuso, en su Programa Nacional de Actividades Espaciales (PNAE), directrices que han permitido desde hace 3 años desarrollar estrategias y líneas de acción que han tenido como objetivo el impulso y el desarrollo del área, objeto de este documento.

Específicamente la estrategia 3.3. del PNAE establece fomentar la construcción de las capacidades nacionales para el desarrollo de investigación e innovación en ciencia espacial básica, a través de apoyar y fortalecer las capacidades nacionales en materia de medicina espacial, astrobiología, experimentación biológica en ambientes de microgravedad, y desarrollo de aplicaciones espaciales para el sector salud. Con el fin de avanzar y lograr aplicar la estrategia citada, se han co-organizado tres foros: “Hacia nuevos horizontes de la Medicina” con la ANMM, la AEM y la SoMMEM, el Primer Congreso Mexicano de Medicina Espacial, se han financiado proyectos vinculados al tema de medicina espacial y ciencias afines, se han firmado dos convenios de colaboración con instituciones de educación, se tienen firmados convenios de colaboración con instancias internacionales para intercambios académicos y proyectos de investigación. Sin embargo, es clara la necesidad de un mayor trabajo, sobre todo interinstitucional que permita alcanzar los objetivos de mediano y largo plazos, para ello este apartado hace las siguientes propuestas, de las cuales se espera emanen programas de trabajo, en materia de medicina espacial y ciencias afines, que formen parte de las agendas de trabajo de instancias gubernamentales y académicas, así como la participación del sector privado.



### **Diagrama de base de las propuestas para impulsar la medicina espacial y las ciencias afines**

De este diagrama se desprenden las siguientes estrategias y líneas de acción.

## **Estrategia 1**

Impulsar el desarrollo de capital humano (C.H.) vinculado a la medicina espacial y ciencias afines que contribuyan al desarrollo y la aplicación del conocimiento en dichas áreas.

#### ***Líneas de acción:***

- Establecer un programa de especialidad y/o posgrado en Medicina espacial y Ciencias biológicas espaciales
- Promover que los programas de especialidad o posgrado existentes en el país cuenten con la calidad suficiente para entrar al PNPC de Conacyt

## **Estrategia 2**

Impulsar el desarrollo de áreas designadas, específicamente para la investigación, desarrollo e innovación en la medicina espacial y ciencias afines, en centros de investigación y enseñanza.

#### ***Líneas de acción:***

- Promover la creación y reforzamiento de laboratorios especializados para contar con líneas de investigación en el área de la Medicina espacial y Ciencias biológicas espaciales
- Fomentar la interacción entre grupos multidisciplinarios con la que se obtengan nuevas líneas de investigación encaminadas al desarrollo de los temas de salud
- Promover la creación de un Instituto Nacional de Medicina Espacial y ciencias afines en el que tengan participación importante las instituciones nacionales de salud, las de investigación científica y desarrollo tecnológico, así como las de gobierno. Cuyas funciones serían: formación de capital humano de alto nivel, investigación científica básica y aplicada y desarrollo tecnológico

## Estrategia 3

Establecer mecanismos de financiamiento para la investigación, desarrollo, innovación y transferencia de la tecnología y ciencia espacial con el fin de coadyuvar en la solución de problemáticas de salud.

### *Líneas de acción:*

- Promover que los diferentes programas de apoyo en el área de la salud que tiene Conacyt incluyan a la medicina espacial como tema estratégico
- Promover que el fondo sectorial AEM-Conacyt incluya como tema estratégico a la medicina espacial
- Promover que el fondo sectorial de Salud-Conacyt incluya una demanda específica vinculada a los temas de medicina espacial y ciencias afines
- Promover que la industria farmacéutica invierta en el desarrollo de proyectos de investigación en Medicina espacial y Ciencias biológicas espaciales

## Estrategia 4

Identificar los problemas de salud poblacional, donde existen oportunidades factibles de que la ciencia y la tecnología espacial coadyuven en su solución, para generar bienestar.

### *Líneas de acción:*

- Establecer vínculos estrechos con las diferentes instituciones de salud, mediante el uso de mecanismos de colaboración interinstitucionales, para detectar y definir los tipos de problemas que se pueden resolver con ciencia y tecnología espacial
- Desarrollo de un enlace estratégico mediante el establecimiento de un convenio de colaboración entre la ANMM, AEM, la UNAM y otras instituciones, que facilite el impulso del proyecto objeto de este documento

## Estrategia 5

Hacer uso de la red compartida y la infraestructura satelital, componentes centrales del "Programa México Conectado" de la SCT, para coadyuvar en los servicios de Telesalud.

### *Líneas de acción:*

- Establecer mecanismos de colaboración con la SCT, para que mediante la infraestructura nacional de telecomunicaciones se otorguen servicios de salud a distancia
- Desarrollar enlaces estratégicos con centros de investigación, universidades, industria, etc., tanto nacionales como internacionales, para el desarrollo de aplicaciones haciendo uso de canales satelitales para satisfacer necesidades de Telesalud

## Estrategia 6

Desarrollar mecanismos de difusión, entre la población de especialistas médicos, que permitan dar a conocer los beneficios de la ciencia y tecnología espacial en la solución de problemáticas de salud.

### *Líneas de acción:*

- Fomentar la realización de foros y congresos tanto nacionales como internacionales en los temas afines a la medicina espacial y la microgravedad
- Fomentar la participación de especialistas mexicanos en foros internacionales en el tema de medicina espacial

## **Conclusión**

La presente postura se desarrolló tomando en cuenta diferentes factores:

- La creación de la Agencia Espacial Mexicana, lo cual trajo consigo el impulso de todo el tema espacial mediante la aglutinación de grupos de investigación y desarrollo, así como el interés general por parte de la población mexicana, y el interés de la presente administración federal en el tema espacial, con la introducción de la infraestructura espacial en el Plan Nacional de Desarrollo
- De la relación que surgió entre la AEM y la ANMM al estar convencidas de los beneficios para la salud del pueblo de México haciendo uso de la ciencia y tecnología espacial. La unión de estas dos instituciones es parte medular del proyecto
- La estrecha colaboración que se ha tenido entre las instituciones nacionales (AEM, ANMM, SoMMEM, UASLP, UAEM, etc.) e internacionales
- El creciente interés que se ha tenido por parte de la comunidad médica y científico-tecnológica a las diferentes actividades realizadas
- Los potenciales beneficios que se tendrán al impulsar los temas propuestos
- La capitalización de la infraestructura espacial de telecomunicaciones y de monitoreo del territorio que el gobierno mexicano desarrolla actualmente en el segmento espacial y en el segmento terrestre

Como resultado a largo plazo de llevar a cabo la presente propuesta, se contará con grupos de desarrollo interinstitucionales, consolidados, desde sus diversas especialidades y contribuciones, y desde un instituto nacional de medicina espacial creado *ex profeso* y posicionado a nivel internacional como un importante centro de desarrollo e investigación, donde se coadyuve a disminuir la brecha científico-tecnológica que se tiene con respecto a países de altos ingresos. Se contará además con nuevas líneas de investigación, donde la interacción entre grupos interinstitucionales será la clave para obtener el impacto socioeconómico esperado.

Se creará un programa nacional de actividades en materia de medicina espacial y ciencias afines que permita el desarrollo y transferencia de ciencia y tecnología cuyo objetivo central sea coadyuvar en la solución de problemas específicos de la salud de los mexicanos. También se establecerán vínculos formales de colaboración institucional que permitirán la plena operatividad del programa de medicina espacial y ciencias afines y su objetivo central. Se crearán acuerdos institucionales para incrementar el financiamiento del desarrollo de proyectos y formación de capital humano.



# Índice

La letra *c* refiere a cuadros; la letra *f*, a figuras.

## A

abordaje integrado, 239*f*  
abordaje del paro cardíaco en microgravedad,  
  algoritmo integrado para, 260  
acumulación de líquidos en la parte superior  
  del cuerpo, 222  
  representación esquemática de los cambios  
  fisiológicos, 222*f*  
adaptación espacial, síndrome de, 78  
  proceso de envejecimiento en el Espacio, 81  
  reproducción humana en gravedad cero, 81  
adaptación fisiológica en el Espacio, 139  
adaptación renal, 190*f*  
  sistema cardiovascular, 139  
Agencia Espacial Europea (ESA), 87  
alteraciones del sistema inmune en el Espacio, 217  
  fisiológicas asociadas con vuelos  
  espaciales, 215*f*, 215*c*  
  células asesinas naturales, 219  
  células T, 219  
  citocinas, 219  
  genéticas y citoesqueleto en microgravedad, 271  
  leucocitosis, 218*c*  
  monocitos, 218  
  neutrófilos, 218  
  principales regiones del organismo humano  
  afectadas, 213*f*  
  principales trastornos inmunológicos asociados, 216*c*  
ambiente y fisiología espacial, 317  
  alteraciones visuales, 221, 318  
  aparato cardiovascular, 319  
  ausencia de atmósfera, 317  
  ingravedad, 317  
  musculoesquelético, 318  
  neurológico y sensorial, 318  
  radiación, 318  
  sistema inmune, 319  
  temperatura, 318  
ambientes cambiantes gravitacionales, 183  
anestesia y manejo de la vía aérea  
  en microgravedad, 299, 308  
  anestesia general vs. regional, 306  
  bloqueadores neuromusculares en G0, 308  
  cambios fisiológicos en gravedad cero, 300

  ketamina, el inductor espacial, 307  
  manejo anestésico, 304  
angioplastia láser, 104  
aportaciones de la tecnología espacial a la salud  
  humana, 99  
  clasificación, 100  
  creación de nuevos medicamentos y mejores  
  tratamientos, 113  
  desarrollo para la salud de los astronautas, 102  
  mejorar la salud de la población en tierra, 108  
  para observación de la Tierra, 100  
asentamientos espaciales, 75  
  ciudad espacial, 76, 76*f*  
aspectos ambientales positivos del vuelo espacial, 160*c*  
Astrobiología y medicina espacial, 87, 90  
  conquista del Espacio, 95  
  primeros vuelos espaciales, 93  
  proyecto BIOPAN, 87  
audios para mejorar el sueño, 116  
autorregulación cerebral, 156  
auxiliar vestibular, 126  
avión KC-135 de la NASA, 242*f*

## B

barotrauma, 332  
*Big data*, 65  
  ¿cómo integrarla a la medicina?, 66  
  *Wearables*, 66, 67*f*  
biología de la radiación, 17  
biología gravitacional, 17  
biorreactores, 115  
bloqueadores neuromusculares en gravedad cero, 308

## C

cambios fisiológicos en gravedad cero, 300  
  aparato osteomuscular, 302  
  aparato respiratorio, 301  
  desmineralización ósea, 302  
  síndrome de adaptación al Espacio, 303  
  s. renal, 303  
cambios fisiológicos y manifestaciones clínicas, 293  
  reducción de gravedad, 291*f*  
  sistema cardiovascular, 293  
  s. hematopoyético, 294



- s. inmune, 294, 303
- s. neuroendocrino, 295
- s. osteomuscular, 295
- s. renal, 294
- s. respiratorio, 295
- cambios hematológicos en microgravedad, 345-347
  - eventos desencadenantes de neocitólisis, 348f, 349f
- campo de radiación en el Espacio, 210, 210f
  - factores interplanetarios contribuyentes al aumento del, 211f
- cáncer de piel, mejores tratamientos para, 115
  - biorreactores, 115
  - sensores de radiación, 118
- cardiovascular, sistema, 139, 178
  - adaptaciones tardías, 147
    - a. tempranas, 139
  - arritmias cardíacas, 147
  - aspectos hemodinámicos, 144
  - atrofia cardíaca, 147
  - cambios fisiológicos, 141f
  - redistribución de líquidos, 139
  - representación esquemática, 140f
  - retorno a la gravedad: intolerancia ortostática, 148
- cirugía en el espacio, 351
  - anestesia, 353
  - campo estéril y manejo de la hemorragia, 354
  - cicatrización, 355
  - evaluación diagnóstica, 353
  - trauma y ATLS, 353
- clínica de medicina de vuelo, 16
- COBE, 31
  - mapa del cielo, 32f
- comunicación asíncrona y síncrona, 45
- confinamiento y aislamiento, 322
- conquista del Espacio, 95
- consecuencias biomédicas de la exposición
  - a la radiación del Espacio, 212
    - alteración de las fuerzas en el cuerpo humano, 214f
- Cosmos, el, 19
  - grandes nombres, historias, misiones y resultados, 32
  - infrarrojo, 30
  - microondas: origen de estructuras cósmicas, 31
  - nuestra galaxia, la Vía Láctea, 20f
  - rayos gamma: el Universo violento, 20
  - rayos X: fuegos artificiales perpetuos en el Universo, 22
  - telescopio espacial Hubble, 27, 28f
  - ultravioleta: inicio de la astronomía, 26

## D

- disbarismo o síndrome de descompresión en el Espacio, 293
- disfunción cognitiva en el Espacio, 157
  - aspectos ambientales positivos, 160c
    - a. personales y sociales positivos, 160c
  - factores de estrés en vuelos espaciales de larga duración, 158c
  - monitoreo de la evolución psicológica en misiones espaciales, 159

- problemas psiquiátricos, 161
- salud conductual y psiquiátrica, 160
- trastornos cognitivos, 161
- dispositivo para corrección de la orientación personal espacial, 130
  - diadema de estimulación, 132f
  - interfaz sistema-humano, 131
- dispositivo para estabilización de la postura en microgravedad, 121
  - auxiliar vestibular (prótesis vestibular), 126
  - sistema vestibular, 122, 123f
- dispositivos, para el análisis de sangre, 104
  - para otorgar terapia, 241f
- dolor articular, 337

## E

- edema de papila, 226
- efectos de alteraciones en la gravedad sobre la fertilidad, 207
- efectos de la microgravedad en la visión, 221
  - acumulación de líquidos en la parte superior del cuerpo, 222
  - aumento de volumen de la coroides subfoveal y de la retina foveal, 225
    - tomografía de coherencia óptica (OCT), 226f
  - cambios hemodinámicos en los ojos, 223f
  - cambios en la presión intraocular, 224
- catarata, 230
  - reducción del eje anteroposterior del globo ocular, 231f
  - extracción, 234f
  - ceguera por degeneración macular, combate a, 114
- daño del epitelio pigmentario de la retina, 229
- en neurotransmisores, 153
- esquema de capas de retina y epitelio pigmentario, 229f
- hipermetropía, 230
- movimientos oculares y coordinación visuomotora, 232
  - control de, participando el vestíbulo, 233f
  - presión intraocular, cambios en la, 224
    - esquema del globo ocular, 225f
- efectos del vuelo espacial en la reproducción humana, 207
- efectos neurológicos de la microgravedad, 154
  - equilibrio postural, 155
  - respuestas sensoriales, 155
  - sistema vestibular, 154
- espectrógrafo de orígenes cósmicos, 28
- estimulación galvánica vestibular (EGV), 125
- estrés en vuelos espaciales de larga duración, 158c
- evolución psicológica en misiones espaciales, monitoreo de la, 159
- Evetts-Russomano, método de, 248f, 257c

## F

- Fermi, Enrico, 22
- fijación para otorgar RCP en microgravedad, 243f
- fisiología pulmonar, conceptos básicos de, 165
  - “el resorte”, 167

zonas de West, 165  
fisiología, de vuelo espacial, 16

## G

galaxia, la Vía Láctea, 20*f*  
Gauer, Otto H., 185  
grandes nombres, historias, misiones y resultados, 32  
  Hiparco de Nicea, 34  
  Johannes Kepler, 36  
  misión Kepler, 35*f*  
  satélite Hiparcos, 33*f*  
  Tycho Brahe, 34

## H

Herschel, misión, 31  
hiperplasias de tejidos blandos, 334  
  reactivas y tumores, 334  
hipersensibilidad, 338  
Hiparcos, satélite, 33*f*  
historia de la psicología en los programas  
  espaciales, 311  
Hubble, Edwin, 29

## I

imágenes hiperespectrales para diagnóstico  
  médico, 110  
impacto de microgravedad y radiación espacial en  
  comportamiento celular y carcinogénesis, 265  
  alteraciones inmunológicas, genéticas y cito-  
  esqueleto, 271  
  microgravedad y biología de las células  
  tumORAles, 270  
  radiación espacial y cáncer, 266  
infrarrojo: resplandecemos, 30  
  IRAS, 30  
  KAO, 30  
  mapa del cielo en IR con IRAS, 30*f*  
inicios y avances de la medicina espacial  
  en México, 11  
  biología de la radiación, 17  
  b. gravitacional, 17  
  clínica de medicina de vuelo, 16  
  fisiología de vuelo, 16  
  nutrición, 17  
  psicología, 16  
intercambio gaseoso y relación ventilación-  
  perfusión, 172  
interfaz sistema-humano, 131  
  diadema de estimulación, 132*f*  
Internet de las cosas, 33

## K

Kepler, Johannes, 6  
  misión, 35*f*  
ketamina, el inductor espacial, 307  
Kuiper Airbone Observatory, 30

## L

leucocitosis en vuelos cortos y prolongados, 218*c*  
limpieza del agua de bacterias y virus, 104

  sistema de filtración de agua, 105*f*  
líquidos, electrolitos y función renal en el espacio, 185  
  adaptación renal, 190*f*  
  historia, 185  
  nefronas, 188*f*  
  nuevos horizontes, 191

## M

manejo anestésico en microgravedad, 304  
  condiciones médicas de la medicina espacial, 306*c*  
manejo de agua en el Espacio, 201  
manejo de la vía aérea, 259  
  en escenarios de microgravedad, 308  
  prácticas de manejo avanzado, 260*f*  
medicina digital, 68  
medicina espacial y microbiología, 90, 281  
  programa médico de las misiones espaciales, 282  
  retos en los programas espaciales para  
  prevención de infecciones, 282  
medicina reproductiva y gravedad, 205  
  alteraciones en la gravedad sobre la fertilidad, 207  
  antecedentes, 205  
  microgravedad y reproducción en humanos, 206  
  m. y reproducción en mamíferos, 206  
  vuelo espacial en la reproducción humana, 207  
medicina y ciencias espaciales, 1-9  
medidas de bioseguridad y biocustodia en misiones  
  espaciales, 284  
  actividades de la tripulación, 286  
  infraestructura de la nave espacial, 284  
  métodos para evaluar la calidad de la RCP, 237*c*  
  microbiología espacial e infecciones en el espacio, 275  
  importancia y conocimiento del metabolismo  
  microbiano, 280  
  medicina espacial y, 281  
  y riesgo biológico, 277  
microgravedad y, 260, 346  
  biología de las células tumorales, 270  
  cambios hematológicos, 347  
  c. inmunológicos, 347  
  reproducción en humanos, 206  
  r. en mamíferos, 206  
microondas: el origen de las estructuras cósmicas, 31  
modelo matemático de función vestibular  
  y su implementación técnica, 126  
modelo teórico del pulmón durante el volumen  
  residual, 169*f*  
monitoreo de la vegetación desde el Espacio, 102

a. hidratables para proyecto Géminis, 195f  
a. utilizados en primeras misiones, 194f  
forma de empaquetar los alimentos, 194f

## O

Observatorio Astrofísico Guillermo Haro, 22  
odontología en el Espacio, 325  
abscesos, gingival y periodontal, 333  
alternativas de tratamiento, 342  
bruxismo, 337  
caries dental, 328, 328c  
dientes incluidos o impactados, 340  
dolor articular, 337  
endodoncia y afecciones periapicales, 330  
dolor, 331  
enfermedad periodontal, 329  
erosión, 339  
estructura dental, 326  
hiperplasias de tejidos blandos, 334  
hipersensibilidad, 338  
quiste periapical, 335  
recomendaciones, 341  
saliva, 327  
xerostomía parcial, 335  
osteoporosis, mejores tratamientos, 114

## P

paro cardiaco en gravedad cero, factores implicados  
en la atención del, 252  
inherentes a la víctima, 252  
i. al ambiente, 253  
i. al reanimador, 252  
patología humana en el Espacio, 82  
muerte, 83f  
perfil anatomofisiológico, 77  
aparato digestivo, 78  
a. respiratorio, 78  
perfil antropométrico del hombre cósmico, 84  
redistribución de líquidos, 77  
sistema cardiovascular, 77  
s. muscular, 78  
perfil del hombre cósmico, 73  
anatomofisiológico, 77  
antropométrico, 84  
aparato digestivo, 78  
a. respiratorio, 78  
asentamientos espaciales, 75  
ciudad espacial, 76, 76f  
patología humana en el Espacio, 82  
por qué ir al Espacio, 74  
recursos naturales extraterrestres, 75  
redistribución de líquidos, 77  
sistema cardiovascular, 77  
s. muscular, 78  
s. óseo, 78  
perfil psicológico de los astronautas y adaptación, 311  
confinamiento y aislamiento, 322  
historia de la psicología en los programas  
espaciales, 311  
psicología espacial, 317

selección de personal astronauta, 312  
perspectiva histórica de la reanimación  
cardiopulmonar en microgravedad, 242  
avión KC-135 de la NASA para vuelos  
parabólicos, 242f  
dispositivo mecánico de fuelle para RCP, 245f  
dispositivos de suspensión corporal en laboratorios  
terrestres, 251f  
investigaciones a bordo de una aeronave C-9  
de la NASA, 248f  
método de Evetts-Russomano, 248f  
profundidad de las compresiones torácicas, 250f  
protocolo integrado de SVCA  
en microgravedad, 249f  
RCP en modelo porcino durante vuelo  
parabólico, 247f  
sistema de fijación para otorgar RCP  
en microgravedad, 243f  
s. médico de fijación para el reanimador, 249f  
uso del dispositivo CardioVent™, 246f  
postura de la Academia Nacional de Medicina  
de México, 357  
primeros vuelos espaciales, 93  
principales misiones de Skylab, 26  
problemas psiquiátricos en el Espacio, 161  
prótesis vestibular, 126  
dispositivo para la corrección de la orientación  
personal espacial, 130  
modelo matemático y su implementación  
técnica, 126  
protocolo integrado de SVCA en microgravedad, 249f  
proyecto BIOPAN, 87  
psicología espacial, 16, 317  
accidentes, 321  
alimentación, 321  
alteración sueño-vigilia, 320  
ambiente y fisiología espacial, 317  
factores interpersonales, 319  
incorporación de las mujeres a los programas  
espaciales, 320  
sexualidad y reproducción, 320  
pulmón en microgravedad, el, 168  
intercambio gaseoso y relación  
ventilación-perfusión, 172  
volúmenes pulmonares y flujo espiratorio, 168

## R

Radiación, cósmica galáctica, 212  
de eventos de partículas solares, 212  
radiación espacial y cáncer, 266  
aberraciones cromosómicas, 268  
antecedentes familiares y personales, 268  
detección de células preneoplásicas y microtu-  
mores inactivas, 269  
ensayos fenotípicos y genotípicos, 269  
factores a considerar, 268  
lesión al DNA, 267  
monitoreo posterior al vuelo espacial, 269  
radiación espacial, daño de la, 211  
cósmica galáctica, 212

de eventos de partículas solares, 212  
 intravehicular, 212

rayos gamma: el universo violento, 20  
 CGRO, 21  
 detectores de superficie como HAWC, 21  
 Fermi-LAT, 20  
 mapa del cielo obtenido con Fermi-LAT, 21*f*  
 telescopios Cherenkov atmosféricos, 21  
 t. espaciales, 21

rayos X: fuegos artificiales perpetuos  
 en el Universo, 22  
 mapa del cielo en rayos X con ROSAT, 24*f*  
 Röntgen, Wilhelm Conrad, 25  
 ROSAT, satélite, 22

RCP, en medio hospitalario, 241*f*  
 de alta calidad en el paciente adulto, 236*c*  
 dispositivo mecánico de fuente para, 245*f*  
 en modelo porcino durante vuelo  
 parabólico, 247*f*

RCP y soporte vital cardiovascular básico  
 y avanzado, 236  
 abordaje integrado, 239*f*  
 características de la RCP de alta calidad  
 en el paciente adulto, 236*c*  
 dispositivos para otorgar terapia, 241*f*  
 elementos del soporte vital cardiovascular, 238*c*  
 métodos para evaluar la calidad, 237*c*  
 soporte vital cardiovascular avanzado, 240*f*

reanimación cardiopulmonar en microgravedad, 235  
 algoritmo para abordaje del paro cardiaco, 260  
 consideraciones generales y soporte vital  
 cardiovascular, 236  
 factores implicados en la atención del paro  
 cardiaco en gravedad cero, 252  
 manejo de la vía aérea, 259  
 perspectiva histórica, 242  
 técnicas de, 254

rehabilitación después del vuelo en curso,  
 estrategias de, 182

rehabilitación en microgravedad, 175  
 adaptación a los ambientes cambiantes  
 gravitacionales, 183  
 cardiovascular, 178  
 musculoesquelético, 179  
 neurovestibular, 181  
 riesgos de radiación y rehabilitación, 181

requerimientos nutricionales y cambios fisiológicos  
 en microgravedad, 199

“resorte, el”, 167, 167*f*

respuestas sensoriales, 155

revisión de los ojos humanos usando tecnología  
 de telescopios espaciales, 112

riesgos de radiación y rehabilitación, 181

robots de hospital, 112

ROSAT, satélite, 22

RVO, 135

## S

saliva, 327  
 salud conductual y psiquiátrica, 160

selección de personal astronauta, 312  
 aspirantes a astronauta, 312  
 astronautas, 314  
 perfil psicológico del aspirante, 313  
 preparación para el espacio, 316  
 soporte psicológico a astronautas, 315

sensores de radiación para tratamientos cardiaco  
 y de cáncer, 118

síndrome de adaptación al Espacio, 292  
 principales alteraciones en la fisiología corporal  
 bajo microgravedad, 292*f*

sistema inmune en el Espacio, 209, 216  
 alteraciones, 217  
 exposición a la radiación del espacio, 212  
 daño de la radiación espacial, 211  
 radiación cósmica galáctica, 212  
 r. de eventos de partículas solares, 212  
 r. intravehicular, 212

sistema médico de fijación para el reanimador, 249*f*

sistema neurológico y vestibular, 122, 123*f*, 153, 154  
 autorregulación cerebral, 156  
 disfunción cognitiva, 157  
 efecto de la microgravedad  
 en neurotransmisores, 153  
 e. neurológicos de la microgravedad, 154

sistema respiratorio, 165  
 conceptos básicos de fisiología pulmonar, 165  
 el pulmón en microgravedad, 168

sistema vestibular, 122  
 estimulación galvánica, 124

sistemas de almacenamiento, 200  
 requerimientos nutricionales, 200*c*

soporte psicológico a astronautas, 315  
 durante el vuelo, 315  
 posterior al vuelo, 316  
 prevuelo, 315

soporte vital básico y atención del trauma  
 en microgravedad, 295  
 fármacos más usados en los vuelos espaciales, 296*c*

soporte vital cardiovascular avanzado, 238*c*, 240*f*  
 suspensión corporal en laboratorios terrestres,  
 dispositivos de, 251*f*

## T

técnicas de RCP en ambiente de microgravedad, 254  
 maniobra a horcajadas, 255*c*  
 maniobra de Heimlich modificada, 257*c*  
 método a horcajadas alrededor del tórax, 258*c*  
 m. de Evetts-Russomano, 257*c*  
 m. lateral convencional, 255*c*  
 m. vertical sobre las manos, 256*c*

tecnología de la información aplicada a la ME, 39  
 comunicación asíncrona, 45  
 c. síncrona, 45  
 recursos telemáticos, 44

tecnología espacial para mejorar la salud  
 de la población en tierra, 108  
 biopsias de mama, 109  
 cámara de rayos X, 109  
 cirugía robótica, 108

implante coclear, 109  
 mandíbulas de vida o tijeras de la vida, 109  
 muñecos simuladores, 112  
 prótesis, 109  
 revisión de los ojos humanos con telescopios  
   espaciales, 112  
 robots de hospital, 112  
 sistema de imágenes hiperespectrales  
   para diagnóstico médico, 110  
 unidad de cuidado intensivo, 109  
 tecnología para la salud de los astronautas, 102  
 angioplastia láser, 104  
 dispositivos para el análisis de sangre, 104  
 limpieza del agua de bacterias y virus, 104  
 los gemelos, 104  
 maletín médico portátil, 107*f*  
 marcapasos cardiacos de última generación, 104  
 píldora termómetro, 105  
 sistema de filtración de agua, 105*f*  
 telemedicina, 102  
 termómetros infrarrojos, 104  
 telemedicina, aeroespacial, 69, 102  
   evolución de la, 60, 66*f*  
 telemedicina y medicina satelital, 55  
   *Big data*, 65, 66, 67*f*  
   definición, 59  
   evolución de la telemedicina, 60, 66*f*  
   Internet de las cosas, 63, 64  
   medicina digital, 68  
   revistas especializadas, 60  
   telemedicina aeroespacial, 69  
 telescopio espacial Hubble (HST), 26, 27, 28*f*  
   espectrógrafo de orígenes cósmicos, 28  
   Wide Field and Planetary Camera 2, 28  
 terapias físicas para rehabilitación, 113  
 termómetros infrarrojos, 104  
 TIC en medicina aeroespacial, 46

transferencia de la, 48  
 Tycho Brahe, 34

## U

ultravioleta: inicio de la astronomía, 26  
   GALEX, 26  
   IUE, 26  
   mapa del cielo en ultravioleta con IUE, 27*f*  
   principales misiones de Skylab, 26  
   telescopio espacial Hubble (HST), 26  
 urgencias médicas en vuelos espaciales, 291  
 cambios fisiológicos y manifestaciones clínicas, 293  
 reducción de gravedad, 291*f*  
 disbarismo o síndrome de descompresión, 293  
 efectos de la microgravedad en el organismo  
   humano, 292  
 síndrome de adaptación al espacio, 292  
 soporte vital básico y atención del trauma  
   en microgravedad, 295  
 uso de tecnología espacial para observación  
   de la Tierra, 100  
   monitoreo de la vegetación desde el espacio, 102  
   vigilancia de enfermedades, 101  
 uso del dispositivo CardioVent<sup>TM</sup>, 246*f*

## V

vigilancia de enfermedades, 101  
 volúmenes pulmonares y flujo espiratorio, 168  
 modelo teórico del pulmón, 169*f*  
 vuelo parabólico a bordo de una aeronave C-9  
   de la NASA, 248*f*

## W

West, zonas de, 165, 166*f*  
 Wide Field and Planetary Camera 2, 28  
 WMAP, 32  
   mapa del cielo, 32*f*

Esta edición consta de 1000 ejemplares y terminó de imprimirse  
 en agosto de 2016 en Surtidora Gráfica, Calle Oriente 233 No. 297,  
 Col. Agrícola Oriental, México, D. F. Hecho en México.

En muchos de los grandes retos del siglo XXI, las tecnologías espaciales juegan un papel central: en comunicaciones debido a su amplia cobertura, contribuyen a la reducción de la brecha digital, que experimentan comunidades remotas. Por eso, el gobierno de la República cuenta con el "Programa Nacional de Actividades Espaciales", a cargo de la Agencia Espacial Mexicana, orientado al desarrollo de tecnologías espaciales y afines que contribuyan a solventar necesidades de la sociedad.

La Academia Nacional de Medicina de México, consciente de la importancia de las tecnologías espaciales en desarrollo de nuevas soluciones, incluyendo su impacto en salud, se ha adherido a iniciativas de la Agencia Espacial Mexicana a fin de fortalecer la estrategia y líneas de acción de medicina espacial en México. El objetivo de la estrategia central es impulsar el desarrollo de la investigación científica y tecnológica en materia de medicina espacial que comprende: el desarrollo de nuevo conocimiento en la disciplina, la formación de recursos humanos calificados, financiamiento, vinculaciones interinstitucionales, desarrollo de foros y congresos para difusión de los programas académicos y científicos organizados por la Agencia Espacial Mexicana y la Sociedad Mexicana de Medicina del Espacio y Microgravedad (SoMMEM).

Este libro contribuirá de manera importante al posicionamiento de la medicina espacial en el contexto de las disciplinas de la salud en el México moderno, como una de las primeras referencias en la temática. Su contenido da cuenta de este innovador espacio intelectual y profesional a través de tres secciones: Medicina y Ciencias Espaciales, Adaptación Fisiológica en el Espacio, y Escenarios Especiales de la Medicina Espacial. Una cuarta sección se refiere a Recomendaciones con base en seis estrategias de acción.

El acceso y el uso del ambiente espacial provee oportunidades únicas para desarrollos científicos y tecnológicos que coadyuvan en el entendimiento y la solución de problemáticas de salud, formación de profesionales, y construcción de capacidades para la medicina espacial y las ciencias biológicas espaciales.

