

La *cardiología aeroespacial* tiene interés práctico porque en el mundo radican 140 millones de habitantes en lo que se conoce como altitud media (1500 a 3000 metros sobre el nivel del mar) y gran altitud (3000 a 5000 m snm), lo cual impone cambios importantes en la anatomía y la fisiología de los sistemas cardiovascular, pulmonar y sanguíneo; también modifica la patología propia de estas áreas del organismo humano. En México, más de la mitad de su población radica en la Meseta Central de la República (altitud media).

En esta obra se ofrece la información básica sobre los efectos que la altitud y la navegación aérea y espacial ejercen sobre el sistema cardiovascular, y los principales adelantos que la investigación cósmica ha traído a la cardiología.

La actividad aeroespacial tiene cuatro escenarios principales: diferentes niveles de altitud en la atmósfera terrestre, el espacio aéreo, el espacio exterior y la superficie de otros cuerpos celestes. En este libro se describe el comportamiento del sistema cardiovascular en estos diferentes escenarios.

La cabina de las naves aéreas presurizadas conserva durante el vuelo una presión interior equivalente a un nivel de altitud de 1500 a 2500 m snm, y aun cuando esta situación es en general bien tolerada por las personas sanas, algunos pacientes cardiopulmonares pueden ser severamente afectados por el vuelo.

La única experiencia que por ahora se tiene de la presencia del ser humano en otros cuerpos celestes, es la de los 12 astronautas de la NASA que se posaron en la Luna; el conocimiento médico obtenido en esa hazaña es limitado, pero podemos afirmar que el sistema cardiovascular funciona satisfactoriamente en un campo gravitacional menor que el de la Tierra.

Lo anterior exige que el médico en general se familiarice con la fisiología de la altitud y del vuelo, en particular con el comportamiento del sistema cardiovascular, porque es aquí donde se dan las dos terceras partes de los problemas médicos a bordo y los aterrizajes no programados.

Por lo que respecta a la navegación espacial, se tiene ya un amplio conocimiento sobre la fisiología y la medicina en este ámbito; es igualmente el sistema cardiovascular el que con mayor intensidad resulta afectado. La investigación espacial ha contribuido de manera importante al progreso de la medicina, y la mayor parte de esos avances corresponden a la cardiología.

Además, en el mundo se transportan por avión cerca de 2000 millones de pasajeros al año; tan sólo en México se trasladan por avión 50 millones anualmente.

Se agradece de manera particular al Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica, CONACYT, Gobierno del Estado de Tamaulipas, por el apoyo brindado para la publicación de este libro.

ÁREA: CIENCIAS DE LA SALUD

ISBN 978-607-05-0381-8



9 786070 503818

GRUPO

NORIEGA EDITORES

limusa@noriegaeditores.com

www.noriega.com.mx

Iglesias

CARDIOLOGÍA AERROESPACIAL

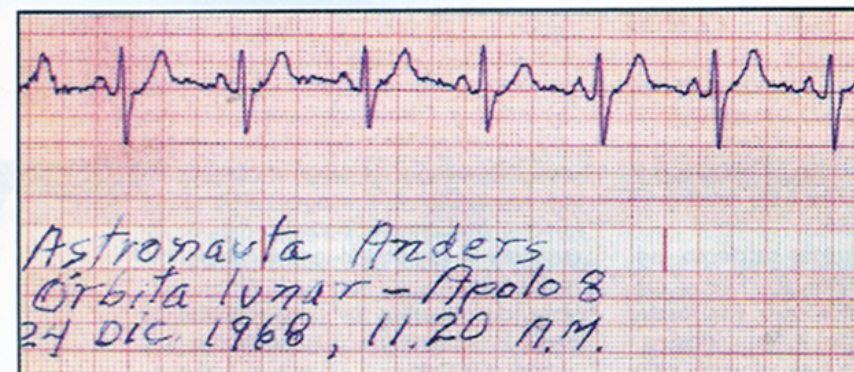


Cardiología aeroespacial

Ramiro Iglesias Leal



LIMUSA



Cardiología aeroespacial

Ramiro Iglesias Leal



LIMUSA

Iglesias, Ramiro

Cardiología aeroespacial / Ramiro Iglesias

Leal. — México : Limusa : Universidad Autónoma
de Tamaulipas, 2012

220 p.: fot. 25.5 x 17 cm.

ISBN: 978-607-05-0381-8

Incluye índices

Rústica

**1. Aeronáutica - Aspectos médicos 2. Medicina
aeronáutica 3. Medicina aeroespacial**

Dewey: 616.980'213 | 22 / I243c

LC: RC1062

© COEDICIÓN UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TAMAULIPAS /
EDITORIAL LIMUSA, S. A. DE C. V., 2012

LA PRESENTACIÓN Y DISPOSICIÓN EN CONJUNTO DE

CARDIOLOGÍA AEROESPACIAL

SON PROPIEDAD DEL EDITOR. NINGUNA PARTE DE ESTA OBRA
PUEDE SER REPRODUCIDA O TRANSMITIDA, MEDIANTE NINGÚN
SISTEMA O MÉTODO, ELECTRÓNICO O MECÁNICO (INCLUYEN-
DO EL FOTOCOPIADO, LA GRABACIÓN O CUALQUIER SISTEMA
DE RECUPERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN), SIN
CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DEL EDITOR.

DERECHOS RESERVADOS:

© 2012, EDITORIAL LIMUSA, S. A. DE C. V.

GRUPO NORIEGA EDITORES

BALDERAS 95, MÉXICO, D.F.

C. P. 06040

 (55) 51 30 07 00

01 (800) 706 91 00

 (55) 55 12 29 03

 limusa@noriegaeditores.com

 www.noriega.com.mx

CANIEM Núm. 121

PRIMERA EDICIÓN

HECHO EN MÉXICO

ISBN: 978-607-05-0381-8



Dedicatoria

Dedico este modesto trabajo a dos gigantes de la medicina contemporánea y a dos instituciones gloriosas, con humildad, admiración y gratitud.

Dr. Ignacio Chávez Sánchez, pionero de la cardiología moderna y fundador del Instituto Nacional de Cardiología de México.

Dr. Hubertus Strughold, investigador ilustre y precursor del conocimiento relacionado con la presencia del ser humano en el espacio. Es conocido actualmente como el “padre de la medicina espacial”.

Instituto Nacional de Cardiología “Ignacio Chávez”, institución de gran renombre internacional y a quien debo mi formación de cardiólogo.

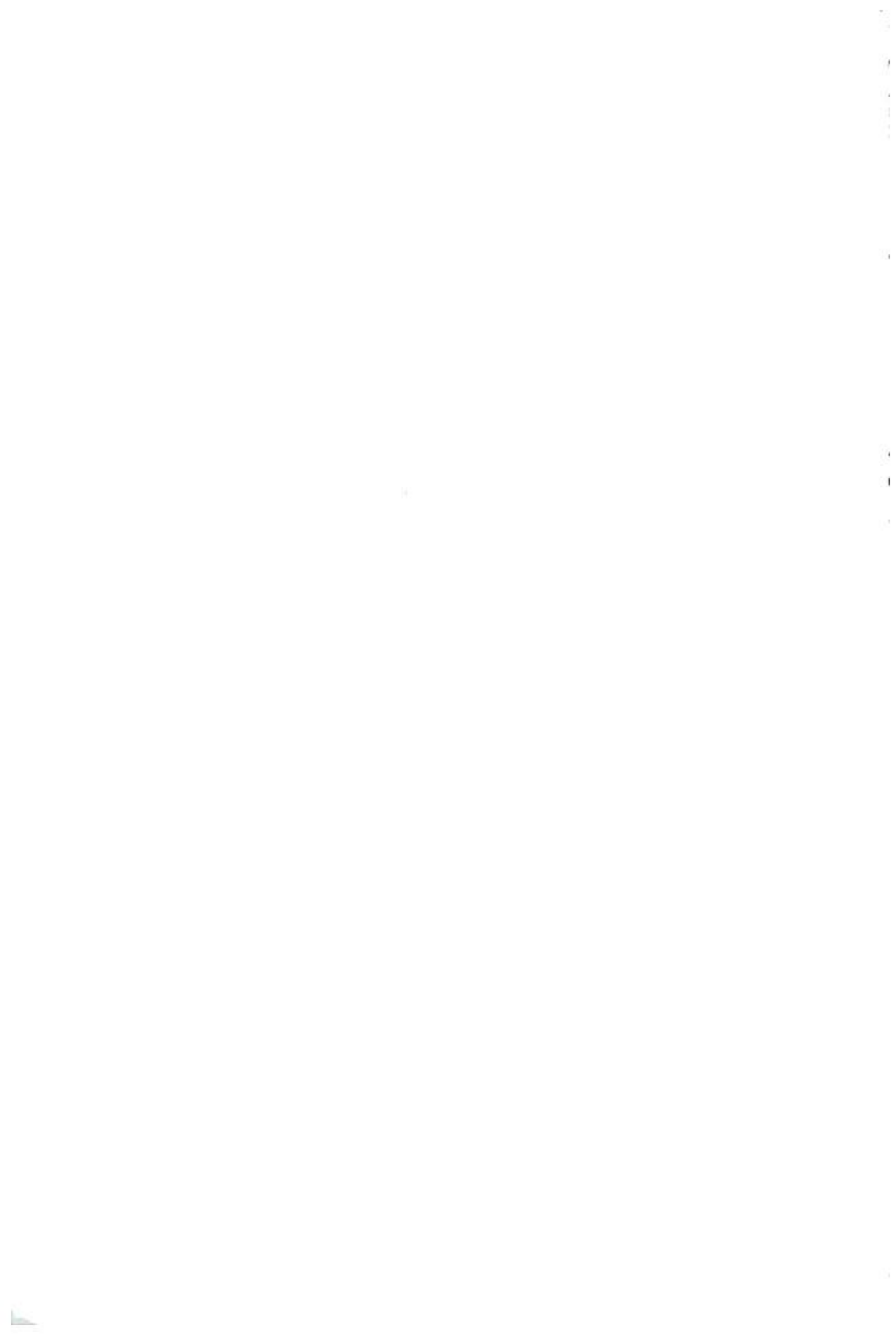
La NASA, la más portentosa organización científica y tecnológica en la historia de la humanidad, de la que he recibido la mayor parte del conocimiento de la medicina espacial.



Agradecimiento

En su mayor parte, este libro fue elaborado en la Universidad Autónoma de Tamaulipas durante mi estancia como asesor académico.

El apoyo de la Rectoría y de varias dependencias de esta casa de estudios fue generoso y decisivo para llevar a feliz término esta obra.



Contenido

	Introducción	11
Capítulo 1	El medio ambiente aeronáutico	13
Capítulo 2	Cambios de presión parcial de oxígeno: hipoxia	27
Capítulo 3	Enfermedad de la altitud	43
Capítulo 4	Cambios de presión barométrica (enfermedad descompresiva)	59
Capítulo 5	Cambios de velocidad. Efectos de la aceleración sobre el sistema cardiovascular	69
Capítulo 6	Certificación cardiológica del personal de vuelo	81
Capítulo 7	Transporte aéreo del cardíopata	93

Capítulo 8	Efectos de la fuerza de gravedad sobre el sistema cardiocirculatorio	103
Capítulo 9	El ámbito espacial	113
Capítulo 10	Sistemas de apoyo vital en el espacio	129
Capítulo 11	Selección de astronautas: aspectos cardiovasculares	143
Capítulo 12	Fisiología cardiovascular en el espacio	155
Capítulo 13	Examen clínico cardiovascular en el espacio	167
Capítulo 14	El aparato cardiovascular después de los vuelos espaciales	179
Capítulo 15	Contribuciones de la tecnología espacial a la cardiología	189
	Índice onomástico	199
	Índice temático	201

Introducción

En este libro se analizan los aspectos más sobresalientes del comportamiento del corazón y la circulación sanguínea durante la actividad aeronáutica y espacial.

El conocimiento generado en esta área de la medicina es abundante y adquiere cada vez más importancia porque la transportación aérea se incrementa continuamente. En la actualidad se transportan por avión alrededor de 2000 millones de personas al año. En México el transporte aéreo traslada aproximadamente 50 millones de pasajeros; sólo en el aeropuerto de la ciudad de México se reciben entre 24 y 25 millones de viajeros y estas cifras se incrementan año tras año. Por otra parte, más de la mitad de la población de México reside en la Meseta Central y en otros lugares de altitud media (entre 1500 y 3000 metros de altura). En los países andinos existen poblaciones importantes asentadas en zonas de gran altitud que imponen a sus habitantes una fisiología y una patología cardiovascular propia.

Los residentes de zonas bajas que se trasladan a lugares de altitud media o de gran altitud experimentan cambios fisiológicos que en algún momento pueden comprometer su salud y hasta la vida; pueden sufrir cuadros patológicos muy graves, como la enfermedad aguda de la montaña o el edema agudo pulmonar de la altitud. Para las personas sanas, el viaje en avión teóricamente no debe presentar ningún problema, pero algunos enfermos, particularmente del sistema cardiorrespiratorio, pueden ser afectados seriamente por las condiciones del vuelo.

Las dos terceras partes de las emergencias médicas ocurridas durante el vuelo, así como la mayoría de las muertes a bordo de aeronaves comerciales y los aterrizajes no programados son debido a problemas cardiovasculares. La mayor parte de los enfermos cardiorrespiratorios compensados pueden viajar en avión o trasladarse a regiones de altitud media, pero en general requieren de indicaciones y cuidados específicos.

Por estas razones, y por otras que iremos analizando en el desarrollo de esta obra, es que la primera parte de este libro está dedicada al estudio de la fisiología del vuelo y a la patología de la altitud. En la segunda parte nos ocupamos de tópicos relacionados con la cardiología espacial, cuyo interés no es meramente académico, sino que aporta nuevos conceptos y tecnología médica avanzada que ha contribuido al progreso de la cardiología y la medicina en general.

En la década de los años sesenta del siglo xx se suscitó un acontecimiento de enorme importancia en el proceso evolutivo de la humanidad al constatar que el ser humano es capaz, con la protección de trajes y naves espaciales, de sobrevivir en el espacio exterior, y aún más, de viajar a la Luna y desarrollar sobre su superficie una serie de actividades y volver sano y salvo a la Tierra.

Más tarde, en los años ochenta del siglo pasado, varios cosmonautas rusos permanecieron más de un año en la estación espacial Mir, tiempo que sería suficiente para hacer viajes interplanetarios.

En poco tiempo se iniciará la transportación comercial aeroespacial, o sea, los vuelos suborbitales. Los vehículos de la siguiente generación navegarán a la vez como aviones y como cohetes espaciales, es decir, que una fracción del vuelo de crucero lo harán por encima del nivel de sustentación de la atmósfera (80 km de altura), lo que lo convierte en vuelo espacial propiamente dicho.

Por otra parte, se trabaja actualmente en proyectos de turismo espacial al alcance no sólo de millonarios, sino también de personas de recursos económicos menores. Los escenarios del turismo y, verosímilmente, de las futuras industrias espaciales, serán en órbita terrestre, en la superficie de la Luna y en el espacio profundo.

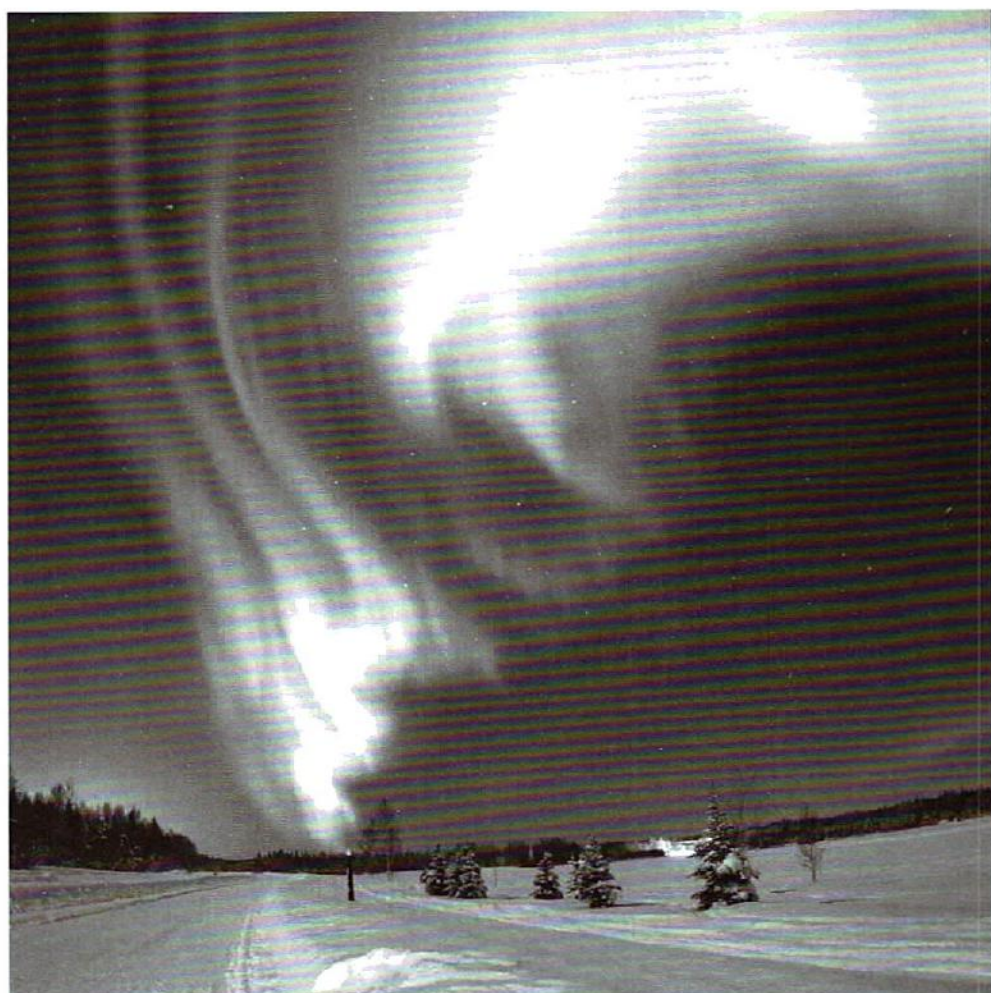
Para dar apoyo a estos programas, en diciembre de 1998 se inició la construcción de la Estación Espacial Internacional, la cual alojará permanentemente una tripulación de técnicos, científicos y visitantes, quienes eventualmente requerirán de atención médica especializada.

Por lo pronto, las agencias aeroespaciales de los países de mayor desarrollo estudian los requerimientos mínimos de tipo médico que deberán cumplir los tripulantes y pasajeros de las aeronaves y astronaves del futuro, así como los recursos técnicos para atender a la salud de los seres humanos que estarán expuestos a los rigores del ámbito espacial.

El sistema cardiovascular es uno de los componentes del cuerpo humano que con mayor intensidad resiente el impacto de las condiciones que privan en el espacio exterior, además es el que ofrece más información sobre las condiciones fisiológicas del astronauta en un momento dado. Es también el sistema más accesible para su estudio; por lo tanto, la cardiología o, más propiamente, la telecardiología espacial, está destinada a convertirse en una de las especialidades de mayor demanda en el campo de la medicina espacial.

En este trabajo se revisan los conocimientos hasta ahora adquiridos sobre el comportamiento del sistema cardiovascular en el espacio exterior, del proceso de adaptación a este nuevo ambiente, de las medidas para contrarrestar la desadaptación al campo gravitacional terrestre, de los efectos nocivos provocados por la acción de la gravedad al regreso de una misión espacial y, muy particularmente, de las contribuciones que la investigación espacial ha dado a la cardiología.

Capítulo 1



El medio ambiente aeronáutico

El escenario de las actividades aeronáuticas se sitúa en la parte baja de la atmósfera, es decir, en la troposfera, cuyo límite superior se encuentra alrededor de los 12 km de altura. Sólo las aeronaves de combate que desarrollan velocidades supersónicas incursionan entre este límite y los 20 km de altura; esto es, en la parte más baja de la estratosfera. En el futuro cercano aparecerán los aviones aeroespaciales que hoy están en proceso de estudio y experimentación, los cuales se desplazarán a altitudes mucho mayores, sin salir de la atmósfera, pero sus vuelos se harán, en parte, en un ámbito con características propias del espacio exterior, por lo tanto, los viajes en este tipo de aeronaves serán propiamente de tipo aeroespacial.

En este capítulo haremos una revisión general de las características de la atmósfera terrestre, destacando aquellos aspectos que tienen mayor interés para la navegación y la medicina aeronáutica. Analizaremos también las condiciones que privan en el interior de las cabinas de las aeronaves, haciendo hincapié en aquellos factores que inciden en los cambios fisiológicos que se presentan en el organismo humano durante el vuelo. Finalmente, mencionaremos otros aspectos relacionados con los viajes en avión, que eventualmente pueden interferir en la salud de los pasajeros.

Atmósfera terrestre

La capa de gases que envuelve a la Tierra, la atmósfera, está formada casi exclusivamente de nitrógeno (78%) y oxígeno (21%), el resto (1%) lo forman gases neutros tales como el argón, neón, criptón, xenón y helio (los cuales no tienen ninguna significación desde el punto de vista de la fisiología humana) y dos gases más que se encuentran en cantidades ínfimas, pero cuya presencia es esencial para la vida: el primero es el bióxido de carbono (CO_2), producto de la respiración celular de los seres que pertenecen al reino animal; en el aire tiene una concentración de 240 partes por millón y es aprovechado por los seres del reino vegetal en el proceso de la fotosíntesis para producir material orgánico y oxígeno (O_2). El segundo gas es el ozono (O_3), producto de la acción fotoquímica de la luz ultravioleta sobre el oxígeno; en la estratosfera el oxígeno es convertido parcialmente en oxígeno triatómico u

ozono; éste se encuentra localizado en una zona que va de los 10 a los 25 km de altura. Su mayor concentración (12 partes por millón) está entre los 20 y 25 km sobre el nivel del mar. Este gas realiza el prodigio de bloquear la mayor parte de la luz ultravioleta procedente del Sol; sin esta protección la vida en la Tierra sería imposible, pues la luz ultravioleta es intensamente nociva para la materia viva.

La masa de aire que cubre a la Tierra, por ser materia, tiene un peso; el aire pesa, como cualquier otro cuerpo físico. Al nivel del mar una columna de aire de 1 cm² de sección pesa 1 kg, y en el sistema inglés 14.7 libras por pulgada cuadrada. Por razones prácticas, la presión atmosférica se mide en milímetros de mercurio (mmHg), pues una columna de aire de un milímetro de sección y de una altura de varias decenas de kilómetros pesa exactamente lo mismo que una columna de mercurio de 760 mm de altura.

El cuerpo de un individuo de talla y complexión medias tiene una superficie de más o menos 1.7 m² (17 000 cm²), esto significa que alrededor de su cuerpo, el aire ejerce una presión de 17 toneladas (17 000 kg). No es aplastado porque los gases en el interior del cuerpo tienen la misma presión que los gases en el exterior.

Es útil precisar el significado de algunos términos que se usan comúnmente: atmósfera, es propiamente la envoltura gaseosa del planeta; hidrosfera, el espacio que contiene agua (mares, lagos, ríos, corrientes, depósitos, nubes, hielo, nieve, etcétera); litosfera, la superficie rocosa que cubre la Tierra; gravitofera, la zona en el espacio en donde la Tierra ejerce atracción gravitacional; magnetosfera, el espacio que ocupa el campo magnético; biosfera, el hábitat del mundo viviente; noosfera (del griego *noos*: mente), el espacio físico que ocupan los seres humanos.

A la atmósfera terrestre se le divide en capas de acuerdo con ciertas características físicas, químicas y eléctricas. Clásicamente, se admite que son cuatro zonas bien definidas, a saber:

- *Troposfera*. Es la capa interna de la atmósfera; va del nivel del mar hasta más o menos los 12 km de altura; es algo más alta en el ecuador que en los polos. En esta capa suceden prácticamente todos los fenómenos meteorológicos: presencia de nubes, neblina, vientos, turbulencias, ciclones, tornados, lluvias, relámpagos, granizadas, etcétera. De particular interés en la troposfera es el hecho de que a medida que se asciende en ella van disminuyendo progresivamente la densidad del aire, la temperatura, la presión barométrica, la presión parcial de oxígeno y la humedad. Por el contrario, la luminosidad solar y la radiación cósmica aumentan con la altitud. En la troposfera tiene lugar también un fenómeno de gran importancia para la biología: una parte de la energía calórica del Sol (rayos infrarrojos) es retenida por el vapor de agua y el bióxido de carbono presentes en el aire; ello permite la regulación de la temperatura en el espacio donde se ha desarrollado la vida.

- *Estratosfera*. Se extiende de los 12 a los 50 km de altura. Digna de mencionarse es la circunstancia de que en la parte baja de la estratosfera (entre los 12 y cerca de los 30 km de altura) la temperatura se conserva constante, a -55°C ; por ser isotérmica, en esa porción de la atmósfera no existen turbulencias, lo que la convierte en zona ideal para la aeronavegación. Otra circunstancia afortunada para los seres vivos es que en esa capa de la atmósfera sucede otro fenómeno de suma importancia para la vida: ahí es donde la luz ultravioleta, procedente del Sol, y mediante el proceso de la fotodisociación, transforma parte del oxígeno del aire en ozono ($3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O}_3$), el cual se dispone principalmente entre los 20 y 25 km de altura, pero se le encuentra también en concentraciones apreciables por abajo y por arriba de esos niveles. Esa reacción fotoquímica consume la mayor parte de la luz ultravioleta de onda más corta, y sólo una dosis compatible con la vida llega a la superficie de la Tierra. La otra parte de la luz ultravioleta, la de onda más larga, destruye una parte del ozono y lo convierte de nuevo en oxígeno ($2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$); en ese proceso se absorbe una fracción importante de la luz ultravioleta dando como resultado la producción de energía calórica, lo que se traduce en aumento de la temperatura en esa zona, llegando hasta 35°C hacia los 50 km de altura. Como ha podido observarse, una parte de la luz ultravioleta transforma el oxígeno en ozono, y otra parte de esa misma luz transforma el ozono en oxígeno, lo que finalmente resulta un proceso autorregulado que no modifica significativamente la concentración del oxígeno en la atmósfera terrestre y, además, absorbe la mayor parte de la luz ultravioleta.
- *Mesosfera*. Es la tercera capa de la atmósfera y se extiende de los 50 a los 80 km de altura. En esta región la temperatura vuelve a descender, llegando a -80°C en los niveles superiores. Casi todos los meteoroides que entran a la Tierra desde diferentes rumbos desaparecen en esta zona por la fricción con el aire; los rayos X y los rayos gamma no atraviesan esta parte de la atmósfera.
- *Ionosfera*. Se inicia a los 80 km sobre el nivel del mar y termina a los 700 km de altura, nivel este último en el que se estima que las moléculas del aire ya no chocan entre sí. El nombre de esta capa se deriva de la presencia de gas ionizado (especialmente átomos de oxígeno y nitrógeno) producto de la acción de la luz ultravioleta, de los rayos X y los rayos gamma procedentes del Sol, los cuales ocasionan desprendimiento de electrones de los átomos de oxígeno y nitrógeno. La temperatura en la ionosfera se eleva nuevamente, llegando a 1000 o 2000 $^{\circ}\text{C}$, pero el aire se encuentra tan rarificado en estas altitudes que el concepto de la temperatura pierde su significado. La parte superior de la ionosfera es también conocida como termosfera.

Entre los 80 y 400 km de altura se disponen cuatro capas de electrones; en la noche tienden a reunirse en una sola. Esa capa impide el paso de las emisiones de onda corta, convirtiéndose en una barrera natural que hace rebotar las ondas de radio entre la superficie de la Tierra y esa capa, y permite su transmisión instantánea a cualquier parte del mundo. Sin embargo, las ondas de radio de unos milímetros y hasta 10 metros sí penetran esa barrera y son las que permiten las comunicaciones entre las naves espaciales y el centro de control, así como la transmisión de datos clínicos como el electrocardiograma, el electroencefalograma y otros registros, procedimiento conocido actualmente como telemetría médica. En la ionosfera se presentan los espectaculares fenómenos llamados auroras polares, inmensos resplandores producto de la interacción del viento solar con las moléculas ionizadas de oxígeno y nitrógeno situadas por encima de las regiones polares.

Equivalentes espaciales

Además de esta breve descripción de la atmósfera terrestre, es digno de mención el concepto que el doctor Hubertus Strughold, conocido como el "padre de la medicina espacial", manejó en su cátedra y en sus trabajos científicos. Nos referimos al concepto de equivalentes espaciales. Esto quiere decir que antes de salir de la atmósfera se dan situaciones que, desde el punto de vista médico y físico, son enteramente semejantes al espacio exterior. Veamos algunos ejemplos.

- *Línea de anoxia.* Se encuentra a los 15 km de altura. A ese nivel, igual que en el espacio profundo, el cuerpo humano no dispone de oxígeno suficiente para la respiración, no precisamente porque a esa altura se haya agotado ese gas, sino porque la presión del aire, que es de 87 mmHg, es igual a la suma de la presión del vapor de agua (47 mmHg) y la del bióxido de carbono (40 mmHg) que se encuentran en las vías respiratorias. El resultado es que el aire ambiente a esa altitud ya no puede penetrar a los pulmones, por consiguiente, tampoco el oxígeno.
- *Línea de ebullición de los líquidos (línea de Armstrong).* En el espacio interplanetario no existe aire ni presión barométrica. La línea de ebullición de los líquidos se encuentra a 20 km de altura, donde la presión atmosférica es aproximadamente de 47 mmHg. Si un líquido se expone a esa altitud "hierve", como el agua cuando se calienta a más de 100 °C, no porque adquiera esta temperatura, sino porque los gases disueltos en ese líquido tienen una presión superior a la que existe en la atmósfera a esa altitud, lo que ocasiona que lo abandonen en forma violenta, provocando en su salida un fenómeno similar al hervor de los líquidos. Un ser humano expuesto súbitamente y sin protec-

ción a 20 km de altura moriría en menos de tres minutos debido a que los líquidos orgánicos (sangre, linfa, líquido intersticial, orina) formarían innumerables burbujas que ocasionarían embolias gaseosas en diferentes partes del cuerpo.

- *Límite superior de navegación aérea (línea de von Karman).* Hacia los 80 km de altura la densidad del aire es ya muy débil y no logra dar sustentación a una nave aérea. Un avión no puede desplazarse sobre el aire a esa altitud porque la concentración de sus moléculas se ha vuelto demasiado tenue. A partir de los 80 km de altura, la navegación aérea deja de serlo para convertirse en navegación espacial.
- *Línea de silencio y oscuridad del espacio.* Alrededor de los 100 km de altura el aire está tan rarificado, y sus moléculas tan separadas unas de otras, que el sonido no puede ya transmitirse directamente: empieza el "silencio absoluto del espacio". A ese nivel el aire tampoco dispersa la luz procedente del Sol y de otros astros: se inicia la "oscuridad absoluta del espacio". Esto último no significa que en la profundidad del cosmos no se vean el Sol y las estrellas, o la luz que reflejan los cuerpos opacos tales como los planetas, satélites, meteoroides, cometas y asteroides; al contrario, estos cuerpos se ven más nítidos, más brillantes, más grandes que cuando se observan desde la Tierra, pero el cielo o el firmamento ya no es azul, sino absolutamente negro.
- *Límite de protección contra la luz ultravioleta.* Hemos dicho que este tipo de radiación electromagnética es absorbido en su mayor parte en la estratosfera; una proporción menor llega a la superficie terrestre y es la que produce las quemaduras de piel cuando hay una prolongada exposición al Sol. También condiciona el color oscuro de la piel de los residentes de zonas ecuatoriales y tropicales porque es un poderoso estímulo para la producción del pigmento melanina en la piel. Arriba de los 45 km de altura la luz ultravioleta ya no es absorbida por el aire que envuelve al planeta, por lo que este límite debe considerarse un equivalente más del espacio exterior. La cubierta de las naves, el traje y el casco espacial ofrecen suficiente protección contra esta parte de la radiación electromagnética.
- *Límite de protección contra los rayos cósmicos.* Los rayos cósmicos galácticos y los rayos cósmicos solares son partículas subatómicas que llegan de otras estrellas y del Sol, y al chocar con las moléculas de aire pierden parte de su poder original; el resultado de esta colisión es la formación de otras partículas subatómicas (protones, electrones, neutrones, mesones y rayos gamma) de menor energía llamados "rayos secundarios", los cuales penetran a las capas más bajas de la atmósfera. Entre el nivel del mar y los 20 km de altura se está expuesto a este tipo de rayos de menor poder; arriba de los 40 km no

existe protección contra los rayos cósmicos. Esta altura es otro equivalente espacial.

- *Límite de protección (parcial) contra los meteoroides.* Algunos granos de polvo o pequeños trozos de roca y metal que viajan en el espacio interplanetario alcanzan a la Tierra animados de grandes velocidades que fluctúan entre los 15 y 20 km por segundo. Se calcula que la Tierra recibe diariamente 10 000 toneladas de este tipo de material. La mayoría de los meteoroides se consumen antes de tocar la superficie de la Tierra debido al calentamiento que sufren por la fricción con el aire. Entre los 40 y 140 km de altura se consume la inmensa mayoría de estos pequeños cuerpos; arriba de los 140 km las naves espaciales quedan totalmente desprotegidas del eventual impacto de los meteoroides, por lo que este límite puede considerarse también un equivalente espacial.
- *Línea aerotermodinámica.* Los aviones supersónicos (cuya velocidad es de una a cinco veces la del sonido) e hipersónicos (de cinco a veinte veces la velocidad del sonido), así como los vehículos espaciales que salen de la atmósfera o regresan a ella animadas por velocidades cósmicas (28 000 y 40 000 km/h), sufren un calentamiento importante en su cubierta por la fricción con el aire. La temperatura puede elevarse hasta 3000 °C en las naves espaciales, como fue el caso de las cápsulas Apolo que regresaban de la Luna, en caída libre, a 40 000 km/h. Pero arriba de los 150 km de altura las moléculas de aire están tan separadas unas de otras que la fricción no ocurre, y ya no hay calentamiento de la cubierta de los vehículos por este mecanismo.

Cabina de aeronaves

Son varios los factores presentes en el ámbito de las actividades aeronáuticas que pueden afectar el confort, la eficiencia y la salud de los trabajadores. Dentro de ellos podemos mencionar el ruido, vibraciones, humedad, temperatura, cambios de presión barométrica, iluminación, aceleraciones y radiación cósmica. Analizaremos brevemente cada uno de ellos.

- *Cambios de presión barométrica (pB).* La masa de aire que cubre a la Tierra (la atmósfera) tiene un peso, ejerce una presión sobre la superficie de todos los objetos, incluyendo el cuerpo humano. Pero esa presión disminuye con la altura: es de 760 mmHg al nivel del mar; de 380 mmHg a los 5500 m de altura; de 232 mmHg a los 8500 m; de 199 mmHg a los 10 050m; de 155 mmHg a los 11 600 m, etcétera. Para que la respiración se realice sin problemas en las personas normales es preciso que la pB se mantenga en ciertos límites

dentro de la cabina, lo que significa que la atmósfera en el interior de las cabinas debe mantener un equivalente de pB similar a la que existe entre los 1500 y 2500 m de altura.

Por razones técnicas y de seguridad la pB dentro de los aviones de pasajeros no es la misma que la de los aeropuertos de salida o de destino, sino que se mantiene durante el vuelo de crucero en el rango que se ha mencionado para asegurar el buen funcionamiento del organismo humano.

Cuando una nave se eleva desde un aeropuerto de zona baja descomprime progresivamente su atmósfera interior, se estabiliza en el vuelo de crucero y vuelve a comprimirse en el descenso. Si el avión parte de un aeropuerto de gran altitud (Quito, Ecuador; La Paz, Bolivia) la cabina se comprime a la altitud normal del vuelo de crucero, y se comprime aún más si aterriza en un aeropuerto de zona baja, pero si aterriza en un aeropuerto de gran altitud la atmósfera interior de la cabina vuelve a disminuir.

Lo anterior significa que los tripulantes aéreos están sometidos continuamente a cambios de pB y a la entrada y salida de aire del oído medio y senos paranasales (senos maxilares y frontales). Precisamente en estas estructuras se localiza uno de los problemas médicos más comunes en la aviación: la barotitis (aerotitis) y la barosinusitis (aerosinusitis), producidas por los cambios de pB y la dificultad de ventilar y equilibrar adecuadamente la presión en esas cavidades, debido a procesos inflamatorios de las vías respiratorias altas, tan comunes en los trabajadores del aire.

Es tan evidente y directa la causa y el efecto que la barotitis y la barosinusitis son consideradas enfermedades profesionales en los miembros de las tripulaciones aéreas. En el capítulo IV se describe lo que se denomina enfermedad descompresiva.

- **Ruido.** La industria aeronáutica es esencialmente ruidosa, en particular en las áreas de operación y mantenimiento de las aeronaves. Los niveles más elevados de ruido se registran en las bases de mantenimiento durante la prueba de motores y en las cercanías de las pistas en los momentos del despegue y el aterrizaje. Pero también los motores de los aviones emiten ruido intenso en plataforma, durante el taxeo para tomar pista y después del aterrizaje para acercarse a la zona de desembarco. A esto hay que agregar el ruido de naves vecinas en diferentes sitios del aeropuerto.

El ruido dentro del avión en el desarrollo del vuelo es menos intenso, pero sigue siendo alto en algunas aeronaves, especialmente en la parte posterior de la cabina.

Durante la prueba de motores y las maniobras de despegue y aterrizaje el ruido generado puede alcanzar los 130 o 140 decibeles (dB), nivel imposible de tolerar más allá de unos segundos. La conversación normal se sitúa

entre los 40 y 60 dB en ausencia de ruido ambiente; en presencia de ruido de 70 a 80 dB se requiere alzar la voz para comunicarse directamente con otras personas; en ambiente ruidoso de 80 a 90 dB es preciso gritar para lograr una comunicación parcialmente satisfactoria.

En general, el nivel de ruido de los aviones modernos en el vuelo de crucero va de 70 a 80 dB, pero en mediciones esporádicas hechas por nosotros la intensidad de ruido alcanzó en algunos momentos más de 80 dB en la parte trasera de la cabina, justo donde habitualmente se sitúa el personal de sobrecargos durante las maniobras de despegue y aterrizaje y en los periodos de reposo en vuelos de larga duración.

La magnitud de los efectos del ruido sobre el organismo humano depende de varias condiciones: intensidad del ruido, tiempo de exposición, susceptibilidad individual, medidas de protección y frecuencia de las ondas sonoras.

Se acepta que a partir de 80 dB el ruido causa daño a la salud, pero algunos pasajeros expresan molestias a partir de los 70 dB. El tiempo de exposición de los tripulantes aéreos al ruido se prolonga durante toda su vida laboral y la hipoacusia sensorial es una de las causas más frecuentes de cancelación de su licencia, especialmente en pilotos aviadores. La susceptibilidad individual al ruido varía mucho de un individuo a otro; algunos experimentan síntomas y signos adversos desde los 70 dB y el tiempo de recuperación a una exposición aguda puede ser muy prolongado; por el contrario, otros suelen tolerar altos niveles de ruido y exposiciones prolongadas sin daños apreciables. En cualquier caso, la protección auditiva con conchas y tapones acústicos es sencilla y eficaz, aunque no siempre confortable.

La exposición temporal a un ambiente de ruido moderado (70 a 90 dB) o intenso (>90 dB) causa numerosas manifestaciones: cefalea, fastidio, irritabilidad, fatiga, sordera, dificultad en la comunicación, trastornos del equilibrio, vértigo, deterioro de la memoria, desorientación, náusea, vasoconstricción periférica, hipertensión arterial y cambios en el electroencefalograma. La exposición crónica conduce a la hipoacusia neurosensorial y a las consecuentes dificultades en la comunicación humana y problemas en el área emocional.

- *Vibraciones.* El desplazamiento de los vehículos aéreos (aviones, helicópteros, planeadores, globos), cualesquiera que sea su velocidad, produce vibraciones, es decir, oscilaciones de parte de su estructura o de toda la unidad. Las vibraciones de varios ciclos por segundo (Hz) se transmiten al cuerpo humano a través del piso, las paredes y los asientos. Las de baja frecuencia (<1Hz) son en realidad movimientos bruscos y de gran amplitud de la nave, verdaderas sacudidas, como ocurre cuando se atraviesa una zona de turbulencia.

Las vibraciones dentro de las naves aéreas pueden transmitirse a todo el cuerpo o sólo a ciertas porciones. Son muy intensas en los aviones de combate y durante las grandes aceleraciones, a tal punto que llegan a ocasionar fracturas de columna, hemorragias pulmonares y lesiones renales, dolor en el pecho y el dorso. Las naves civiles habitualmente no llegan a estar sometidas a esos grados de estrés vibratorio, pero ocasionalmente, en condiciones adversas de navegación, y en el rango de vibración de 2 a 12 Hz, las vísceras torácicas, abdominales y pélvicas pueden entrar en resonancia y producir, entre otras cosas, dolor epigástrico, periumbilical y testicular, y a veces dolor esternal (por estiramiento de ligamentos de las articulaciones condrocostales). Hay interferencia con la respiración por entrada y salida violenta de un importante volumen de aire a los pulmones, lo que conduce a un aumento del volumen minuto, de la ventilación alveolar, del consumo de oxígeno y de la eliminación de bióxido de carbono, y esto a su vez lleva a un estado de hiperventilación e hipocapnia. También se observa aumento de la presión arterial media, de la frecuencia cardíaca y del gasto cardíaco (similar a los efectos del ejercicio).

El movimiento involuntario de la cabeza, el tronco y las extremidades por la vibración afecta la función motora fina, la modulación de la voz, la visión, el equilibrio, la memoria y la capacidad aritmética; las vibraciones de baja frecuencia (<1Hz) propician el mareo y periodos momentáneos de incapacidad de los tripulantes.

- *Aceleración.* Este es un factor siempre presente en la actividad aeronáutica. Se define como un cambio de velocidad, de dirección o de ambas a la vez. El ejemplo más común es el avión que acelera en el despegue, desacelera en el aterrizaje, o cambia de dirección y de altitud. En la aviación civil las aceleraciones son de magnitud menor y no tienen significado para la fisiología humana; en cambio, en la aviación militar las acciones de combate requieren que las aeronaves realicen violentos cambios de velocidad y de dirección, y ello trae como consecuencia severos efectos fisiológicos en los pilotos aviadores. (Ver capítulo V.)
- *La temperatura.* Si bien los vuelos de crucero de los aviones subsónicos se realizan a una altitud promedio de 10 000 m sobre el nivel del mar (SNM) y los supersónicos entre los 16 000 y 20 000 m SNM, donde la temperatura ambiente es de 45 a 55 °C bajo cero, no existen habitualmente problemas de temperatura en el interior de las aeronaves; sólo ocasionalmente, y por breves lapsos, se registran cambios extremos de temperatura por fallas en el sistema de control de la misma.

Las variaciones importantes de temperatura ambiente que pueden afectar la salud de tripulantes y pasajeros se dan cuando las naves, en unas cuantas

horas, se trasladan de un lugar caluroso a uno muy frío, o viceversa, y los sistemas de aire acondicionado y de calefacción se alternan frecuentemente.

En los lugares de pernocta, los miembros de las tripulaciones de vuelo pueden, por algún tiempo, estar expuestos a temperaturas muy elevadas o muy bajas. En el primer caso, si no se conocen y si no se observan los cuidados pertinentes, pueden ocurrir casos de deshidratación, de insolación y hasta de choque calórico. Son particularmente sensibles al calor las personas adaptadas a climas fríos, con intolerancia al calor, previamente deshidratadas, con problemas del mecanismo de la sudoración, fatigadas, con deuda de sueño y con desacondicionamiento físico.

La exposición súbita al frío intenso, como ocurre en los aeropuertos o ciudades de las regiones polares, o peor aun, cuando sobreviene una descompresión rápida o explosiva de la cabina en vuelo de crucero, y debido a las bajísimas temperaturas que privan en esas altitudes (45 a 55 °C bajo cero), el punto de congelación se alcanza de inmediato y puede traer consecuencias para la salud de tripulantes y pasajeros, independientemente de los efectos de la hipoxia aguda y la enfermedad descompresiva. Son más susceptibles de sufrir los efectos de las bajas temperaturas (18 °C bajo cero, o menos) los pasajeros de la tercera edad, los enfermos hipotiroideos y desnutridos, pero las personas saludables y, por supuesto, la tripulación, están también expuestos a los daños que produce el frío intenso.

- *La humedad.* La proporción de vapor de agua suspendido en el aire varía de una región a otra del mundo. Es abundante en las zonas tropicales, lluviosas, calurosas y próximas al mar; es baja en zonas desérticas y en otras partes del mundo durante los periodos de sequía.

El aire que los compresores introducen a la cabina de los aviones para mantener la presión interior y la ventilación es muy seco, habitualmente no va más allá del 10 al 20%. Por razones técnicas, no puede mantenerse una humedad adecuada del aire que se respira en el interior de la cabina; esto trae como consecuencia que durante los vuelos de larga duración los tripulantes y pasajeros sufran resequedad de la piel y las mucosas de las vías respiratorias y, en algunos casos, verdadero estado de deshidratación si no se ingiere una suficiente cantidad de líquido durante el viaje.

Las frecuentes afecciones de las vías respiratorias en los trabajadores del aire se deben a cambios bruscos de temperatura, cambios frecuentes de pB, exposición a zonas con epidemias virales y a la escasa humedad del aire en el interior de las cabinas.

- *Iluminación.* Dentro de la cabina de pilotos y de pasajeros la iluminación es habitualmente satisfactoria, pero la iluminación exterior en el vuelo de crucero es excesiva, en particular para los pilotos, porque la superficie de la

corteza terrestre, el agua de los mares y las nubes reflejan una gran cantidad de la luz solar.

Hay lugares de pernocta con intensa radiación solar como son las regiones tropicales y desérticas, las zonas nevadas y las de gran altitud.

- *Radiación cósmica.* La Tierra está siendo bombardeada continuamente por partículas subatómicas cargadas de alta energía y animadas de gran velocidad (cercana a la velocidad de la luz) procedentes de diferentes regiones de nuestra galaxia; dichas partículas están formadas en el 85% por protones (núcleos de hidrógeno), el 14% por rayos alfa (núcleos de helio), el 1% por núcleos de elementos más pesados (carbono, oxígeno, magnesio, silicio, hierro y otros) y electrones; son llamados rayos cósmicos primarios o radiación cósmica galáctica. Del Sol nos llega el mismo tipo de radiación, pero estas partículas están animadas de menor velocidad y energía (400 a 500 km/s); es llamada radiación cósmica solar o rayos cósmicos solares.

El campo magnético terrestre desvía parte de esta radiación, la cual se pierde en las profundidades del espacio; otra parte es atrapada por el campo magnético, disponiéndose en dos cinturones por encima del ecuador (cinturones de Van Allen): uno interior, constituido principalmente de protones (con una mayor concentración hacia los 3000 km de altura), otro exterior, de electrones (cuya mayor intensidad se sitúa alrededor de los 18 000 km de altura); finalmente, una menor cantidad de esas partículas galácticas y solares penetran a la atmósfera, las cuales, al chocar con átomos de oxígeno y nitrógeno, generan radiación secundaria consistente en protones, neutrones, mesones y rayos gamma; este es precisamente el tipo de radiación que encuentran las naves subsónicas que vuelan entre los 8 y 13 km de altura y las supersónicas que se desplazan entre los 16 y 20 km de altura. La máxima dosis de radiación secundaria se localiza cercana a los 20 km SNM, pero todavía a esa altitud el 50% de los protones galácticos, el 25% de rayos alfa y el 30% de núcleos de elementos más pesados no han colisionado con las moléculas del aire de la atmósfera.

Las líneas del campo magnético descienden sobre los polos, de tal suerte que la cantidad de rayos cósmicos es intensa a altitudes menores sobre las regiones polares. Los tripulantes y pasajeros en rutas transpolares reciben una dosis de radiación cósmica mayor que la que se registra en otras rutas.

- *Presencia de ozono.* En los vuelos subsónicos por encima de los 12 000 m y los supersónicos entre los 18 000 y 20 000 m de altura existe el riesgo de acumulación de ozono a nivel tóxico en el interior de la cabina. El ozono es un gas que se encuentra normalmente en la estratosfera (entre los 12 y 35 km de altura), se forma por la acción fotoquímica de la luz ultravioleta sobre el oxígeno, convirtiéndolo en oxígeno triatómico u ozono (O_3); su mayor con-

centración (10 partes por millón) se localiza cerca de los 25 a 30 km de altura.

El ozono es un gas irritante para las conjuntivas y las vías respiratorias; su acción propicia las infecciones respiratorias y se le atribuyen efectos mutagénicos y cancerígenos. Los compresores que mantienen la presión de la atmósfera de la cabina destruyen por calentamiento la mayor parte del ozono contenido en el aire ambiente; sin embargo, en vuelos subsónicos intercontinentales por encima de los 12 000 m se han reportado molestias respiratorias en los pasajeros, atribuidas al ozono.

La atmósfera de la cabina de un avión de pasajeros se renueva totalmente cada tres minutos aproximadamente, así que en general puede decirse que, si bien existe un ambiente hipóxico y seco dentro de la nave, el aire que se respira es limpio en el vuelo de crucero, excepto en cierto momento de los vuelos supersónicos, especialmente durante la fase de aproximación y descenso, en que la atmósfera de la cabina se contamina con alguna cantidad de ozono.

Referencias

- Astronómica. *Atmósfera, tiempo atmosférico, clima*, México-Madrid. Editoriales Diana y Libsa, 2006, pp. 88-91.
- Bert P., *Barometric pressure: researches in experimental physiology*, Bethesda, MD: Undersea Medical Society; 1978.
- Hardy DA, Moore P. 50 years in space. London: AAPPL; 2004.
- Horrigan, D.J., *Atmosphere*. In: *The Physiologic Basis for Spacecraft Environmental Limitis* (NASA RP 1045). Houston Tx, Lyndon B. Johnson Space Center, 1979.
- ICAO (1964) *Manual of the ICAO Standard Atmosphere*, 2nd ed, International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada.
- Iglesias R., *La ruta hacia el hombre cósmico*, 2^a ed., México: Limusa, 2009.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (1976) *US Standard Atmosphere*, 1976, NOAA, Washington, DC.
- Ward M. P., Milledge J. S., West J. B. (eds). *High Altitude Medicine and Physiology*, 3rd edition, London: Hodder Arnold, 2000.

Capítulo 2



Cambios de presión parcial de oxígeno: hipoxia

En la actividad aeroespacial interviene con relativa frecuencia un factor de primordial importancia: la disminución de la presión parcial de oxígeno en el aire que se respira. Si esta disminución es lo suficientemente importante para producir cambios en el organismo humano, podemos considerar que estamos frente a un estado de hipoxia. Hipoxia es un término muy usado en medicina y se define como un déficit de oxígeno en los tejidos. Hipoxemia es un término que se toma generalmente como sinónimo de hipoxia y significa literalmente una baja tensión de oxígeno en la sangre. Anoxia es la ausencia de oxígeno en los tejidos.

Desde el punto de vista de la medicina aeroespacial se destacan cinco tipos de hipoxia, a saber:

- *Hipoxia hipobárica.* Es causada por la disminución de la presión parcial de oxígeno en el ambiente. Esto ocurre, por ejemplo, al escalar grandes alturas en prácticas de alpinismo, al volar por encima de ciertos límites en aviones con cabina no presurizada, el residir en zonas de gran altitud, durante la descompresión de cabinas de naves aéreas y espaciales, cuando se realizan prácticas en cámara de altitud, etcétera.
- *Hipoxia anémica.* Se debe a la disminución de la hemoglobina o de glóbulos rojos; en estos casos la hemoglobina es insuficiente para transportar la cantidad necesario de oxígeno a los tejidos. El ascenso en la atmósfera acentúa notablemente la hipoxia del anémico.
- *Hipoxia isquémica.* Se debe a la disminución de la perfusión sanguínea por obstrucción parcial de las arterias; esto impide el aporte adecuado de oxígeno a los territorios correspondientes.
- *Hipoxia por estancamiento.* Es producida cuando la sangre circula lentamente, como ocurre durante la aceleración +Gz, en la cual el vector de la aceleración actúa en el eje longitudinal del cuerpo, de la cabeza a los pies, produciendo estancamiento de la sangre en las regiones inferiores del cuerpo; este tipo de hipoxia se observa también en la insuficiencia cardíaca congestiva venosa y en la insuficiencia venosa de miembros inferiores.

- *Hipoxia histotóxica.* Es aquella en la que las células del organismo están dañadas o imposibilitadas para captar el oxígeno, como acontece en el envenenamiento por cianuro, arsénico y monóxido de carbono; este último gas desplaza con suma facilidad el oxígeno de la hemoglobina y constituye, por lo tanto, envenenamiento del tejido hemático.

En este capítulo sólo se analizarán las situaciones relacionadas con la hipoxia hipobárica, condicionadas por la altitud, es decir, por la disminución de la presión parcial de oxígeno en el aire ambiente.

Por razones prácticas, en el aire ambiente sólo se consideran dos gases: el nitrógeno (N_2) y el oxígeno (O_2). Los gases raros, por ser inertes y constituir una proporción mínima en el aire, se incluyen en el volumen del nitrógeno. El bióxido de carbono (CO_2) en el aire tiene una concentración insignificante y tampoco tiene importancia fisiológica; por lo tanto, los dos principales componentes del aire seco, al nivel del mar, tienen las siguientes presiones parciales: 601 mmHg para el N_2 , 159 mmHg para el O_2 .

Ahora bien, estas presiones no guardan la misma proporción dentro del árbol respiratorio, porque en los alvéolos se agrega el vapor de agua y el CO_2 ; el vapor de agua a la temperatura del cuerpo humano (37 °C) siempre tiene una presión de 47 mmHg; en los alvéolos se conserva constante cualquiera que sea la altitud; el CO_2 , producto de la respiración interna, en su paso hacia el exterior se mezcla con el aire alveolar y su presión ahí es de 40 mmHg; esta presión disminuye ligeramente con la altitud.

La tabla 1 nos da una idea de las variaciones de la PO_2 en el aire exterior, en los alvéolos y en la sangre arterial, así como la PCO_2 alveolar a diferentes alturas.

Tabla 1. Presión parcial de gases y saturación de oxígeno arterial a diferentes niveles de altitud

Altitud (pies/ metros)	Presión barométrica (mmHg)	PO_2 en el aire (mmHg)	PO_2 en los alvéolos (mmHg)	Saturación de O_2 arterial %	PCO_2 en los alvéolos (mmHg)
Nivel del mar	760	159	104	97	40
10 000/3048	523	110	67	90	36
20 000/6096	349	73	40	70	24
30 000/9144	226	47	21	20	24
40 000/12192	141	29	8	5	24
50 000/15 240	87	18	1	1	24

Las cifras aquí expresadas corresponden a una situación en la que el aire ambiente está completamente seco. Hay que recordar que la presión barométrica al nivel del mar no es constantemente de 760 mmHg, sino que puede tener fluctuaciones que van de los 803 a los 664 mmHg, por lo tanto, la PO_2 del aire puede variar; por otra parte, cuando el aire al nivel del mar está saturado de vapor de agua, la PO_2 puede descender hasta en 10 mmHg en el aire ambiente.

La ley de difusión de los gases establece que "las moléculas de un gas tienden a movilizarse de las áreas de mayor presión a las de menor presión, sea que este gas se encuentre formando parte de una mezcla de gases, o disuelto en líquidos u otras sustancias". En el cuerpo humano, los gases de importancia fisiológica (O_2 , CO_2 , CO , N_2) son solubles en el plasma y en otros líquidos orgánicos.

Cada gas tiene su propio coeficiente de difusión, es decir, su velocidad de difusión para una determinada área, distancia o diferencia de presión. Por ejemplo: si de los gases de importancia respiratoria tomamos el coeficiente de difusión del O_2 , como unidad tendremos la siguiente relación: oxígeno 1.0; bióxido de carbono 20.3; monóxido de carbono 0.81; nitrógeno 0.53; helio 0.95. Como se ve, el CO_2 tiene una capacidad de difusión 20 veces superior a la del O_2 y aún mayor que la de los demás gases.

A manera de recordatorio, a continuación se menciona la sucesión de hechos que marcan el destino del O_2 del aire ambiente desde que es introducido a las vías respiratorias hasta regresar al exterior después de haber circulado por el cuerpo.

- a) Se calienta a su paso por las vías respiratorias igualando su temperatura con la del cuerpo a 37 °C.
- b) Se humidifica dentro de las vías respiratorias; la presión parcial del vapor de agua en las vías respiratorias es de 47 mmHg, esta presión se conservará sin variación, cualquiera que sea la altitud a que se exponga el sujeto.
- c) La PO_2 en el alvéolo es de 104 (al nivel del mar) en vez de 159 mmHg que tenía en el aire ambiente, esto es debido a que el aire se mezcla con el vapor de agua y el CO_2 que existe en las vías respiratorias.
- d) El O_2 difunde del alvéolo hacia los capilares pulmonares por diferencia de presión, pues es mayor la presión parcial de O_2 en el alvéolo que en los capilares. En condiciones normales y al nivel del mar la presión parcial de O_2 en la sangre venosa que llega al pulmón es de 40 mmHg, en tanto que la PO_2 en el alvéolo es de 104 mmHg. Cada minuto pasan aproximadamente 230 ml de O_2 de los alvéolos a la sangre; durante el ejercicio esta cantidad puede triplicarse.
- e) El O_2 es captado por la hemoglobina de los glóbulos rojos que pasan por los capilares pulmonares; una mínima cantidad de O_2 pasa al suero sanguíneo donde se mantiene en solución. Cada gramo de hemoglobina capta 1.34 ml

de O_2 ; en la sangre recién oxigenada existen 20.1 ml de O_2 por 100 ml de sangre, cifra sesenta y seis veces superior a la cantidad de O_2 que va en solución en el suero.

- f) La sangre al abandonar los capilares pulmonares tiene una saturación de 100% y una presión parcial de O_2 igual a la del aire alveolar, pero un poco más adelante, en las venas pulmonares, baja al 97% y la PO_2 a 95 mmHg; esto es debido a que la circulación nutricia del pulmón (las venas bronquiales y pleurales) drena a las venas pulmonares; la cantidad de O_2 en la sangre arterial se vuelve de 19.5 ml por 100 ml de sangre.
- g) La presión de O_2 en el líquido intersticial es en promedio de 40 mmHg; por una situación inversa a la que existe en el pulmón, el O_2 de los capilares arteriales periféricos se difunde hacia el líquido intersticial.
- h) En el interior de las células el O_2 se consume continuamente; esto crea una cierta diferencia de presión respecto al O_2 del líquido intersticial, diferencia suficiente para que el O_2 pase al interior de las células.
- i) La cantidad de O_2 utilizada para el metabolismo tisular provoca la diferencia fundamental que se observa entre la sangre arterial y venosa. En condiciones normales los tejidos extraen 5 ml de O_2 por cada 100 ml de sangre arterial; por lo tanto, la sangre venosa sólo tendrá 14.5 ml de O_2 por 100 ml. La sangre venosa llega al pulmón con sólo 40 mmHg de PO_2 ; ahí vuelve a ser oxigenada, y el ciclo se repite.

Control de la respiración

Los movimientos respiratorios pueden regularse voluntariamente poniendo en actividad los músculos intercostales, el diafragma y los músculos abdominales; puede acelerarse la frecuencia respiratoria y llegar a producir voluntariamente un estado de hiperventilación y de hipocapnia; en cambio, es difícil mantener voluntariamente el estado de hipoventilación. Pero en este apartado lo que deseamos mencionar brevemente es el control de la respiración normal involuntario.

Los centros nerviosos del control de la respiración están constituidos por tres agrupamientos de neuronas situados en el tallo cerebral y dispuestos de la siguiente manera:

- *Grupo respiratorio dorsal.* Este agrupamiento de neuronas se encuentra situado en la parte dorsal del bulbo raquídeo; genera impulsos rítmicos que van a los músculos respiratorios para producir la fase inspiratoria; recibe estímulos de los quimiorreceptores periféricos a través de los nervios vago y glossofaríngeo.

- *Grupo respiratorio ventral.* Situado en la parte ventral del bulbo, interviene en la fase espiratoria de la respiración normal tranquila, pero es importante en la activación de los músculos espiratorios abdominales durante el ejercicio y otras situaciones que requieren niveles elevados de ventilación pulmonar.
- *Centro neumotáxico.* Situado en la parte dorsal de la protuberancia, es el responsable de regular la frecuencia respiratoria y el patrón de la respiración, regula los impulsos inspiratorios y espiratorios de los grupos dorsal y ventral.

Control químico de la respiración

Las variaciones en la sangre del contenido del O_2 y CO_2 son captados por sensores denominados quimiorreceptores, unos situados en el centro respiratorio, los cuales responden a los cambios de CO_2 en la sangre (o más propiamente a la concentración de hidrogeniones en el líquido cefalorraquídeo); producen señales a los músculos respiratorios para aumentar la ventilación pulmonar; no son sensibles a las variaciones de PO_2 en la sangre.

Los otros quimiorreceptores son periféricos, se encuentran en los cuerpos carotídeos y aórticos; responden preponderantemente a la baja de la presión de oxígeno en la sangre y envían estímulos al centro respiratorio para el control de la respiración. Este mecanismo se pone en juego cuando la PO_2 arterial baja a 60 o 70 mmHg. El aumento de la PCO_2 y de hidrogeniones en la sangre también estimulan los quimiorreceptores periféricos, pero en grado menor.¹

Etiología

En el estudio de la cardiología aeroespacial tiene particular importancia la hipoxia hipobárica porque en el medio ambiente laboral de las tripulaciones aéreas y espaciales están expuestos frecuentemente a variaciones de la presión interior de las cabinas y, consecuentemente, de la presión parcial de oxígeno del aire que se respira.

Se pueden sufrir los efectos de la hipoxia hipobárica en diferentes circunstancias, a saber: a) durante las prácticas de alpinismo; b) al desplazarse a lugares de gran altitud, como La Paz, Bolivia; c) al cruzar cordilleras elevadas como la de los Andes, en rutas terrestres que conducen de un país a otro; d) durante un viaje en avión no presurizado; e) al exponerse experimentalmente a cambios de presión barométrica

¹ El CO_2 difunde con facilidad a través de la barrera hematoencefálica (los hidrogeniones atraviesan también esta barrera pero con dificultad); en el líquido cefalorraquídeo el CO_2 se combina con el agua formando ácido carbónico, el cual se disocia en hidrogeniones y en iones bicarbonato.

en cámaras de altitud; f) cuando sobreviene la pérdida de presión de una nave aérea o espacial, etcétera.

A medida que se asciende en la atmósfera va disminuyendo progresivamente la PO_2 en el aire; el cerebro y la retina son los órganos más sensibles a la hipoxia; también lo son el aparato cardiovascular y respiratorio.

A partir de cierta altitud se ponen en juego reflejos compensadores de la hipoxia, ese nivel se sitúa entre los 1500 y 3000 m sobre el nivel del mar, pero no es raro que se requieran altitudes mayores para que se inicien esos cambios.

Cuadro clínico

EFECTOS SOBRE LA VISIÓN

El órgano que primero resiente la hipoxia es la retina; particularmente se deteriora la visión nocturna, de ahí la recomendación de que los pilotos aviadores que conducen en vuelos nocturnos naves sin cabina presurizada deben usar oxígeno suplementario a partir de los 3000 m de altura.

EFECTOS SOBRE EL SISTEMA NERVIOSO CENTRA

El cerebro es uno de los órganos que más tempranamente se altera con la hipoxia. A nivel del sistema nervioso central el efecto de la hipoxia presenta similitud con la ingestión de alcohol: el sujeto experimenta sensación de bienestar, de euforia, de seguridad y confianza en sí mismo; se deteriora el juicio crítico, la capacidad de decisión y el razonamiento; se pierde la iniciativa, prevalecen ideas fijas y la memoria sufre déficit importante. Otro tipo de manifestaciones ocasionadas por la hipoxia son, por ejemplo, cefalea, somnolencia, vértigo, lipotimia, dificultad para la concentración, lasitud, indiferencia, deterioro sensorial y fatiga.

Es interesante recordar aquí los niveles de eficiencia mental señalados hace varios años por el doctor Hubertus Strughold en situaciones de hipoxia hipobárica.

- *Fase indiferente.* Se observa antes de los 3000 m de altura. En ella no hay compromiso funcional; las reservas fisiológicas permanecen intactas.
- *Fase de compensación.* De 3000 a 4500 m; en ella se ponen en juego diferentes mecanismos de compensación de la hipoxia, especialmente respiratorias y cardiovasculares; sólo si se agregan estímulos adicionales, como ejercicio físico importante, estos mecanismos se vuelven insuficientes.
- *Fase de compensación incompleta.* De 4500 a 6700 m; los mecanismos compensadores van perdiendo su efectividad progresivamente, la capacidad física y mental se deterioran de manera importante y se acerca el colapso.

- *Fase crítica.* De 6700 a 7600 m; la capacidad física y mental se pierde; no existe ya la posibilidad de compensar la hipoxia, se pierde la conciencia; se presentan convulsiones; aparece insuficiencia cardiorrespiratoria y la muerte es inevitable si no se auxilia al sujeto.

Conviene aclarar que esta situación clínica se observa cuando los individuos son expuestos a la altitud o a la hipoxia en forma rápida, es decir, en el transcurso de horas; pero si la exposición a la altura se va haciendo progresivamente y en el transcurso de unos días, se da tiempo al organismo para compensar la hipoxia; esto es lo que sucede en los alpinistas profesionales capaces de alcanzar la cumbre del monte Everest, que se encuentra a 8852 m sobre el nivel del mar.

En el caso de una descompresión rápida de la cabina, y de acuerdo con la altitud del vuelo, la tripulación dispone de un tiempo muy breve para colocarse la mascarilla de O_2 y salvarse del efecto de la hipoxia. A ese lapso se le llama "tiempo de conciencia útil"; esto quiere decir que si la tripulación no empieza a respirar O_2 con oportunidad la hipoxia afectará sus funciones cerebrales. El tiempo de que se dispone es diferente según la altura a la que se encuentra la nave en el momento de la descompresión (tabla 2).

Si la descompresión de la cabina es explosiva, entonces las estimaciones de tiempo de conciencia útil que se han mencionan se reducen a la mitad. Si no se actúa con la prontitud requerida y dentro de estos márgenes, el tripulante quedará incapacitado física y mentalmente para conducir la nave.

Tabla 2. Tiempo de conciencia útil a diferentes niveles de altitud

Altitud Metros/pies	Tiempo de conciencia útil	
	Segundos	Minutos
15 240 / 50 000	9-15	
12 192 / 40 000	15-20	
10 668 / 35 000	30-60	
9144 / 30 000		1-2
8534 / 28 000		2.5-3
7622 / 25 000		3-5
6707 / 22 000		10-15
5488 / 18 000		20-30

EFFECTOS EN EL APARATO RESPIRATORIO

Los cambios respiratorios se empiezan a manifestar desde los 1500 a 3000 m sobre el nivel del mar. Los más evidentes son los siguientes: aumento de la frecuencia respiratoria, los movimientos respiratorios son más amplios, aumenta el volumen circulante, se eleva la presión arterial pulmonar, se acentúa el tono bronquiolar y, a veces, se desencadenan crisis de edema agudo pulmonar.

MANIFESTACIONES CARDIOVASCULARES

Por lo que respecta al aparato cardiovascular, las manifestaciones de hipoxia se pueden resumir de la siguiente manera: aumento de la frecuencia cardíaca, incremento del gasto cardíaco, elevación de la presión arterial sistémica, vasoconstricción periférica, vasodilatación cerebral, y a veces hiperventilación y disminución del CO_2 en la sangre, lo que provoca vasoconstricción cerebral.

Si la exposición se hace a 6000 o más metros de altura ocurren cuadros cardiovasculares severos consistentes en colapso circulatorio, bradicardia acentuada, arritmias auriculares y ventriculares, hipotensión arterial, síncope, aumento de la presión venosa, sudoración fría y paro cardiorrespiratorio.

En exposiciones breves en cámara de altitud entre los 4000 y 7000 m se observa en el electrocardiograma ondas P acuminadas y signos de sobrecarga ventricular derecha: incremento de la onda *r* en precordiales derechas, desviación del eje eléctrico a la derecha, signos de rotación horaria ($\text{S}_1 \text{ Q}_3$), aplanamiento de la onda T y ligera depresión del segmento ST. Estos cambios desaparecen al regresar a una altitud baja y después de respirar O_2 100% durante 30 segundos. Las modificaciones electrocardiográficas deben atribuirse a hipertensión arterial pulmonar por vasoconstricción arteriolar pulmonar severa, desencadenada por la hipoxia. La muerte puede ocurrir después de exposiciones a 5000 o más metros de altura, pero es evidente que los problemas pulmonares son menos importantes que los que ocurren en el sistema nervioso central.

Las manifestaciones clínicas que se han mencionado se observan en individuos no aclimatados que son expuestos en forma rápida a la altitud.

No es el caso, como hemos expresado anteriormente, en alpinistas entrenados que van escalando lentamente una montaña para dar tiempo a que en el transcurso de algunos días los mecanismos compensadores de la hipoxia se instalen plenamente; algunos atletas han logrado alcanzar la cúspide del monte Everest sin usar oxígeno suplementario.

Los individuos que radican en zonas de gran altitud, expuestos crónicamente a la hipoxia del ambiente, desarrollan una serie de mecanismos compensadores que los hacen diferentes anatómicamente y funcionalmente a los que radican en zonas bajas (este aspecto se cubrirá en el capítulo 3).

EFECTOS PSICOMOTORES

La hipoxia afecta la coordinación psicomotora, el control neuromuscular se deteriora a medida que se asciende en la atmósfera si no se usa O_2 suplementario o presurización de la cabina. Una prueba clásica es la escritura de frases simples bajo el efecto de la hipoxia; por ejemplo, a partir de los 4500 m de altura la escritura empieza a deformarse, a 6000 m se vuelve indescifrable y a altitudes mayores la incoordinación es total. Si se administra O_2 o se vuelve a una altitud normal el sujeto recupera la capacidad plena para reanudar la escritura normal.

MUERTE POR HIPOXIA

No es común que se observen muertes por hipoxia en la aviación comercial; en cambio, en la aviación militar se han registrado muertes por esta causa, especialmente durante las guerras. Lo curioso de estos decesos es que la mayor parte se han producido a altitudes que no pueden considerarse críticas, a diferencia de ciertos individuos que han sufrido grados de hipoxia más severos y tiempos de exposición mayores y, sin embargo, han sobrevivido; es el caso de algunos polizones que han viajado en el tren de aterrizaje por varias horas en vuelos transoceánicos o intercontinentales y han sido rescatados vivos. Las lesiones que se han identificado en las autopsias de individuos muertos por hipoxia son las siguientes: distensión de venas sistémicas y dilatación del corazón; congestión, edema y hemorragias en el pulmón, corazón y sistema nervioso central.

Profilaxis

El buen funcionamiento de la cabina presurizada de las naves modernas es la mejor medida profiláctica para la hipoxia en vuelo. El principio esencial de la cabina presurizada es mantener una presión barométrica en el interior de la nave que asegure una adecuada PO_2 para la respiración. La cabina de los aviones modernos mantiene la presión barométrica del nivel del mar hasta cierta altura, de ahí en adelante la presión interior va disminuyendo progresivamente hasta que se estabiliza en una altitud simulada que va de 1500 a 2500 m sobre el nivel del mar. A esta presión interior de la cabina se le denomina "presión equivalente". Dentro de este rango de presiones equivalentes la mayor parte de los seres humanos no son afectados en su fisiología.

Otro medio para prevenir la hipoxia en vuelo es la disponibilidad de O_2 suplementario. Los aviones modernos, comerciales y de combate poseen un sistema de suministro de O_2 que se pone en uso automáticamente cuando la presión de la cabina

desciende o se pierde súbitamente. El uso adecuado e inmediato de las mascarillas que proporcionan O_2 puro protegen suficientemente a pasajeros y tripulantes de los efectos de la hipoxia.

En naves de combate, además de la cabina presurizada y el sistema de suministro de O_2 suplementario, se usa traje de presión. Los tripulantes llevan puesto el traje de presión para que en el momento en que surja una pérdida de presión de la cabina, ya sea por perforación del fuselaje por un proyectil o por fallas en el sistema de presurización, el traje automáticamente se infla, lo que proporciona una triple protección: evita el aeroembolismo, la hipoxia y el congelamiento.

A los individuos que practican el alpinismo de gran altura, aquellos que van a residir en lugares de gran altitud o a permanecer con fines diversos en montañas elevadas se les recomienda realizar el ascenso por etapas para dar tiempo a que el organismo humano ponga en juego los mecanismos compensadores de la hipoxia, se logre la aclimatación previa y se evite el edema agudo del pulmón o enfermedad aguda de la montaña.

En cuanto a las tripulaciones aéreas, se recomienda enérgicamente mantener en perfecto estado el sistema de O_2 , usarlo instantáneamente en cuanto se detecte la posibilidad o la certeza de una descompresión que lleve la presión de la cabina a una "equivalente" arriba de 3000 m sobre el nivel del mar. Es recomendable el uso del O_2 suplementario en los vuelos nocturnos a cualquier altura, pues la visión en la noche se afecta importantemente con pequeños grados de hipoxia. También es muy recomendable usar O_2 suplementario en las naves no presurizadas que tengan que elevarse más allá de los 3000 m de altura durante el día.

No debe ingerirse alcohol 24 horas antes del vuelo; el alcohol, aun en pequeñas cantidades en la sangre, interfiere con la entrega de O_2 a los tejidos. Como regla general, los tripulantes de naves aéreas no deben fumar durante el vuelo; el monóxido de carbono, producto de la combustión incompleta del cigarrillo, desplaza con facilidad al O_2 de los glóbulos rojos, pues tiene 210 veces más afinidad que éste por la hemoglobina y ocasiona desaturación de la sangre en grado variable según el número de cigarrillos consumidos. Una persona que radica al nivel del mar sufre una desaturación de la sangre arterial de un 7% durante el vuelo en avión de línea aérea, debido a que la presión barométrica dentro de la nave es equivalente a una altitud de 1500 a 2500 m sobre el nivel del mar; en una persona que fuma con frecuencia, el monóxido de carbono, producto de la combustión incompleta del tabaco, produce también un 7% de desaturación aproximadamente; si esa misma persona ingiere dos a tres copas de una bebida alcohólica durante el vuelo, el alcohol produce una desaturación arterial de otro 7% en promedio; y si además ese pasajero es portador de una neumopatía crónica, lo más probable es que sufra un problema de hipoxia severa durante el viaje.

Tratamiento

Es obvio que el tratamiento de la hipoxia hipobárica se corrige suprimiendo la causa que la está generando; tratándose de un tipo de hipoxia cuya sola causa es el déficit de oxígeno en el ambiente, por el ascenso a una altitud incompatible con el funcionamiento normal del cuerpo, lo debido es suministrar O_2 adicional o descender inmediatamente. A veces es posible administrar el O_2 con la oportunidad y en la cantidad debida y simultáneamente descender, pero no es raro que sólo uno de estos actos pueda realizarse.

A 10 364 m (34 000 pies) respirando O_2 puro, la PO_2 alveolar es de 100 mmHg y la saturación de la sangre arterial es de 98%, es decir, las mismas cifras que cuando se respira aire al nivel del mar.

A 12 192 m (40 000 pies) respirando O_2 puro, la PO_2 alveolar es de aproximadamente 60 mmHg y la saturación de la sangre arterial de 87%, es decir, cifras equivalentes a las que se tienen a 3048 m de altura cuando se respira aire ambiente. Lo anterior nos lleva a recordar que si se respira oxígeno 100% entre los 10 364 y 12 192 m de altura es como si se respirara aire desde el nivel del mar hasta 3048 m de altura.

Entre los 12 192 m (40 000 pies) y los 13 106 m (43 000 pies) es posible mantener la sangre arterial con una saturación de O_2 compatible con la salud, a condición de que se aplique el O_2 con presión positiva intermitente. Arriba de este límite (13 106 m) ya no es útil el O_2 puro a presión, excepto por periodos muy breves y siempre con el riesgo de dañar las estructuras pulmonares por el aumento de la presión intratorácica, lo que además causa dificultad en el retorno venoso, disminución del gasto cardiaco y puede llegar el sujeto hasta el síncope.

Tratándose de las tripulaciones aéreas y ante una descompresión brusca de la cabina cercana a los 15 240 m (50 000 pies), el respirar oxígeno a presión puede prolongar el tiempo de conciencia útil y lograr el descenso sin pérdida del conocimiento.

Las tripulaciones de aviones de combate deben utilizar traje de presión para evitar los efectos de la hipoxia aguda en el caso de una descompresión por arriba de los 13 106 m de altura. La descompresión de la cabina de naves espaciales hace absolutamente indispensable el uso del traje espacial o el refugio en otro módulo de la nave que proporcione las condiciones de presión barométrica y PO_2 compatibles con la vida.

Referencias

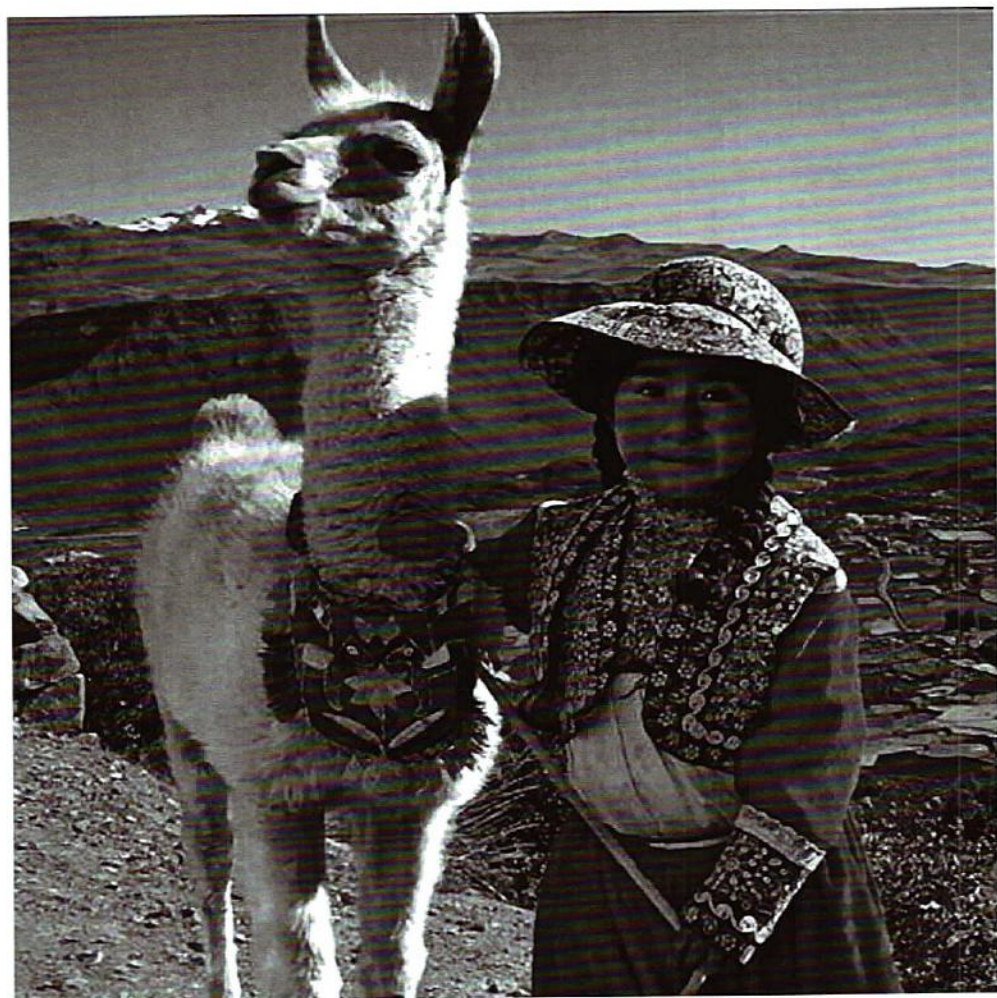
Bahrke MS., Shukitt-Hale B., *Effects at altitude on mood, behavior and cognitive functioning: a review*. Sports Med, 1993; 16, 2:97-125.

- Barry PW., Pollard AJ., *Altitude illness*. Br J Med, 2003; 326:915-9.
- Bartsch P., Fluger NP., Audetat M., et al., *Effects of slow ascent to 4559 m on fluid homeostasis*. Aviat Space Environ Med, 1991; 62:105-10.
- Bert P., *Barometric pressure: researches in experimental physiology*. Bethesda, MD: Undersea Medical Society; 1978.
- Bezruchka S., *High altitude medicine*. Med Clin N Am, 1992; 76:1481-97.
- Bonnon M., Noël – Jorand P., *Psychological changes during altitude hypoxia*. Aviat. Space Environ. Med, 1995; 66:330-5.
- Cavaletti G., Garavaglia P., Arrigoni G., Tredici G., *Persisten memory impairment after high altitude climbing*. Int j Sports Med, 1990; 11:176-8.
- Cavaletti G., Tredici G., *Effects of exposure to low oxygen pressure on the central nervous system*. Sport Med, 1992; 13:1-7.
- Christensen CC., Ryg M., Refvem OK., Skjonsberg OH., *Development of severe hypoxemia in chronic obstructive pulmonary disease patients at 2 438 m (8 000ft) altitude*. Eur Respir J., 2000; 15:635-9.
- Clark CF., Heaton RK., Wiens AN., *Neuropsychological functioning after prolonged high altitude exposure in mountaineering*. Aviat Space Environ Med, 1983; 54:202-7.
- Coker RK., Partridge MR., *Assessing the risk of hypoxia in flight: the need for more rational guidelines*. Eur Resp J., 2000; 15:128-30.
- Consolazio FC., Johnson HL., Matoush LO., et al., *Respiratory function in normal young adults at sea level and 4300 meters*. Mil Med, 1968; 19:96-105.
- Crowley JS., Wesensten N., Kamimori G., et al., *Effect of high terrestrial altitude and supplemental oxygen on human performance and mood*. Aviat Space Environ, Med, 1992; 63:696-701.
- Cruz JC., *Mechanics of breathing in high altitude and sea level subjects*. Respir Physiol 1973; 17:146-61.
- Cutaia M., Rounds S., *Hypoxic pulmonary vasoconstriction: physiologic significance, mechanism and clinical relevance*. Chest, 1990;97:706-18.
- Davis JR., Johnson R., Stepanek J., Fogarty JA., (eds.) *Fundamentals of Aerospace Medicine, 4th ed*. Philadelphia: Wolters Kluner/Lippincott Williams & Wilkins, 2008.
- Dillard TA., Rosenberg AP., Berg BW., *Hypoxemia during altitude exposure*. Chest 1993; 103:422-5.
- Farmer EW., Lupa Ht., Dunlop F., McGowan JF., *Task learning under mild hypoxia*. In: Sutton JR., Coates G., Houston CS., eds. *Hypoxia and mountain medicine*. Oxford: Pergamon Press, 1992; 1-8.
- Forte VA., Leith DE., Muza SR., et al., *Ventilatory capacities at sea level and high altitude*. Aviat Space Environ Med, 1997; 68:488-93.
- Fowler B., Banner J., Pogue J., *The slowing of visual processing by hypoxia*. Ergonomics 1993; 36:727-35.
- Fowler B., Paul M., Porlier G., et al., *A re-evaluation of the minimum altitude at which hypoxic performance decrements can be detected*. Ergonomics 1985; 28:781-91.
- Gautier H., Peslin R., Grassino A., et al., *Mechanical properties of the lungs during acclimatization to altitudes*. J. Appl Physiol 1982; 52(6):1407-15.

- Hamilton AJ., Trad LA., Cymmerman A., *Alterations in human upper extremity motor function during acute exposure to simulated altitude*. Aviat Space Environ Med, 1991; 62:759-64.
- Heistad DD., Abboud FM: *Circulatory adjustments to hypoxia*. Circulation 1980; 61:463-70.
- Hornbein T., Townes B., Schoene R., et al., *The cost to the central nervous system of climbing to extremely high altitude*. N. Engl. J. Med. 1989; 321:1714-9.
- Houston CS., Sutton JR., Cymmerman A., Reeves JT., *Operation Everest II: man at extreme altitude*. J Appl Physiol, 1987; 63:531-9.
- Kennedy RS., Dunlap WP., Banderet LE., et al., *Cognitive performance deficits in a simulated climb of Mount Everest: Operation Everest II*. Aviat Space Environ Med, 1989; 60:99-104.
- King AB., and SM Robinson., *Ventilation response to hypoxia and acute mountain sickness*. Aerosp Med, 1972; 43:419-421.
- Knudtson J., Owe JO., Aars H., *Baroreflex responsiveness during hypobaric hypoxia*. Aviat Space Environ Med, 1991; 62:397-402.
- Kramer AF., Coyne JT., Strayer DL., *Cognitive function at high altitude*. Hum Factors, 1993; 35:329-44.
- Leiflen D., Poquin D., Savourey G., Barraud PA., Raphael C., Bittel J., *Cognitive performance during short acclimation to severe hypoxia*. Aviat Space Environ Med, 1997; 68:993-7.
- Macintosh JH., Thomas DJ., Olive JE., et al., *The effect of altitude on tests of reaction time and alertness*. Aviat Space Environ Med, 1988; 59:246-8.
- Mairbaure H., *Red blood cell function in hypoxia at altitude and exercise*. Int J Sports Med, 1994; 15:51-63.
- Michel CC., Milledge JS., *Respiratory regulation in man during acclimatization to high altitude*. J. Physiol, 1963; 168:631-43.
- Monge C., C., Bonavia D., Leon-Velard, F. and Arregui, A. (1990) *High Altitude populations in Nepal and the Andes, in: Hypoxia: the adaptations* (eds. J. R. Sutton, G. Coates and J. E. Remmers). Decker, Toronto, pp. 53-8.
- Muhm JM., Signal TL., Rock PH., et al., *Sleep at simulated 2438 m: effects on oxygenation, sleep quality, and postsleep performance*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80:691-7.
- Nelson M., *Psychological testing at high altitudes*. Aviat Space Environ. Med, 1982; 122-26.
- Nicholas R., O'Meara PD, Calonge N. *Is syncope related to moderate altitude exposure?* JAMA 1992; 268:904-6.
- Purkayastha SS., Ray US., Arora BS., et al., *Acclimatization at high altitude in gradual and acute induction*. J Appl Physiol, 1995; 79(2):487-92.
- Reeves JT., McCullough RE., Moore LG., et al., *Sea level PCO₂ relates to ventilatory acclimatization at 4300 m*. J Appl Physiol, 1993;75:1117-22.
- Regard M., Oelz O., Brugger P., Landis T., *Persistent cognitive impairment in climbers after repeated exposure to extreme altitude*. Neurology, 1989; 39:210-3.
- Richalet JP., Herry JP., et al., *Use of a hypobaric chamber for pre-acclimatization before climbing Mount Everest*. Int J Sports Med, 1992; 13:S216-20.
- Savourey F., Guinet A., Besnard Y., et al., *Evaluation of the Lake Louise acute mountain sickness scoring system in hypobaric chamber*. Aviat Space Environ Med, 1995; 66:693-7.

- Savourey G., Garcia N., Besnard Y., et al., *Physiological changes induced by pre-adaptation to high altitude*. Eur J Appl Physiol, 1994; 69:221-7.
- Savourey G., Launay J., Besnard Y., Guinet A., Travers S., *Normo-and hypobaric hypoxia: are there any physiological differences?* Eur J Appl Physiol, 2003; 89:122-6.
- Sharma VM., Malhotra MS., Baskaran AS., *Variations in psychomotor efficiency during prolonged stay at high altitude*. Ergonomics, 1975; 18:511-6.
- Sningh MV., Salhan AK., Rawal SB., Tyagi AK., Kumar N., Verma SS., *Selvamrthy W. Blood gases, hematology, and renal blood flow during prolonged mountain sojourns at 3500 and 5800 m*. Aviat Space Environ Med, 2003; 74:533-6.
- Snyder EM., Beck KC., Hulsebus ML., Breen JF., Hoffman EA., Jhonson BD., *Short-term hypoxic exposure at rest and during exercise reduces lung water in healthy humans*. J. Appl Physiol, 2006; 101:1623-32.
- Swenson ER., *Renal function and fluid homeostasis*. In: Hornbein TF., Schoene RB., eds. *High altitude. An exploration of human adaptation*. New York: Marcel Dekker, 2001:525-68.
- Ward M., Milledge JS., West J-B., *High altitude medicine and Physiology*. London: Chapman & Hall Medical; 1989: 325-43.
- Welsh CH., Wagner PD., Reeves JT., et al., *Operation Everest II: spirometric and radiographic changes in acclimatized humans at simulated high altitudes*. Am Rev Respir Dis, 1993; 147:1239-44.
- West JB., *Do climb to extreme altitude cause brain damage?* Lancet 1986; ii (8503):387-8.
- West JB., *Barometric pressures on Mount Everest: new data and physiological significance*. J. Appl Physiol, 1999; 86:1062-6.
- West JB., Lahiri S., Maret KH., et al., *Barometric pressures at extreme altitudes on Mount Everest: physiological significance*. J Appl Physiol, 1983; 54:1188-94.
- West JB., *Communing to high altitude: value of oxygen enrichment of room air*. High Alt Med, Biol 2002; 3:223-35.
- West JB., *High life—A history of high altitude physiologic and medicine*. Oxford: Oxford University Press; 1998.
- West JB., *Improving oxygenation at high altitude: acclimatization and O₂ enrichment*. High Alt Med, Biol 2003; 4:389-98.
- West JB., (1988b) *Tolerable limits to hypoxia on high mountains*, in *Hypoxia: the Tolerable Limits* (eds. J. R. Sutton, C. S. Houston and G. Coates), Benchmark Press, Indianapolis, pp.353-62.
- West, JB., (2000) *Respiratory Physiology-The Essentials*, 6th ed. Williams & Wilkins, Baltimore, MD.
- Westendorp RG., Blauw GJ., Frölich M., Simons R., *Hypoxic syncope*. Aviat Space Environ Med, 1997; 68:410-4.
- Wickramasinghe H., Anholm JD., *Sleep and breathing at high altitude*. Sleep Breath 1999; 3(3):89-109.

Capítulo 3



Enfermedad de la altitud

Se denomina noosfera al espacio de la atmósfera en el que radica el ser humano. Es la parte más baja de la atmósfera comprendida entre el nivel del mar y los 5 km de altura; es excepcional la existencia de comunidades humanas por encima de este límite, aunque debe admitirse que algunos pequeños núcleos de población formados por mineros y pastores de ganado caprino pueden temporalmente radicar entre los 5 y 6 km de altura, es el caso de las instalaciones mineras en la cordillera de los Andes y criaderos de cabras en el Tibet y Nepal.

Desde el punto de vista anatómico, fisiológico y de la patología humana existen notables diferencias entre los habitantes de zonas bajas y los residentes de la gran altitud. En este capítulo vamos a analizar dos cuadros patológicos muy bien identificados provocados por la exposición aguda y crónica a la gran altitud. También describiremos las peculiaridades cardiovasculares de las personas que radican en zonas montañosas situadas por encima de los 3000 m de altura.

Enfermedad aguda de la montaña

La enfermedad aguda de la montaña (EAM) es un cuadro peculiar de insuficiencia respiratoria aguda que se presenta en individuos que se exponen rápidamente a la altitud (generalmente arriba de los 2500 a 3000 m de altura); lo sufren habitualmente personas sanas, varones jóvenes, pero pueden sufrirlo también personas de mayor edad. Este proceso, que obedece a hipoxia ambiental, hace estragos a veces en alpinistas, soldados que deben cruzar o combatir en la montaña, pasajeros que en vehículos terrestres deben atravesar las cordilleras (como es el caso de los Andes), turistas de los hoteles a gran altitud, deportistas de ski de montaña o visitantes de parajes de gran altura. El cuadro remite casi de inmediato con la aplicación de oxígeno y el descenso inmediato, pero si no se toman estas medidas puede agravarse severamente y conducir incluso a la muerte.

Etiología

La única causa reconocible de la EAM es la hipoxia hipobárica, es decir, la baja presión de oxígeno en el aire de la gran altitud. El 25% de los turistas que acuden a hoteles de la montaña sufren las molestias de esta enfermedad. El 14% del total de las muertes ocurridas en la montaña son atribuidas al edema agudo pulmonar de la altitud (EAPA) y sus complicaciones.

Existen circunstancias que favorecen la presentación de la EAM; una de ellas es la rapidez del ascenso, por ejemplo, si se pretende alcanzar una altitud de 5500 m en menos de 24 horas, la posibilidad de sufrirla es de 10%; si se hace entre dos y cuatro días la posibilidad desciende a menos de 1%, porque el organismo ha tenido tiempo de adquirir una aclimatación parcial. Si el ascenso se hace rápidamente y en él se ejecuta un esfuerzo importante, es posible que la EAM se presente desde los 2500 m de altura.

Las personas que previamente han sufrido EAM tienen 50% de probabilidades de volverla a presentar entre los 2500 y los 4500 m de altura. La ingestión de alcohol durante estas maniobras precipita la presentación de la EAM, porque el alcohol interfiere con la entrega de oxígeno a nivel celular.

En cambio, los individuos aclimatados a la altitud media (alrededor de 2000 m) tienen una mayor tolerancia al ascenso rápido, arriba de los 3000 m.

Fisiopatología

El organismo humano responde a la hipoxia ambiental de la altitud de la siguiente manera: a) vasoconstricción arteriolar pulmonar severa, pero esta vasoconstricción no es generalizada ni uniforme, sino que se presenta en zonas limitadas y distribuidas irregularmente en toda la extensión de los pulmones; b) como consecuencia sobreviene una extrema elevación de la presión arterial pulmonar; c) el flujo sanguíneo pulmonar es derivado hacia las zonas de menor vasoconstricción, pero ahí hay también aumento de la presión capilar pulmonar; d) como consecuencia de lo anterior se produce filtración de líquido con alto contenido de proteínas a través de las paredes de las arteriolas hacia el espacio intersticial y a través de los capilares hacia los alvéolos; e) con frecuencia hay ruptura de pequeños vasos, hemorragias y trombosis en ciertas zonas del pulmón.

Este proceso conduce al EAPA, el cual se diferencia del edema agudo pulmonar de origen cardiaco en que no existe hipertensión venocapilar, no se inicia en las bases ni avanza progresivamente hacia arriba, sino que se produce en zonas limitadas e irregularmente distribuidas en toda la extensión de los pulmones; no existe insuficiencia cardiaca izquierda ni obstáculo al flujo sanguíneo a través de las cavidades izquierdas; en general se presenta en personas sanas y habitualmente varones jóvenes.

Actualmente se acepta que el mecanismo directo de la producción del EAPA es la exagerada respuesta vasoconstrictora arteriolar pulmonar y a la elevación excesiva de la presión arterial pulmonar (las cifras a veces van más allá de los 140 mmHg sistólica y 100 mmHg la diastólica) cuyo único y poderoso estímulo es la baja tensión de oxígeno ambiental. Esto trae como consecuencia la filtración de plasma a través de las paredes de arterias terminales y arteriolas precapilares, así como dilatación importante y ruptura de arteriolas del lecho precapilar, con salida de líquido y glóbulos rojos hacia el espacio intersticial y alveolar, en zonas limitadas del pulmón.

Se ha observado que los sujetos que han sufrido EAPA tienen un lecho capilar pulmonar, capacidad vital, capacidad pulmonar total y capacidad funcional residual menor que aquellos individuos que en igualdad de circunstancias no han presentado este problema. Es también digno de mencionar el hecho de que las autopsias practicadas a los sujetos que han muerto como consecuencia del EAPA presentan invariablemente edema cerebral y congestión sanguínea generalizada.

Cuadro clínico

En los individuos susceptibles las molestias se inician aproximadamente a los 2500 m de altura, pero es común observar que los turistas que acuden a hoteles de la montaña la sintomatología puede iniciarse incluso a partir de los 2000 m sobre el nivel del mar, pero no es raro observar que algunas personas empiezan a sentir sus primeros síntomas a alturas mucho mayores. Como se ve, existe una susceptibilidad individual, en personas sanas, a la hipoxia.

Los síntomas más comunes de la EAM son los siguientes: cefalea similar a la que se experimenta durante la "cruda" por bebidas alcohólicas, fatiga, aturdimiento, insomnio, anorexia, náusea y vómito, lipotimias, disnea, dolor retroesternal y alucinaciones; cuando se inicia el edema agudo pulmonar aparece tos con expectoración espumosa y posteriormente sanguinolenta; como el edema pulmonar va siempre acompañado de edema cerebral, el estado mental del paciente es de franca obnubilación, lo cual sin la asistencia apropiada conduce al estado de coma. La exploración física en las primeras etapas de la EAM muestra a un individuo con facies de angustia, disneico, ligeramente cianótico, la marcha titubeante y cierto grado de confusión mental; la frecuencia cardíaca, la frecuencia respiratoria y la presión arterial se elevan; el segundo ruido pulmonar está acentuado; estertores crepitantes y sibilancias localizadas en ciertas áreas del pulmón que no tienen una distribución homogénea; algunos pacientes presentan fiebre, que en estos casos no es necesariamente la expresión de infección pulmonar.

Se ha propuesto estimar el grado de severidad del cuadro de EAPA de la siguiente manera: grado 0, cuando hay algunos signos pero no síntomas (aun cuando se realice

esfuerzo físico); grado I, aparecen síntomas con el esfuerzo; grado II, cuando hay síntomas con la actividad normal y el paciente permanece ambulatorio; grado III, si hay síntomas severos en reposo pero el sujeto es capaz de valerse a sí mismo; grado IV, es la incapacidad total o estado de coma. Otros autores prefieren clasificar el EAPA en ligero, moderado y severo, de acuerdo con el grado de cianosis, taquicardia, taquipnea y el aspecto radiológico del pulmón.

No es raro que el EAPA se confunda con otros procesos patológicos, los más comunes son los siguientes: neumonía, porque en algunos casos se presenta fiebre y leucocitosis; tromboembolia pulmonar, porque en algunos pacientes se presenta dolor torácico retroesternal y expectoración sanguinolenta; insuficiencia cardíaca izquierda, porque hay disnea, tos y expectoración espumosa o sanguinolenta y estertores crepitantes; asma, porque la disnea es intensa y se escuchan casi siempre estertores sibilantes; bronquitis aguda, porque se confunde con lo que se denomina "bronquitis de la altitud" que se sufre en la alta montaña, pero no es infecciosa, sino irritativa, por la hiperventilación en un ámbito frío y seco, que irrita el epitelio traqueobronquial, pero no existe fiebre ni cianosis.

Estudios de laboratorio y gabinete

Algunos de estos estudios se han realizado en instalaciones equipadas y previamente establecidas en la montaña con motivo de algunos programas específicos de investigación, pero la mayor parte son realizados en hospitales cercanos a las montañas donde se generan este tipo de problemas.

El dato más sobresaliente en estos casos es la hipoxemia, que siempre es mayor en los individuos afectados de EAM que en sus compañeros que no lo están; por ejemplo, a 4500 m de altura la presión de oxígeno arteriolar en un individuo afectado puede ser de 23 mmHg y en el que no lo está, de 40 mmHg; la radiografía de tórax muestra opacidades parciales distribuidas en forma irregular en la extensión de los campos pulmonares, son de bordes irregulares y a veces confluentes; el electrocardiograma presenta signos de sobrecarga aguda de cavidades derechas; el ecocardiograma y el cateterismo cardíaco muestran elevación importante de la presión arterial pulmonar, el flujo sanguíneo pulmonar está disminuido y la presión venocapilar pulmonar es normal o baja.

Profilaxis

Los lineamientos generales para tratar de evitar la EAM son los siguientes: a) ascenso lento, a partir de los 2000 m sobre el nivel del mar no debe ascenderse más de 600 o 700 m diariamente; b) no debe realizarse esfuerzo físico extenuante

durante el ascenso, cualquiera que sea la dificultad para escalar; c) si aparecen signos o síntomas de la enfermedad de la montaña, descansar un día o incluso descender unos cientos de metros; d) consumir agua abundantemente para reparar las pérdidas por el esfuerzo físico, pero no mayor cantidad de sal porque esto podría disparar el inicio de la EAM; e) evitar el consumo de alcohol durante la permanencia en la altura porque éste interfiere con la entrega de oxígeno a nivel celular; f) en las personas que previamente han sufrido el EAPA o la EAM es obligado utilizar fármacos profilácticos como la acetazolamida y la dexametasona en la forma que se indica más adelante.

Tratamiento

El tratamiento único y extraordinariamente eficaz es el descenso y el uso de oxígeno. La indicación ideal es el descenso en helicóptero, lo que generalmente es posible cuando se trata de miembros de las fuerzas armadas, huéspedes de centros turísticos de la montaña, esquiadores profesionales o miembros de expediciones científicas; pero desafortunadamente en un gran número de casos el descenso es problemático, no sólo por el estado del paciente, sino porque las condiciones atmosféricas son adversas. Si el paciente debe permanecer por algún tiempo en el sitio donde se presentó el problema, el uso de oxígeno suplementario debe realizarse intensivamente con catéter nasal o mascarilla, pero lo más apropiado es el uso de cámaras de oxigenación hiperbárica individuales y portátiles, de uso común actualmente; se aplica durante una hora y se valora el caso.

Existen algunos medicamentos de probada utilidad para contrarrestar los efectos de la EAM. Uno de ellos es la acetazolamida, un inhibidor de la anhidrasa carbónica que acelera la eliminación de bases a través de la orina y mejora la alcalosis respiratoria y la respiración; la dosis recomendada en el EAPA es de 750 mg fraccionados en dos o tres tomas en el día. Otro medicamento es la dexametasona, cuyo mecanismo benéfico no está claramente establecido, pero asociada a la acetazolamida ha probado ser de gran utilidad; la dosis es de 8 a 16 mg fraccionados en dos o tres tomas en el día. Otro fármaco muy usado en estos casos es la nifedipina por su efecto vasodilatador de la circulación pulmonar; corrige importantemente la severa hipertensión arterial pulmonar; la dosis es de 10 mg dos o tres veces al día.

La acetazolamida y la dexametasona combinadas se pueden usar como medicamentos profilácticos para evitar la presentación de la EAM, tomando la mitad de las dosis que se han mencionado, dos días antes y hasta dos días después de haber arribado al lugar de destino en la montaña.

El sistema cardiovascular en la gran altitud (El Hombre de los Andes)

Alrededor de 12 millones de seres humanos radican en comunidades de gran altitud sobre la cordillera de los Andes, pero se estima que en el mundo 140 millones habitan en regiones elevadas cuyo ámbito natural impone cambios cardiovasculares, respiratorios, sanguíneos y enzimáticos. Estas personas comparten un entorno natural hipóxico, frío y seco. La hipoxia ambiental configura en estos individuos un aparato cardiovascular en muchos aspectos distinto al de los habitantes de zonas bajas; la anatomía, la fisiología y la patología cardiovascular de los habitantes de la gran altitud es peculiar. Para los seres humanos la zona habitable en la atmósfera terrestre se extiende hasta los 5000 m sobre el nivel del mar; se considera "gran altitud" entre los 3000 y 5000 m de altura.

Características anatómicas

Físicamente, el Hombre de los Andes tiene gran similitud con un atleta entrenado, en efecto, es un individuo con gran desarrollo muscular y escasa grasa corporal, lo que se atribuye a la gran actividad física que debe realizar en razón de la topografía irregular propia de la montaña. El tórax está muy desarrollado porque el medio ambiente hipóxico obliga a respirar con más frecuencia y con mayor amplitud; los capilares pulmonares son más numerosos; el área alveolar es muy amplia, pues los alvéolos son más numerosos y más amplios; los quimiorreceptores periféricos (cuerpos carotídeo y aórtico) están muy hipertrofiados, en razón de que el principal estímulo de estos órganos es la baja tensión de oxígeno en el ambiente y en la sangre. El corazón, a semejanza de un atleta, es más grande que lo habitual y predomina el desarrollo de las cavidades derechas, porque es común observar en los habitantes de las grandes alturas cierto grado de hipertensión arterial pulmonar; el desarrollo de la red arterial coronaria es impresionante, los troncos arteriales son gruesos, existe una mayor cantidad de ramas secundarias naciendo de las arterias principales, la zona capilar coronaria es intensa; la red vascular en todos los órganos y tejidos (excepto en la piel) es mucho mayor por unidad de tejido que en los individuos de zonas bajas.

El número de glóbulos rojos, la cantidad de hemoglobina y el hematocrito están extraordinariamente elevados (el resto de las células sanguíneas se mantienen en proporción similar al de los sujetos de zonas bajas). La radiografía de tórax muestra campos pulmonares muy amplios, la vascularidad pulmonar aumentada y la silueta cardíaca crecida. El electrocardiograma habitualmente muestra signos de hipertrofia de cavidades derechas.

Características fisiológicas

Los datos fisiológicos propios del Hombre de los Andes son los siguientes: aumento en el número de respiraciones por minuto, la capacidad vital muy aumentada, las inspiraciones son más profundas, el volumen corriente está elevado; la alcalosis respiratoria, generada por la hiperventilación, se compensa por una disminución del ion bicarbonato en la sangre; la mayor cantidad de glóbulos rojos y de hemoglobina se traduce por un mayor contenido de oxígeno por unidad de volumen sanguíneo. La presión arterial sistémica es habitualmente baja; la perfusión sanguínea en los tejidos es mayor, lo que asegura un aporte adecuado de oxígeno; la eritropoyesis está aumentada, lo cual se demuestra con biopsias de médula roja; la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno está disminuida, en otras palabras, la curva de disociación de la hemoglobina para un pH dado está desplazada a la derecha, lo que facilita la entrega de este gas a los tejidos; el número de mitocondrias en las células de todos los tejidos está elevado y la actividad de las enzimas respiratorias en estos individuos es mayor. Los nativos de la gran altitud tienen una mayor tolerancia al ejercicio (no obstante su deuda de oxígeno); hay menor producción de lactato y piruvato, lo que indica que la mayor fuente de energía en estos individuos es aeróbica más que anaeróbica.

La patología cardiovascular

Por lo que respecta a las enfermedades cardiovasculares, está plenamente demostrado que la hipertensión arterial esencial y la enfermedad coronaria son prácticamente desconocidas en las poblaciones de los Andes; esto debe atribuirse a que el medio ambiente hipóxico y la consecuente disminución de la presión parcial de oxígeno en los tejidos actúa como un factor poderoso de vasodilatación generalizada; a esto debe agregarse el hecho de que los nativos de esas regiones realizan intenso ejercicio físico y sus dietas son menos aterogénicas. También son escasas las cardiopatías congénitas cianógenas; en realidad esto se interpreta no como una disminución real de esta patología, sino que la sobrevivencia en el ámbito hipóxico es menor. En cambio, las cardiopatías congénitas acianógenas son más frecuentes, particularmente la persistencia del conducto arterioso. La enfermedad aguda de la montaña y la enfermedad crónica de la montaña son cuadros patológicos propios de estas regiones, pero no exclusivos, porque se pueden observar, con menor frecuencia, en las zonas que se consideran de altitud media (entre 2000 y 3000 m de altura). Se ha observado también que en las comunidades de la gran altitud la diabetes mellitus y la leucemia son de una incidencia muy baja; en cambio, son muy frecuentes la úlcera péptica, la colelitiasis y, en general, las enfermedades hepáticas. Además, la silicosis es abundante en estas poblaciones que son predominantemente mineras, favorecida

por la hiperventilación que lleva al pulmón una mayor cantidad de partículas en menor tiempo.

Por último, debemos señalar que los factores de riesgo coronario reconocidos clásicamente tienen una baja presencia en el habitante de la gran altitud; por ejemplo, los lípidos totales, el colesterol, los triglicéridos son en general de bajo nivel; la hipertensión arterial sistémica prácticamente no existe, la diabetes mellitus y la obesidad son raras y la incidencia de fumadores es baja.

Enfermedad crónica de la montaña (Enfermedad de Monge)

Los residentes de las zonas de la gran altitud, como es el caso de las poblaciones situadas entre los 3000 y 5000 m sobre el nivel del mar desarrollan mecanismos cardiovasculares, respiratorios, hematológicos y enzimáticos que compensan la baja tensión de oxígeno ambiental. Los nativos de esas poblaciones poseen una aclimatación que se denomina "natural". Por razones aún no bien dilucidadas, algunos pobladores de la gran altitud pierden de pronto su aclimatación y desarrollan un estado de insuficiencia respiratoria severo caracterizado por hipoventilación, hipoxemia, hipercapnia y acidosis respiratoria denominado "soroche" en la región de los Andes. En la literatura médica mundial se conoce con el nombre de enfermedad crónica de la montaña o enfermedad de Monge, en honor del médico peruano Carlos Monge, quien en 1928 hizo la primera descripción clínica y estableció la etiopatogenia de este cuadro.

Etiología

La hipoventilación se atribuye a falla o pérdida de la sensibilidad del centro respiratorio a la estimulación química del CO_2 , a la falta de respuesta de la estimulación que le llega de los quimiorreceptores periféricos. Lo anterior trae como consecuencia una grave desaturación de la sangre arterial, un estado prolongado de hipoxemia que estimula la eritropoyesis y lleva a límites extremos la cantidad de hemoglobina y el hematocrito; la hipoventilación condiciona, asimismo, un estado de acidosis respiratoria no compensado.

La enfermedad crónica de la montaña (ecm) es más común en pacientes con problemas respiratorios previos, como la silicosis, fibrosis pulmonar, enfisema, xifoecoliosis, tuberculosis, trastornos de los músculos respiratorios, hipertensión arterial pulmonar, bronquitis crónica, etcétera; la obesidad extrema es también un factor predisponente. Hay un hecho curioso de observación frecuente: los residentes de la gran altitud que bajan a la costa, permanecen algún tiempo en esa zona y regresan

a su lugar de origen, están más expuestos a sufrir la ECM que sus coterráneos, incluso se vuelven más vulnerables que aquellos que llegan por primera vez a radicar a la montaña.

Fisiopatología

El habitante de la gran altitud compensa la baja presión de oxígeno ambiental aumentando el número y la profundidad de las respiraciones, creando mayor cantidad de glóbulos rojos y hemoglobina para el transporte adicional del oxígeno, y aumentan la cantidad de mitocondrias y la eficiencia de las enzimas respiratorias. Pero al perderse la sensibilidad del centro respiratorio al aumento del CO_2 (hidrogeniones del líquido cefalorraquídeo) y su baja respuesta a la estimulación de los quimiorreceptores periféricos, sobreviene una situación de hipoventilación alveolar y un descenso adicional de la saturación de la sangre arterial.

En algunas estimaciones se ha observado que los individuos afectados de ECM pueden llegar a tener un hematocrito de 80%, hemoglobina de 26 g por 100 ml, saturación de sangre arterial de 70%. La hipoxia severa favorece la vasoconstricción arteriolar pulmonar y el aumento significativo de la presión arteriolar pulmonar; es notable el engrosamiento de la capa muscular y del epitelio de las arteriolas pulmonares.

La hipoxia es responsable también de la falla biventricular y del cuadro de insuficiencia cardíaca congestiva venosa. La hipertrofia de los cuerpos carotídeos y aórticos en estos casos es muy notable.

Cuadro clínico

La Enfermedad de Monge no se inicia de manera súbita, sino que empieza a manifestarse generalmente por disnea de grandes esfuerzos que va progresando hasta de medianos y pequeños esfuerzos, incluso hasta ortopnea; tos con expectoración blanquecina y en ocasiones sanguinolenta; fatiga, aletargamiento e insomnio, cefalea y lipotimias. Durante la exploración física el paciente se muestra intensamente cianótico, movimientos respiratorios superficiales, ingurgitación yugular, hepatomegalia, edema de miembros inferiores; estertores crepitantes en las bases, soplo sistólico suave en foco pulmonar, segundo ruido pulmonar acentuado, a veces matidez en las bases por derrame pleural, presión arterial sistémica generalmente elevada.

Exámenes de laboratorio

Invariablemente, el número de glóbulos rojos, la cantidad de hemoglobina y el hematocrito se encuentran muy por encima de los límites normales, aun para los ha-

bitantes de la alta montaña,¹ en algunas estimaciones de exámenes practicados a individuos con enfermedad de Monge se han encontrado cifras promedio de 26 g de hemoglobina por 100 ml de sangre, hematocrito de 80% y saturación de la sangre arterial de 70%. En el cateterismo derecho practicado a estos pacientes se han encontrado cifras promedio de 64 mmHg de presión arterial pulmonar sistólica, 33 mmHg de presión arterial pulmonar diastólica y 47 mmHg de presión arterial pulmonar media.

RX DE TÓRAX

Se observa cardiomegalia importante a expensas principalmente de cavidades derechas, pero también hipertrofia ventricular izquierda; el arco de la pulmonar dilatado, signos de congestión pasiva, particularmente importante en las regiones parahiliares, a veces imagen de derrame pleural bilateral.

ELECTROCARDIOGRAMA

Eje eléctrico a la derecha, P pulmonale, Rs en precordiales derechas, onda T negativa de V_1 a V_3 (no se interpreta como isquemia, sino como sobrecarga ventricular derecha).

Tratamiento

El manejo de estos pacientes no es otro que el de trasladarlos inmediatamente a la costa o regiones de baja altitud, pero mientras se realiza el traslado es preciso aplicar oxígeno suplementario. La mejoría es inmediata, pero el cuadro se resuelve en el transcurso de algunos días o semanas.

Lo primero que desaparece es la disnea, la cianosis, la fatiga y el insomnio; luego los signos de congestión generalizada, finalmente van desapareciendo los datos anormales de laboratorio y gabinete.

Los individuos que han sufrido la ECM no deben regresar a la altitud, pues están muy expuestos a sufrir más gravemente el mismo problema.

Referencias

Ajasse D., *Le mal des montagnes. Un essai thérapeutique à double insu à 7700 mètres*. La Vie Médicale, 1984; 19:749-50.

¹ Las cifras hematológicas promedio en los residentes de los Andes son las siguientes: hemoglobina 20 g por 100 ml, hematocrito 60%, saturación de la sangre arterial 80%.

- Anand L., Malhotra R., Chandrashekhar Y., et al., *Adult sub-acute mountain sickness-a syndrome of congestive heart failure in man at very high altitude*. Lancet, 1990; 335:561-5.
- Anholm JD., Houston CS., Hyers TM., *The relationship between acute mountain sickness and pulmonary ventilation at 2 835 meters (9,300 feet)*. Chest, 1979; 75:33 – 6.
- Arias-Stella, J., and Topilsky M., (1971) *Anatomy of the coronary circulation at high altitude, in High Altitude physiology: Cardiac and Respiratory Aspects* (eds. R. Porter and J. Knight), Churchill Livingstone, London, pp.149-57.
- Arias-Stella J., (1971), *Chronic mountain sickness: pathology and definition, in High Altitude Physiology Cardiac and respiratory Aspects*, Ciba fundation Symposium (eds. R. Porter and J. Knight), Churchill Livingstone, Edinburgh, pp.31-40.
- Arias-Stella J., Valcarcel J., *Chief cell hyperplasia in the human carotid body at high altitudes: physiologic and pathologic significance*. Hum Pathol, 1976; 7:361-73.
- Arias-Stella J., (1996), *Human carotid body at high altitude (abstract)*. Am. J. Pathol. 55, 82.
- Arias-Stella J., Kruger H., (1963), *Pathology of high altitude pulmonary edema*. Arch. Pathol. 76, 147-57.
- Arias-Stella, J., Kruger H., and Recabarren, S. (1973), *Pathology of Chronic mountain sickness*. Thorax 28,701-8.
- Bartsch P., Shaw S., Wiedmann P., et al., *Atrial natriuretic peptide in acute mountain sickness*. J Appl Physiol. 1998; 65:1929-37.
- Basnyat B., Lemaster J., Litch J., *Everest or bust: a cross sectional, epidemiological study of acute mountain sickness at 4243 meters in the Himalayas*. Aviat Space Environ Med, 1999, 70:867-73.
- Bernhard WN., Schalick LM., Gittelsohn A., *Dexamethasone for prophylaxis against acute mountain sickness during rapid ascent to 5334m. J.*, Wilderness Med 1994; 5:331-8.
- Bernhard WN., Schalick LM., Delaney PA., Bernhard TM., Barnas GM., *Acetazolamide plus low-dose dexamethasone is better than acetazolamide alone to ameliorate symptoms of acute mountain sickness*. Aviat Space Environ Med, 1988; 69:883-6.
- Bezruchka S., *Altitude illness: prevention and treatment*. Seattle, WA: The mountaineers, 1994.76-7.
- Brody JS., Lahiri S., Simpser M., et al., *Lung elasticity and airway dynamics in Peruvian natives to high altitude*. J. Appl Physiol, 1977; 42:245-51.
- Coletta SL., *Acute mountain sickness*. Sports Med Update 1997; 11:6-11.
- Cosio G., *Trabajo minero a gran altura y los valores hemáticos*. Bol Inst Salud Ocupacional. Lima, 1965; 10:5-12.
- Dehart RL., Davis JR., (eds.) *Fundamentals of Aerospace Medicine, 3th ed*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2002.
- Eldridge MW., Podolsky A., Richardson RS., et al., *Pulmonary hemodynamic response to exercise in subjects with prior highaltitude pulmonary edema*. J. Appl Physiol 1996; 81:911-21.
- Ellsworth AJ., Meyer EF., Larson EB., *Acetazolamide or dexamethasone use versus placebo to prevent acute mountain sickness on Mountain Rainier*. West J. Med, 1991; 154:289-93.
- Federsen B., Ausserer H., Haditsch B., Frisch H., Noachtar S., Straube A., *Brain natriuretic peptide at altitude: relationship to diuresis, natriuresis, and mountain sickness*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80:108-11.

- Forward SA., Landowne M., Follansbee JN., Hansen JE., *Effect of acetazolamide on acute mountain sickness: N. Engl J. Med.*, 1968; 279:839-45.
- Gautier H., Peslin R., Grassino A., et al., *Mechanical properties of the lung during acclimatization to altitude: J. Appl Physiol.*, 1982; 52:1407-15.
- Gertsch JH., Basnyat B., Johnson EW., et al., *Randomised, double blind placebo controlled comparison of ginko biloba and acetazolamide for prevention of acute mountain sickness among Himalayan trekkers; the prevention of high altitude illness trial (PHAIT).* Br J Med, 2004; 328:797.
- Greene MK., Kerr AM., McIntosh IB., Prescott RJ., *Acetazolamide in prevention of acute mountain sickness: a double-blind controlled cross-over study.* Br Med. J., 1981; 283:811-3.
- Grissom CK., Roach RC., Sarnquist FH., Hackett PH., *Acetazolamide in the treatment of acute mountain sickness: clinical efficacy and effect on gas exchange.* Ann Intern Med, 1992; 116:461-5.
- Grissom CK., Roach RC., Sarnquist FH., Hackett PH., *Acetazolamide in the treatment of acute mountain sickness: clinical efficacy and effect on gas exchange.* Ann Intern Med, 1992; 116:461-5.
- Groves BM., Droma T., Sutton JR., et al., *Minimal Hypoxic pulmonary hypertension in normal Tibetans at 3658m.* J. Appl Physiol, 1993; 74:312-8.
- Hackett PH., Roach RC., *High-altitude illness.* N., Engl. J. Med, 2001; 345:107-14.
- Hackett PH., Rennie D., Grover RF., Reeves JT., *Acute mountain sickness and the edemas of high altitude: A common pathogenesis?* Respir Physiol, 1981; 46:383-90.
- Hackett PH., Rennie D., Levine HD: *The incidence, importance and prophylaxis of acute mountain sickness.* Lancet, 1976; 2:1149-55.
- Hackett PH., Roach RC., Wood RC., et al., *Dexamethasone for prevention and treatment of acute mountain sickness.* Aviat Space Environ Med, 1988; 59:950-4.
- Hackett PH., Roach RC., *High-altitude medicine.* In: Auberach PA., ed. Wilderness medicine. St. Louis: Mosby, 1995.
- Hackett PH., Yarnell PR., Hill R., et al., *High altitude cerebral edema evaluated with magnetic resonance imaging.* Clinical correlation and pathophysiology. JAMA, 1988; 28:1920-5.
- Hackett PH., Rennie ID., Hofmeister SE., et al., *Fluid retention and relative hypoventilation in acute mountain sickness.* Respiration, 1982; 43(5):321-9.
- Heath D., Williams Dr., *High altitude Medicine and pathology.* Exposure to extreme altitude. London: Buterworths & Co. Ltd, 1989:304-11.
- Holden JE., Stone CK., Clark CM., et al., *Enhanced cardiac metabolism of plasma glucose in highaltitude native: adaptation against chronic hypoxia.* J Appl Physiol, 1995; 79:222-8.
- Honigman B., Theis MK., McLain J., et al., *Acute mountain sickness in a general tourist population at moderate altitude.* Ann Intern Med, 1993; 118:587-92.
- Houston C., *Incidence of acute mountain sickness: a study of winter visitors to six Colorado ski resorts.* Ann Alpine J., 1985; 27:162-5.
- Hurtado A., (1942) *Chronic mountain sickness.* JAMA 120, 1278-82.
- Hurtado A., (1971) *The influence of high altitude on physiology.* in *High Altitude Physiology* (eds, R. Porter and J. Knight), Ciba Foundation Symposium, Churchill Livingstone, Edinburgh, pp. 3-13.
- Jhonson T., Rock PB., Fulco CS., et al., *Prevention of acute mountain sickness by dexamethasone.* N. Engl J. Med, 1984; 310:683-6.

- Kayser B., Hoppeler H., Claassen H., Cerretilli P., *Muscle structure and performance capacity of himalyan Sherpas*. J. Appl Physiol 1991; 70:1938-42.
- Kayser B., *Acute mountain sickness in Western tourist around the Thorong Pass (5400 m) in Nepal*. J. Wilderness Med, 1991; 2:110-7.
- Kelly PT., Swanney MP., Stanton JD., Framton C., Peters MJ., BECKERT LE., *Resting and exercise response to altitude in patients with chronic obstructive pulmonary disease*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80:102-7.
- Knight DR., Schilchting C., Dougherty JH., Messier AA., Tappan DV., *Effect of hypoxia on psychomotor performance during graded exercise*. Aviat Space Environ Med, 1991; 62:228-32.
- Koller EA., Lesniewska B., Bühner A., et al., *The effects of acute altitude exposure in swiss highlanders and lowlanders*. Eur J Appl Physiol, 1993; 66:146-54.
- Larson EB., Roach RC., Choene RB., Hornbein TF., *Acute mountain sickness and acetazolamide*. JAMA 1982; 248:328-32.
- Leaf DE., Goldbarf DS., *Mechanisms of action of acetazolamida in the prophylaxis and treatment of acute mountain sickness: a review*. J. Appl Physiol, 2007, 102:1313-22.
- Liu LS., Cheng HY., Chin WJ., Jin HK., Oparil HS., *Atrial natriuretic peptide lowers pulmonary arterial pressure in patients with high altitude disease*. Am J Med Sci, 1989; 298:397-401.
- Mathew L., Gophinathan PM., Purkayastha SS., Sen Gupta J., *Chemoreceptor sensitivity and maladaptation to high altitude in man*. Eur J Appl Physiol, 1983; 51:137-44.
- Menon N., *High altitude pulmonary edema*. N. Engl J. Med 1965; 273:66-73.
- Milledge JS., *Acute mountain sickness*. Thorax, 1983; 38:6441-5.
- Monge C., Lozano R., Marchena G., et al., *Kidney function in high altitude natives*. Fed Proc, 1969; 28:1199 - 203.
- Monge C., C., and Whitembury J. (1976) *Chronic mountain sickness*. Johns Hopkins Med. J. 139, 87-9.
- Monge C. C., Bonavia, D., Leon-Velard, F., and Arregui A., (1990) *High Altitude populations in Nepal and the Andes, in Hypoxia: the adaptations* (eds. J. R. Sutton, G. Coates and J. E. Remmers), Decker, Toronto, pp. 53-8.
- Monge M. C., (1925) *Sobre el primer caso de policitemia encontrado en el Perú*. Bull. Acad. Med., Lima.
- Monge M. C., (1948) *Acclimatization and the Andes: Historical Confirmations of 'Climatic Agresion' in the Development of Andean Man*, Johns Hopkins University Press Baltimore, M D.
- Montgomery AB., Mills J., Luce JM., *Incidence of acute mountain sickness at intermediate altitude*. JAMA, 1989; 261:732-4.
- Peñaloza D., Arias-Stella J., Sime F., Recavarren S. and Marticorena E. (1964) *The heart and pulmonary circulation in children at high altitudes: physiological, anatomical, and clinical observations*. Pediatrics 34,568-82.
- Peñaloza D., (1971) *Discussion, in High Altitude Physiology: Cardiac and Respiratory Aspects* (eds. R. Porter and J. Knight), Churchill Livingstone, Edinburgh, p. 169.
- Peñaloza D., and Echevarria M., (1957) *Electro cardiographic observations on ten subjects at sea level and during one year of residence at high altitudes*. Am. Heart J. 54, 811-22.
- Peñaloza D., and Sime F., (1969) *Circulatory dynamics during high altitude pulmonary edema*. Am. J. Cardiol 23, 369-78.

- Peñaloza D., Sime F., Banchero N., et al., (1963) *Pulmonary Hypertension in healthy men born and living at altitudes*. Am. J. Cardiol. 11, 150-7.
- Pugh L. G. C. E. (1955a) *Acute pulmonary oedema and mountaineering*. Practitioner 174, 108-9.
- Pugh L. G. C. E. (1964c) *Animals in high altitudes: man above 5000m mountain exploration, in Handbook of Physiology, Adaptation to the Environment, section 4* (eds. D. b. Dill E. F. Adolph and C. C. Wilber), Washington, DC, pp. 861-8.
- Pugh L. G. C. E. (1964a) *Man at high altitude*. Scientific Basis of Medicine, Annual Review 32-54.
- Ramirez G., Bittle PA., Rosen R., Rabb H., Pineda D., *High altitude living: genetic and environmental adaptation*. Aviat Space Environ Med, 1999; 70:73-81.
- Reeves JT., Groves BM., Sutton JR., et al., *Operation Everest II: preservation of cardiac function at extreme altitude*. J Appl Physiol, 1987; 63:531-69.
- Regard M., Landis T., Casey J., et al., *Cognitive changes at high altitude in healthy climbers and in climbers developing acute mountain sickness*. Aviat Space Environ Med, 1991; 62:291-5.
- Rennie D., Bezruchka S., Roberts G., Ivy JL., Hultgreen HN., *Water intake at high altitude*. J Wilderness Med 1993; 4:224-7.
- Richalet JP., Souberbielle JC., Antezana AM., et al., *Control of erythropoiesis in humans during prolonged exposure to high altitude at 6 542m*. Am J Physiol, 1994; 266: R 756-64.
- Ried LD., Carter KA., Ellsworth A., *Acetazolamide or dexamethasone for prevention of acute mountain sickness: a meta-analysis*. J. Wilderness Med, 1994; 5:34-48.
- Roach RC., Hackett PH., *Frontiers of hypoxia research: acute mountain sickness*. J. Exp Biol, 2001; 204:3161- 70.
- Roach RC., Maes DP., Sandoval DA., et al., *Exercise exacerbates acute mountain sickness at simulated high altitude*. J. Appl. Physiol, 2000; 88:581-5.
- Rock PB., Jhonson TS., Larsen RF., et al. *Dexamethasone as prophylaxis for acute mountain sickness*. Chest 1989; 95:568-73.
- Rodway GW., *George Ingle Finch and the Mount Everest expedition of 1922: breaking the 8000-m barrier*. High Alt Med Biol, 2007; 8(1):68-76.
- Rosser BW., Hochachka PW., *Metabolic capacity of muscle fibers from high altitude natives*. Eur J Appl Physiol, 1993; 67:513-7.
- Ruiz L., Peñaloza D., *Altitude and hypertension*. Mayo Clin Proc 1977; 52:442-5.
- Sampson JB., Cymerman A., Burse RL., et al., *Procedures for the measurement of acute mountain sickness*. Aviat Space Environ Med 1983; 54:1063-73.
- Sanchez C., Merino C., Figallo M., *Simultaneous measurement of plasma volume and red cell mass in polycythemia of high altitude*. J. Appl Physiol 1978; 28:775-8.
- Savourey G., Garcia N., Besnard Y., Guinet A., Hanniquet AM., Bittel J. *Pre-adaptation, adaptation and de-adaptation to high altitude: cardioventilatory and haematological changes*. Eur J. Appl Physiol 1996; 73:529-535.
- Severinghaus JW., Bainton CR., Garcelen A., *Respiratory insensitivity to hypoxia in chronically hypoxic man*. Respir Physiol, 1966; 1:308-34.
- Shukitt-Hale B., Banderet L., Lieberman HR., *Relationships between symptoms, moods, performance, and acute mountain sickness at 4,700 meters*. Aviat Space Environ Med, 1991; 62:865-9.

- Singh MB., Khanna MD., Srivastava, MD., *Acute mountain sickness*. N. Engl. J. Med, 1969; 23:175-84.
- Sutton JR., Bryan AC., Gray GW., et al., *Pulmonary gas exchange in acute mountain sickness*. Aviat Space Environ Med, 1976; 47:1032-7.
- Swenson ER., *Renal function and fluid homeostasis*. In: Hornbein TF, Schoene RB, eds. High altitude. An exploration of human adaptation. New York: Marcel Dekker, 2001:525-68.
- Vardy J., Judge K., *Acute mountain sickness and ascent rates in trekkers above 2500 in the Nepali Himalaya*. Aviat Space Environ Med, 2006; 77:742-4.
- Villena M., Spielvogal H., Vargas E., et al., *Anthropometry and lung function of 10 to 12 year old Bolivian boys*. Int J. Sports Med, 1994; 15 (suppl 2):575-8.
- Vock P., Fretz C., Francioli M., Bartsch P., *High altitude pulmonary edema: findings at high altitude chest radiography and physical examination*. Radiology, 1989; 170:661-6.
- West JB., *Barometric pressures on Mount Everest: new data and physiological significance*. J. Appl Physiol, 1999; 86:1062-6.
- West JB., Colice GL., YJ., et al., *Pathogenesis of high-altitude pulmonary edema: direct evidence of stress failure of pulmonary capillaries*. Eur Resp J., 1995; 8:523-529.
- West JB., *High life—A history of high altitude physiologic and medicine*. Oxford: Oxford University Press; 1998.
- West JB., *Highest inhabitants in the world*. Nature (London) 1984; 324:517.
- West JB., *Oxygen enrichment of room air to relieve the hypoxia of high altitude*. Respir Physiol, 1995; 99:225-32.
- West, JB., (1982a) *American Medical Research Expedition to Everest*, 1981. Physiologist, 25, 36-8.
- West JB., (1983) *Climbing Mt. Everest without oxygen: analysis of maximal exercise during extreme hypoxia*. Respir. Physiol, 52, 265-79.
- West JB., (1986a) *Highest inhabitants in the world*. Nature, 324, 517.
- West JB., and Mathieu-Costello O. (1992a) *High altitude pulmonary edemas caused by stress failure of pulmonary capillaries*. Intl J. Sports Med, 13 (Suppl.1), S54-8.
- West J.B., Colice G. L., Lee, Y. J., et al., (1995) *Pathogenesis of high – altitude pulmonary edema: direct evidence of stress failure of pulmonary capillaries*. Eur Respir. J. 8, 523-9.
- Windsor JS., Mcmorrow RC., Rodway GW., *Oxygen on Everest: the development of modern open-circuit systems for mountaineers*. Aviat Space Environ Med, 2008; 79:799-804.
- Windsor JS., Rodway GW., *Supplemental oxygen and sleep at altitude*. High Alt Med Biol, 2006; 7:307-11.
- Winslow RM., Champam KW., Gibson CC., et al., *Defferent hematologic responses to hypoxia in Sherpas and Quechua Indians*. J. Appl Physiol, 1989; 66:1561-9.
- Winslow RM., Monge CC., *Hypoxia, Polycytemia and chronic mountain sickness*. Baltimore MD: John Hopkins Univ. Press, 1987.
- Zell SC., Goodman PH., *Acetazolamide and dexamethasone in the prevention of acute mountain sickness*. West J. Med, 1988; 148:541-5.

Capítulo 4



Cambios de presión barométrica (enfermedad descompresiva)

En la actividad aeroespacial participa otro agente físico importantísimo: los cambios de presión barométrica, que producen modificaciones del volumen de los gases contenidos en los senos paranasales, en las vísceras huecas y en los gases disueltos en los líquidos orgánicos. El aparato cardiovascular puede ser afectado cuando se presentan cambios importantes de presión barométrica (pB) en el ámbito de la actividad aeroespacial y submarina.

Se denomina enfermedad descompresiva (ED) a un síndrome clínico caracterizado por la presencia de burbujas de los gases normalmente disueltos en los líquidos del cuerpo (nitrógeno, oxígeno, bióxido de carbono), formadas a consecuencia de una disminución rápida e importante de la pB, que produce embolias gaseosas y otros daños en diferentes partes del cuerpo.

Etiología

La formación de burbujas a partir de los gases disueltos en la sangre y en el líquido intersticial puede ocurrir en las siguientes eventualidades: a) si una nave no presurizada se eleva rápidamente a una altitud más allá de los 5500 m sobre el nivel del mar; b) cuando accidentalmente se pierde la presión de la cabina de un avión de pasajeros; c) si un proyectil perfora en pleno vuelo la cabina de un avión de combate; d) cuando por razones de entrenamiento o de investigación, en la cámara de altitud, se produce una disminución de la pB equivalente a una altura de 5500 m o más; e) si se ha buceado a una profundidad mayor de 10 m y en el transcurso de las 24 horas siguientes se viaja en avión o se eleva en la montaña; f) si se bucea a grandes profundidades y se emerge rápidamente sin hacer las escalas recomendadas; g) cuando los astronautas incursionan fuera de la nave (cuya pB es de 760 mmHg) protegidos con el traje espacial (cuya presión interior es de 250 mmHg o algo menor); h) por la descompresión de un submarino o de una cámara hiperbárica, etcétera.

Fisiopatología

Para comprender mejor el mecanismo por el cual los gases disueltos en los líquidos orgánicos se dilatan y forman burbujas en el interior de los vasos y en el líquido in-

tersticial, revisaremos tres de las leyes de los gases que participan en mayor o menor grado en este proceso.

La ley de Boyle establece que el volumen de un gas, a temperatura constante, es inversamente proporcional a la presión a la que está sometido. Si tomamos un litro de gas a nivel del mar, lo encerramos en un recipiente elástico y lo elevamos progresivamente en la atmósfera, observaremos lo siguiente: a 5500 m de altura la pB es de 380 mmHg (media atmósfera), el volumen original se duplica; a 8500 m de altitud la pB es de 232 mmHg (un tercio de atmósfera), el volumen original se triplica; a 10 000 m sobre el nivel del mar la pB es de 199 mmHg (un cuarto de atmósfera), el volumen se cuadruplica; a 11 600 m de altura la pB es de 155 mmHg (un quinto de atmósfera), el volumen inicial de un litro se quintuplica, etcétera.

Por el contrario, si al mencionado volumen le aplicamos una presión progresivamente creciente, por ejemplo, sumergiéndolo en el agua (en la que por cada 10 m de profundidad la presión se incrementa una atmósfera), el volumen original de un litro se vuelve de medio litro a los 10 m, de un tercio de litro a los 20 m, de un cuarto de litro a los 30 m de profundidad, etcétera.

Estos hechos tienen capital importancia en la medicina aeroespacial y submarina, sobre todo cuando el organismo humano es expuesto a compresiones y descompresiones de la cabina. En estas condiciones es fácil imaginar que el volumen de los gases contenidos en bulas enfisematosas y neumotórax aumenta o disminuye peligrosamente con los cambios de pB.

La ley de Henry expresa que la cantidad de un gas disuelto en un líquido es proporcional a la presión a la que ese líquido está sometido. El cuerpo humano tiene en su interior disueltos varios gases, particularmente nitrógeno, oxígeno, bióxido de carbono y vapor de agua. Se calcula que al nivel del mar una persona de corpulencia media tiene disuelto en su organismo (especialmente en el tejido adiposo) un litro de nitrógeno. Si ese individuo es colocado en una cámara hiperbárica o es sumergido a cierta profundidad en el agua y continúa respirando aire, la cantidad de moléculas de nitrógeno en su interior aumenta proporcionalmente a la presión a la que se le someta.

La ley de difusión de los gases señala que las moléculas de un gas tienden a moverse de los sitios de mayor presión a los de menor concentración, con lo que se logra, en forma natural, una distribución uniforme de las moléculas de los gases, sea que se encuentren en una mezcla gaseosa o disueltos en un líquido. Esta ley se pone en juego cuando sobreviene una descompresión brusca de una nave; el cuerpo humano queda expuesto a un ambiente hipobárico que tiene una concentración menor de moléculas de gas que las que tiene el organismo en su interior; por lo tanto, además de producirse una dilatación de los gases disueltos, se establece de inmediato una corriente de moléculas de gas del sitio de mayor concentración (el cuerpo humano) al de menor concentración (el medio ambiente). Esto es precisamente lo que

ocasiona la formación de burbujas compuestas de una mezcla de gases (oxígeno, nitrógeno, bióxido de carbono y vapor de agua) dentro del organismo, las que a través de la circulación tratan de encontrar salida por el pulmón, y al no lograrlo de inmediato, quedan atrapadas en el cuerpo dando origen a embolias gaseosas y a otros problemas que configuran el cuadro de la ED.

Es clásico el ejemplo de un refresco gaseoso que se destapa; el gas carbónico disuelto en el líquido tiene una presión parcial mayor que en el exterior, de manera que al destapar la botella el gas se dilata, forma burbujas, fluye al exterior y termina por abandonar totalmente el líquido donde está disuelto.

Lo mismo ocurre con los gases disueltos en el cuerpo humano cuando éste queda expuesto a una disminución importante y rápida de la presión externa. Es preciso subrayar que la ED sólo se presenta cuando la descompresión de una cabina ocurre por arriba de los 5500 m de altura, a donde la pB es la mitad de la que se tiene al nivel del mar. También conviene precisar que si el ascenso en la atmósfera es lento y progresivo, los gases de los líquidos orgánicos tienen tiempo de abandonar parcialmente el cuerpo y mantener el equilibrio entre la presión interna y externa hasta alturas mayores, siempre y cuando se administre oxígeno suplementario para evitar la hipoxia.

La ED ocurre habitualmente cuando la cabina de una nave aérea, civil o militar, sufre una descompresión a gran altitud; se observa igualmente cuando se realiza entrenamiento e investigación en cámaras hipobáricas (cámaras de altitud). Este proceso también se observa en turistas que han buceado a una profundidad cercana a los 10 m o más y realizan ejercicio físico intenso después de la última inmersión. Por supuesto, los casos más graves de ED se dan en buzos profesionales o deportivos que por razones técnicas o de otra naturaleza emergen rápidamente a la superficie sin hacer las escalas recomendadas.

Conviene tener presente también que una descompresión por arriba de los 7500 m sobre el nivel del mar incrementa notablemente las posibilidades de provocar ED; que este problema puede desarrollarse a altitudes tan bajas como 1500 o 2000 m de altura si se viaja en avión después de haber buceado a nivel del mar y al practicar el buceo en lagos de montaña y continuar ascendiendo en práctica de alpinismo.

Las burbujas que se forman en la sangre venosa son arrastradas hacia la circulación central y, de acuerdo con su tamaño, van a provocar embolias gaseosas en los pulmones. Las burbujas que se forman en la sangre arterial son llevadas a la circulación sistémica ocasionando embolias gaseosas en la red coronaria, en el cerebro, en otras vísceras y en las extremidades. Las burbujas en el líquido intersticial se alojan principalmente debajo de la piel y en tejidos laxos y muy particularmente en las grandes articulaciones.

Las burbujas están constituidas por una mezcla de nitrógeno, oxígeno y bióxido de carbono. La proporción de estos gases es variable en diferentes partes del cuerpo;

en animales de experimentación se ha observado que en la vena yugular, por ejemplo, es de 65% de nitrógeno, 28.3 de bióxido de carbono y 6.7 de oxígeno; en el ventrículo derecho 60.3 de nitrógeno, 28.3 de bióxido de carbono y 11.4 de oxígeno.

Factores predisponentes

- *La altitud alcanzada.* Cuanto mayor es la altitud en la que se produce la descompresión, mayores son las posibilidades de sufrir la ED; por ejemplo, de los casos que ameritan tratamiento en cámara hiperbárica, el 13% sufrieron el problema cuando la descompresión se produjo a los 7500 m sobre el nivel del mar; el 79% cuando la descompresión ocurrió a los 9000 m sobre el nivel del mar o más arriba.
- *Duración de la exposición.* El tiempo que transcurre en el sitio o en el nivel donde se produjo la descompresión influye importantemente en la posibilidad de desarrollar el problema y en la gravedad del mismo. Por ejemplo, si el tiempo es de 1 hora a 5500 m la posibilidad es del 5%, a 7500 m es de 25%; si el tiempo es de 3 h a 5500 m la posibilidad es de 10% y a 7500 m es de 85%.
- *Exposición previa a la altitud.* Si después de una primera exposición a 5500 m se realiza una segunda (en la montaña o en la cámara de altitud) en el transcurso de las siguientes 3 h, la presentación de la ED es muy probable. La exposición diaria o varias veces por semana a la altitud también aumenta la posibilidad para el desarrollo de la ED.
- *Buceo previo al vuelo.* Como ya se ha mencionado, el buceo previo al viaje en avión es un factor probadamente predisponente; se aconseja esperar al menos 24 h después de la última inmersión para viajar en avión.
- *Edad.* Las personas mayores de 45 años tienen tres veces más la posibilidad de desarrollar la ED que los individuos más jóvenes.
- *Temperatura ambiente.* Las temperaturas de menos cero grados son también factor que propicia el desarrollo de la ED.
- *Deshidratación.* Los individuos deshidratados presentan con mayor frecuencia este problema, si se compara con aquellos que ingieren abundante líquido durante las prácticas de alpinismo o durante las investigaciones aeromédicas.

Cuadro clínico

El cuadro clínico de la ED puede ser limitado o muy florido, dependiendo esto de la magnitud o severidad de la descompresión. Las áreas donde se manifiesta con mayor frecuencia son las articulaciones, la piel, el sistema nervioso central, la retina, el pulmón y el sistema cardiovascular.

- *Manifestaciones articulares.* Ésta es una de las molestias más frecuentes; se presenta principalmente en rodillas y hombros, pero también son afectadas las articulaciones de la cadera, del tobillo, del codo y la muñeca; excepcionalmente afecta a las pequeñas articulaciones de las manos y pies. Los pacientes afectados de una descompresión rápida refieren dolor sordo, profundo y poco preciso sobre las articulaciones (54%), en los músculos (26%) y en los huesos (20%). El mecanismo por el cual se produce el dolor se atribuye a distensión mecánica de los tejidos, a presión sobre los vasos y a vasoconstricción con isquemia local. Mediante los estudios de rayos X y ultrasonido es posible observar las burbujas dentro de la cápsula articular y en la periferia de las articulaciones. Las manifestaciones articulares de la ED son conocidas en el idioma inglés como *bends*.
- *Manifestaciones pulmonares.* Se caracterizan por dolor retroesternal opresivo, lacerante y disneizante, tos seca, disnea intensa o sensación de sofocación, dificultad para realizar la fase inspiratoria. Los signos y síntomas respiratorios se atribuyen a la presencia de burbujas en la circulación pulmonar y a la producción de embolias múltiples.
- *Manifestaciones cardiocirculatorias.* La presencia de burbujas puede observarse tanto en la sangre venosa como en la sangre arterial, y por ello las embolias pueden presentarse en diferentes partes del cuerpo: arterias coronarias, mesentéricas, cerebrales y periféricas. El sistema circulatorio es afectado al mismo tiempo que las articulaciones y el pulmón; su expresión clínica es variable pero lo más común es que se presente bradicardia, hipertensión arterial, edema pulmonar, síncope, colapso circulatorio y choque.
- *Manifestaciones neurológicas y oculares.* Las burbujas pueden bloquear diferentes arterias cerebrales, lo que se traduce en lesiones neurológicas de diverso grado: monoplejía, hemiplejía, paraplejía y otras. La arteria central de la retina o alguna de sus ramificaciones puede ser bloqueada por embolias gaseosas; las manifestaciones más frecuentes son visión borrosa, escotomas y, en ocasiones, ceguera total.
- *Manifestaciones cutáneas.* Dos síntomas son los más comunes: sensación de frío o calor y hormigueo; se atribuyen a la formación de pequeñas burbujas en el espesor de la dermis. También se observa enfisema subcutáneo en diferentes partes del cuerpo, principalmente en la cara.

Profilaxis

- a) Evitar el ascenso en la atmósfera en naves aéreas no presurizadas por encima de los 5500 m de altitud.

- b) Si se practica buceo en lagos de montaña, evitar el ascenso posterior, al menos por las siguientes 24 horas.
- c) Si ocurre descompresión de la cabina de avión de pasajeros en vuelo de crucero, descender inmediatamente la nave y al mismo tiempo usar la mascarilla de oxígeno, no sólo para evitar la hipoxia, sino que esto contribuye a disminuir los efectos de la descompresión.
- d) Cuando se bucea a grandes profundidades deben observarse con rigor las indicaciones previstas para el regreso a la superficie.
- e) Realizar ejercicio físico antes de bucear reduce la posibilidad de formación de burbujas en la sangre.
- f) Los turistas que han buceado en una o varias inmersiones a una profundidad cercana o mayor de 10 m no deben viajar en avión en el transcurso de las siguientes 24 horas.
- g) Por último, hay un procedimiento denominado "desnitrogenación", que consiste en respirar oxígeno 100% durante 30 a 60 minutos previos a misiones en aviones de combate, o durante un vuelo espacial inmediatamente antes de realizar una tarea fuera de la astronave. El respirar oxígeno puro durante ese tiempo permite eliminar la mayor parte del nitrógeno acumulado en los tejidos del cuerpo humano. En el caso de una pérdida de la presión en la cabina de los aviones de combate o de los trajes espaciales, la formación de burbujas y el aeroembolismo se abate notablemente si se realizó previamente la "desnitrogenación".

Tratamiento

Una vez reconocido el cuadro de la ED, aunque sea por síntomas o signos leves, debe procederse de la siguiente manera:

- a) Poner el paciente en reposo absoluto, porque los movimientos, las contracciones musculares y el esfuerzo físico favorecen la formación de burbujas, y cuando éstas existen, con el ejercicio se vuelven más grandes.
- b) Aplicar oxígeno 100% en forma continua; el oxígeno administrado de esta manera contribuye a eliminar el nitrógeno del cuerpo y a eliminar la formación adicional de burbujas.
- c) De inmediato debe procederse a transportar el enfermo al lugar más próximo que cuente con cámara hiperbárica. Si el traslado se hace en avión o en helicóptero, en ningún momento la nave debe elevarse más de 300 m sobre el nivel del lugar dónde se recogió al paciente; si el vehículo es una ambulancia terrestre, en su trayecto debe evitar cruzar sobre colinas elevadas.
- d) El tratamiento en la cámara hiperbárica debe hacerse con oxígeno 100% y a tres atmósferas de presión; con ello se reduce el tamaño de las burbujas e

incluso desaparecen, se favorece la eliminación de nitrógeno y propicia la oxigenación de las zonas isquémicas.

Referencias

- Balldin UI., Pilmanis AA., Webb JT., *Pulmonary decompression sickness at altitude: early symptoms and circulating gas emboli*. Aviat Space Environ Med, 2002; 73:996-9.
- Balldin UI., *Venous gas bubbles while flying with cabin altitudes of airlines or general aviation aircraft 3 hours after diving*. Aviat Space Environ Med, 1980; 51:649-52.
- Basset BR., *Decompression procedures for flying after diving, and diving at altitude above sea level*. Brooks Air Force Base TX: USAF Scholl of Aerospace Medicine, 1982; USAF Report SAM-TR-82-47.
- Bassett BE., *Decompression procedures for flying after diving and diving at altitudes above sea level: validation tests*. Brooks AFB, TX: USAF School of Aerospace Medicine, 1982; Report SAM-TR-82-47.
- Bendrick GA., Ainscough MJ., Pilmanis AA., Bisson RU., *Prevalence of decompression sickness among U-2 pilots*. Aviat Space Environ Med, 1996; 67:199-206.
- Blatteau JE., Gemppe E., Galland FM., Pontier JM., Sainty JM., Robinet C., *Aerobic exercise 2 hours before a dive to 30 msw decreases bubble formation after decompression*. Aviat Space Environ Med, 2005; 6:666-9.
- Brandt MS., Morrison TO., Butler WP., *Decompression sickness rates for chamber personnel: case series from one facility*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80:570-3.
- Bühlmann AA., *Diving at altitude and flying after diving*. In: Vann RD, ed. *The physiological basis of decompression*. Bethesda, MD: Undersea and Hyperbaric Medical Society, 1989: 411-23.
- Butler BD., Vann RD., Nishi RY., et al., *Human trials of a 2-hour prebreathe protocol for extravehicular activity*. [Abstract # 44.] Aviat Space Environ Med, 2000; 71:50.
- Butler WP., Topper SM., Dart TS., *Clinical Medicine: USAF Treatment Table 8: Treatment for altitude decompression sickness*. Aviat Space Environ Med, 2002; 73:46-9.
- Butler WP., *Epidemic decompression sickness: case report, literature review and clinical commentary*. Aviat Space Environ Med, 2002; 73:798-804.
- Carturan D., Boussuges A., Vanuxem P., Bar-Hen A., Burnet H., Gardette B., *Acent rate, age maximal oxygen uptake, adiposity, and circulating venous bubbles after diving*. J. Appl Physiol 2002; 93:1349-56.
- Cianci P., Slade JR., *Delayed treatment of decompression sickness with short, no-air-break tables: review of 140 cases*. Aviat Space Environ Med, 2006; 77:1003-8.
- Conkin J., Powell MR., Gernhardt ML., *Age effects severity of venous gas emboli on decompression from 14.7 to 4.3 psi*. Aviat Space Environ Med, 2003; 74:1142-50.
- Dart TS., Butler WP., *Towards new paradigms for the treatment of hypobaric decompression sickness*. Aviat Space Environ Med, 1998; 69:403-9.
- Davis JC., Sheffield PJ., Schuknecht L., et al., *Altitude decompression sickness: hyperbaric therapy results in 145 cases*. Aviat Space Environ Med, 1977; 48:722-30.

- Devay JP., Powell MR., Butler B., Fife CE., *The effect of exercise and rest duration on the generation of venous gas bubbles at altitude*. Aviat Space Environ Med, 2002; 73:22-7.
- Dick AP., Massey EW., *Neurologic presentation of decompression sickness and air embolism in sport divers*. Neurology 1985;35:667-71.
- Dovernbarger JA., Corson K., Moon RE., Bennett PB., *A review of thirty-three dive accidents with a delay to treatment of four days or greater*. Undersea Hyperb Med, 1990; 17(Suppl.):169.
- Dujic Z., Duplancic D., Marinovic-Terzic I., et al., *Aerobic exercise before diving reduces venous gas bubble formation in humans*. J. Physiol (Lond) 2004; 555:637-42.
- Gibbons J., Ramsey CS., Wright JK., Pilmanis AA., *Serious altitude decompression sickness following rapid rate of ascent*. Aviat Space Environ Med, 2003; 74:675-9.
- Gray CG., *A retrospective evaluation of oxygen recompression procedures within the U.S. Navy*. In: Eighth Symposium on Underwater Physiology. Bethesda, MD: Undersea and Hyperbaric Medical Society; 1984.
- Green JW., Tichenor J., Curley MD., *Treatment of type I decompression sickness using U. S. Navy treatment algorithm*. Undersea Biomed Res, 1989; 465-70.
- Gronning M., Risberg J., Skeidsvoll H., et al., *Electroencephalography and magnetic resonance imaging in neurological decompression sickness*. Undersea Hyperb Med, 2005; 32:397-402.
- Hart GB., Strauss MB., Lennon PA., *The treatment of decompression sickness and air embolism in a monoplace chamber*. J. Hyperbar Med, 1986; 1:1-7.
- Klingmann C., Gonnermann A., Dreyhaupt J., Vent J., Preatorius M., Plinkert P., *Decompression illness reported in a survey of 429 recreational divers*. Aviat Space Environ Med, 2008; 79:123-8.
- Krause KM., Pilmanis AA., *The effectiveness of ground level oxygen treatment for altitude decompression sickness in human research subjects*. Aviat Space Environ Med, 2000; 71:115-8.
- Krause KM., Pilmanis AA., *The effectiveness of ground level oxygen treatment for altitude decompression sickness in human research subjects*. Aviat Space Environ Med, 2000; 71:115-8.
- Kumar KV., Waligora JM., *The effects of different rates of ascent on the incidence of altitude decompression sickness*. Houston, TX:NASA 1989. TM 100472.
- Mitchell S., *Severity scoring in decompression illness*. SPUMS J 2005; 35:199-205.
- Mitchell S., Doolette D., Wachholz C., Vann R., eds., *Management of mild or marginal decompression illness in remote locations: workshop proceedings*. Durham, NC: Divers Alert Network; 2005.
- Neuman TS., Bove AA., *Combined arterial gas embolism and decompression sickness following no-stop dives*. Undersea Biomed Res, 1990; 17:429-36.
- Pickard BJ., *Altitude decompression sickness in a pilot wearing a pressure suit above 70 000 feet*. Aviat Space Environ Med 2003; 74:357-9.
- Pilmanis AA., Olson RM., Fischer MD., et al., *Exercise-induced altitude decompression sickness*. Aviat Space Environ Med 1999; 70:22-9.
- Pilmanis AA., Webb JT., Kannan N., Balldin U., *The effect of repeated altitude exposures on the incidence of decompression sickness*. Aviat Space Environ Med, 2002; 73:525-31.

- Pilmanis AA., Webb JT., Kannan N., Balldin UI., *The risk of altitude decompression sickness at 12 000 m and the effect of ascent rate.* Aviat Space Environ Med, 2003; 74:1052-7.
- Pontier J-M., Guerrero F., Castagna O., *Bubble formation and endothelial function before and after 3 months of dive training.* Aviat Space Environ Med 2009; 80:15-9.
- Pontier J-M., Jimenez C., Bateau J-E., *Blood platelet count and bubble formation after a dive to 30 msw for 30 min.* Aviat Space Environ Med. 2008; 79:1096-9.
- Powell MR., *Doppler indices of gas phase formation in hypobaric environments: time-intensity analysis.* Houston, TX: NASA, 1991; Technical Memorandum #102176.
- Powell MR., Waligora J., Norfleet W., Kumar KV., *Project ARGO-Gas phase formation in simulated microgravity.* Houston, TX: NASA, 1993; 87; Tech Memorandum #104762.
- Rice GM., Vacchiano CA., Moore JL., Jr., Anderson DW., *Incidence of decompression sickness in hypoxia training with and without 30 min O2 prebreathe.* Aviat Space Environ Med 2003; 74(1):56-61.
- Rudge FW., *The role of ground level oxygen in the treatment of altitude chamber decompression sickness.* Aviat Space Environ Med, 1992; 63:1102-5.
- Ryles MT., Pilmanis AA., *The initial signs and symptoms of altitude decompression sickness.* Aviat Space Environ Med, 1996; 67:983-9.
- Saary MJ., Gray GW., *A review of the relationship between patent foramen ovale and type II decompression sickness.* Aviat Space Environ Med, 2001; 72:1113-20.
- Tomashefski JF., Feeley DR., Shillito FH., *Effects of altitude on emphysematous blebs and bullae.* Aerospace Med 1966; 37 (11):1158-62.
- Van Liew HD., Flynn ET., *Decompression tables and dive-outcome data: graphical analysis.* Undersea Hyperb Med 2005; 32:409-19.
- Van Hulst RA., *Analysis of ten years diving causalities.* Diving Medical Centre, The Netherlands. Undersea Biomed Res 1990; 17(Suppl.):144.
- Vann RD., Denoble PJ., Howle PW., Freiburger JJ., Pieper CF., *Resolution and severity in decompression illness.* Aviat Space Environ Med, 2009; 80:466-71.
- Vann RD., Moon RE., Freiburger JJ., Denoble PJ., Dear GL., Stolp BW., Massey EW., *Decompression illness diagnosis and decompression study design.* Aviat Space Environ Med, 2008; 79:797-8.
- Vann RD., *Flying after diving: a database.* In: Sheffield PJ., ed. flying after diving. Proceeding of the 39th Undersea and Hyperbaric Medical Society Workshop. Bethesda, MD: UHMS; 1989: 179-222.
- Webb JT., Kannan N., Pilmanis AA., *Gender not a factor for altitude decompression sickness risk.* Aviat Space Environ Med, 2003; 74:3-10.
- Webb JT., Krause KM., Pilmanis AA., et al., *The effect of exposure to 35 000 ft on incidence of altitude decompression sickness.* Aviat Space Environ Med, 2001; 72:509-12.
- Weien RW., Baumgarther N., *Altitude decompression sickness: hyperbaric therapy results in 528 cases.* Aviat Space Environ Med, 1990; 61:833-6.
- Wirjosemito SA., Touhey JE., Workman WT., *Type II altitude decompression sickness (dcs): us Air Force experience with 133 cases.* Aviat Space Environ Med, 1989; 60:256-62.
- Wisloff U., Richardson RS., Brubakk AO., *Exercise and nitric oxide prevent bubble formation: a novel approach to the prevention of decompression sickness!* J Physiol 2004; 555:825-9.

Capítulo 5



Cambios de velocidad. Efectos de la aceleración sobre el sistema cardiovascular

El factor aceleración interviene frecuentemente en la actividad aeronáutica y espacial. El funcionamiento cardíaco, la circulación y la respiración son las áreas de la fisiología humana que con mayor frecuencia e intensidad son afectadas por la aceleración en sus diferentes modalidades.

La aceleración tiene efectos menores o imperceptibles en las actividades normales de la aviación civil o comercial; en cambio, en la operación de las aeronaves de combate o acrobáticas, las aceleraciones llegan a ser muy intensas; lo mismo puede decirse de las naves espaciales en la fase de incremento de la velocidad para entrar en órbita terrestre o en la fase de desaceleración al reingresar a la atmósfera; también en la centrífuga humana que se utiliza para el entrenamiento y la investigación se experimentan los diferentes niveles y modalidades de la aceleración.

Antes de describir el comportamiento del corazón y la circulación por efecto del factor que nos ocupa, revisaremos brevemente algunos conceptos fundamentales en torno a la aceleración.

La velocidad se define como la distancia recorrida en la unidad de tiempo; generalmente se expresa en metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h). Hay tres tipos de velocidad en aeronáutica: subsónica, es inferior a la velocidad del sonido;¹ es la velocidad con la que se desplaza la mayor parte de las aeronaves de la aviación comercial, es decir, inferior a un Mach.² Supersónica, es la velocidad comprendida entre 1 y 5 Mach; en este rango se desplazan los aviones supersónicos de combate y el Concord. Hipersónica, va de 5 a 20 Mach; en estos límites vuelan aviones experimentales y los cohetes impulsores de las astronaves.

Las naves espaciales se desplazan en tres niveles de velocidad: primera velocidad cósmica, la necesaria para que una nave espacial se mantenga en órbita terrestre, su valor es de 28 000 km/h; segunda velocidad cósmica, la que necesita desarrollar un vehículo espacial para salir del campo gravitacional de la Tierra,

¹ En el aire la velocidad del sonido es de 340 m/s al nivel del mar; a medida que se asciende en la atmósfera la velocidad del sonido disminuye.

² Un Mach es igual a la velocidad del sonido en el aire; se llama así en honor del físico austriaco Ernst Mach quién realizó las primeras experiencias para determinar la velocidad del sonido en el aire.

es de 40 000 km/h; tercera velocidad cósmica, la que requiere una nave espacial, partiendo de la Tierra, para salir del Sistema Solar, es de aproximadamente 152 000 km/h. Las naves aéreas y espaciales, para adquirir esas velocidades, son sometidas a un proceso de aceleración, y para regresar a la Tierra, un proceso de desaceleración.

La aceleración se define como un cambio de velocidad, de dirección o de ambas a la vez. Se habla de aceleración positiva cuando hay un incremento de la velocidad; aceleración negativa o desaceleración cuando disminuye la velocidad. El despegue y aterrizaje de un avión representan el ejemplo más común de aceleración positiva y negativa, respectivamente.

Con fines prácticos la medicina aeroespacial reconoce tres tipos de aceleración: lineal, cuando la nave se desplaza en trayectoria rectilínea, el ejemplo sigue siendo un avión que despegue y que aterrice sobre la pista de un aeropuerto; radial, cuando un objeto o una nave gira alrededor de un punto o de un eje, por ejemplo, la góndola de una centrífuga humana que gira alrededor de un eje, o un avión de combate que vuela alrededor de un objetivo; angular, cuando un objeto o una nave gira sobre un eje que pasa a través de él o muy cerca; en este caso es común que haya cambio de dirección y de velocidad a la vez; por ejemplo, un avión que cruza una turbulencia o que cae en barrena.

De mayor interés clínico es la clasificación que se hace de acuerdo con la dirección en que el vector de la aceleración actúa sobre el cuerpo humano. Se reconocen tres variedades:

- *Aceleración X.* Cuando el vector de la aceleración actúa perpendicular al eje longitudinal del cuerpo; si es de adelante hacia atrás (durante el despegue de un avión) es positiva y se representa así: $+G_x$; si es de atrás hacia adelante (cuando un avión aterriza y se aplica el sistema de frenos) es negativa y se escribe así: $-G_x$.
- *Aceleración Y.* Cuando el vector de la aceleración actúa perpendicular al eje longitudinal del cuerpo, de derecha a izquierda o de izquierda a derecha; en la actividad aeroespacial casi nunca se experimenta este tipo de aceleración, pero se percibe claramente cuando un automóvil recorre una curva muy cerrada a la derecha y entonces es positiva ($+G_y$); si el recorrido de la curva es hacia la izquierda, el vector actúa de izquierda a derecha y se denomina negativa ($-G_y$).
- *Aceleración Z.* Se da cuando el vector de la aceleración actúa en el eje longitudinal del cuerpo; si es de la cabeza a los pies se denomina positiva, se observa cuando un avión de combate o acrobático describe una *loop* con la cabina hacia el centro, o bien, cuando los trasbordadores de la NASA descienden planeando a gran velocidad y los tripulantes permanecen sentados;

se representa así: $+G_z$. Si el vector de la aceleración actúa en el eje longitudinal del cuerpo, de los pies a la cabeza, como ocurre cuando un avión de combate o acrobático describe una *loop* con la cabina hacia el exterior, entonces se denomina negativa y se escribe de la siguiente manera: $-G_z$.

- *Aceleración de la gravedad.* Un cuerpo que cae libremente sobre la superficie terrestre sufre una aceleración constante de 9.8 m/s cada segundo; la aceleración de la gravedad se expresa con la letra G. Teóricamente todos los objetos, cualquiera que sea su peso, sufren la misma aceleración en caída libre, igual una pluma de ave que un martillo; pero en realidad sobre la superficie de la Tierra no ocurre así, debido a que la masa de aire que rodea al planeta retrasa la caída de la pluma con respecto a la del martillo. Sin embargo, en la superficie lunar, donde no existe atmósfera, un tripulante del Apolo 14 soltó en caída libre, al mismo tiempo, una pluma de halcón y un martillo; los dos objetos cayeron al mismo tiempo en la superficie de la Luna, debido a que ahí no existe aire.

En los párrafos siguientes vamos a hacer una breve descripción de los efectos de la aceleración que con mayor frecuencia se experimentan en las actividades aeronáuticas y espaciales; básicamente nos referimos a la aceleración X positiva ($+G_x$) y con mayor amplitud a la aceleración Z positiva ($+G_z$) y Z negativa ($-G_z$), porque es ahí donde se concentra la mayor parte de la investigación clínica relacionada con los efectos que las grandes velocidades imponen al cuerpo humano. En el capítulo 8 haremos una revisión de los cambios que la fuerza de gravedad terrestre produce en la fisiología cardiovascular.

Efectos de la aceleración $+G_x$ sobre el sistema cardiopulmonar

Este tipo de aceleración se experimenta frecuentemente en las siguientes circunstancias:

- a) En el despegue de naves supersónicas de combate.
- b) En la fase de aceleración de los vehículos espaciales para entrar en órbita terrestre.
- c) En el reingreso a la atmósfera en caída libre de las naves espaciales tripuladas (excepto el trasbordador de la NASA en el que el respaldo de los asientos está orientado verticalmente).
- d) En la centrífuga humana cuando la cara anterior del tórax está orientada hacia el eje de rotación.

Tomaremos como ejemplo lo que ocurre durante la aceleración de un vehículo espacial que va a ser colocado en órbita terrestre. Los astronautas deben estar sentados de tal manera que el eje del tronco quede perpendicular a la trayectoria que seguirá el vehículo; de esta manera el vector de aceleración se recibe de adelante hacia atrás. Esta es la posición en que se toleran mejor las aceleraciones y desaceleraciones de gran magnitud. Por ejemplo, las naves del proyecto Géminis, para alcanzar la velocidad orbital de 28 000 km/h, impusieron a los astronautas el efecto de +7 Gx en dos picos sucesivos de aceleración, y al regreso en caída libre una desaceleración de +8 Gx. Durante los vuelos a la Luna el cohete Saturno 5, para entrar en órbita terrestre, desarrolló una aceleración máxima de 4.5 +Gx; las naves Apolo al regreso de la Luna entraban a la atmósfera terrestre en caída libre a una velocidad de 40 000 km/h, desarrollando fuerzas de desaceleración de 6 a 7 +Gx. En la centrifuga humana, con fines experimentales, los pilotos y astronautas a veces son expuestos por lapsos breves hasta a 12 +Gx.

Para tener una idea del estrés físico que la aceleración impone al cuerpo humano, debemos recordar que la atracción gravitacional terrestre determina nuestro peso corporal; un individuo de 70 kg sometido a tres fuerzas G pesa 210 kg... y a 8 fuerzas G (como fue el caso de las naves Géminis y sigue siendo en las naves Soyuz, de Rusia) el peso de un astronauta se vuelve de 560 kg. La hemodinámica humana, cualquiera que sea la postura que adopte el astronauta con respecto al vector de la aceleración, sufre cambios muy importantes, pero son mejor tolerados cuando el vector incide perpendicularmente sobre los grandes vasos sanguíneos.

El ser humano tolera satisfactoriamente hasta 4 o +5 Gx, pero a partir de las +6 Gx empieza el compromiso hemodinámico y respiratorio. Entre las 6 y +8 Gx se experimentan los siguientes cambios:

- a) Debido a la compresión del tórax y el abdomen, el diafragma es desplazado hacia arriba.
- b) Los pulmones se congestionan en la porción dorsal, debido al desplazamiento de la sangre hacia las regiones posteriores del pulmón.
- c) Hay oligohemia en las porciones ventrales del pulmón, la circulación casi desaparece en esas regiones.
- d) El corazón es rechazado hacia atrás y comprimido sobre la columna vertebral, lo que ocasiona frecuentemente trastornos del ritmo del tipo de las extrasístoles auriculares y ventriculares.
- e) Hay desaturación de la sangre arterial, debido a que la perfusión sanguínea en las porciones ventrales del pulmón es deficiente.
- f) Se registran aumentos considerables de la presión arterial pulmonar y de la presión venosa y apertura de *shunts* arteriovenosos en las regiones dorsales.

- g) En estas circunstancias se observa también disminución del gasto cardiaco.
- h) Después de episodios de aceleración de esta magnitud pueden observarse signos de atelectasias y zonas de enfisema mediastinal.

Efectos de la aceleración +Gz

Las fuerzas que actúan en el eje longitudinal del cuerpo, de la cabeza a los pies, tienen marcados efectos sobre la circulación, el corazón y la respiración. La sangre tiende a acumularse en las porciones bajas del cuerpo, la presión hidrostática en las columnas sanguíneas abdominales y de miembros inferiores se eleva importantemente, el retorno venoso disminuye, la presión arterial y la perfusión sanguínea cerebral descienden significativamente, los movimientos respiratorios se dificultan, el intercambio gaseoso se deteriora, la retina es particularmente sensible a la isquemia y a la hipoxia, de ahí que los primeros síntomas se manifiestan en la visión.

Las variables cardiovasculares que con mayor intensidad se afectan por la aceleración +Gz son las siguientes:

- *Frecuencia cardiaca.* La frecuencia cardiaca se eleva importantemente durante la aceleración +Gz, su incremento es proporcional al grado de aceleración que experimenta el sujeto; puede elevarse hasta 200 latidos por minuto, pero éste es el límite máximo permisible en las prácticas de centrífuga humana o en maniobras de combate y de acrobacia. El aumento de la frecuencia cardiaca es una repuesta a la baja de la presión arterial y la disminución del flujo sanguíneo a nivel de los barorreceptores en los senos carotídeos.
- *Gasto cardiaco.* El gasto cardiaco es el producto del volumen por latido y la frecuencia cardiaca y está en función del retorno venoso; durante la aceleración +Gz el retorno venoso está disminuido, porque se incrementa la presión hidrostática en las columnas venosas, lo que dificulta la progresión de la sangre hacia las cavidades derechas; disminuye el volumen por latido y el gasto cardiaco.
- *Circulación coronaria.* La circulación coronaria durante la aceleración +Gz de grado moderado (de 3 a +5 Gz) permanece sin alteraciones apreciables; pero arriba de estos niveles puede disminuir de un 25 a un 50%.
- *Circulación en la cabeza y el cuello.* Se registra una disminución de flujo sanguíneo y de la presión arterial proporcional a la intensidad de la aceleración, pero hasta las +3 Gz estos cambios en general son bien tolerados; más allá de estos límites y a medida que se incrementa la aceleración, se presentan sucesivamente los siguientes hechos: primero se experimenta una disminu-

ción de la visión periférica, luego la visión se vuelve borrosa, es el denominado *grayout* (síncope gris); luego se pierde totalmente la visión, es lo que se conoce como *blackout* (síncope negro); cuando la aceleración alcanza las 7 u +8 Gz entonces generalmente se presenta la pérdida del conocimiento (síncope verdadero). La disminución progresiva de la circulación cerebral se observa nítidamente en las arterias retinianas, las cuales a medida que se incrementa la aceleración van perdiendo su coloración y su calibre.

- *Circulación en la parte inferior del cuerpo.* Se produce una gran distensión del sistema vascular, un importante incremento de la presión intravascular y acumulación de sangre en esas regiones, lo que se manifiesta por sensación de congestión en miembros inferiores, calambres y a veces Petequias por ruptura de pequeños vasos.
- *Imagen radiológica del corazón.* La silueta cardiaca desciende importante-mente porque el diafragma se abate por el tirón que ejercen las vísceras abdominales; la densidad radiológica del corazón, la aorta y los vasos sup-raaórticos está disminuida.
- *Cambios electrocardiográficos.* A partir de +3 Gz la onda P se vuelve más ancha, más elevada y de morfología acuminada; el complejo QRS, cualquiera que sea la intensidad de la aceleración, no modifica su amplitud, pero puede tener algunas variaciones porque el eje eléctrico se modifica al haber rotación y desplazamiento del corazón; con frecuencia es difícil valorar el segmento ST porque durante la aceleración se registran numerosos artefactos; su desplazamiento es infrecuente, y cuando lo hay, casi siempre corresponden a cardiopatía isquémica subyacente; en cambio, las alteraciones de la onda T son muy frecuentes y se manifiestan por aplanamiento, difasismo y negatividad de esta onda, pero se normaliza en el transcurso de la aceleración y se vuelve algo más alta y acuminada, permanece así minutos después del término de la aceleración, lo que se ha atribuido a hiperkalemia que acompaña a estos episodios. La aceleración +Gz durante las maniobras de combate aéreo y prácticas de acrobacia provoca multitud de trastornos del ritmo, generalmente benignos; los más comunes y en orden de frecuencia son: extrasistolia ventricular, extrasistolia auricular, bradicardia sinusal, ritmo atrial ectópico, ritmo bigeminado, extrasístoles ventriculares multifocales, disociación auriculoventricular.
- *Función pulmonar.* La fisiología respiratoria sufre cambios muy importantes durante la aceleración +Gz; la ventilación en los vértices está aumentada y los alvéolos se dilatan considerablemente, pero la perfusión sanguínea está disminuida y en ciertos momentos abolida; en las bases la ventilación está muy restringida porque los alvéolos se colapsan, pero la perfusión está muy aumentada; sólo en las regiones medias del pulmón la ventilación y la perfu-

sión están equilibradas y la función respiratoria en esos segmentos es satisfactoria. Como consecuencia de lo que ocurre en los vértices y las bases se produce desaturación de la sangre arterial en razón directa de la intensidad de la aceleración; en cambio, el bióxido de carbono no experimenta cambios de importancia en este proceso. Hemos dicho anteriormente que el diafragma es desplazado hacia abajo por el incremento de peso de las vísceras abdominales, esto dificulta los movimientos respiratorios, especialmente la espiración. En los niveles importantes de la aceleración +Gz es frecuente encontrar atelectasias en las bases pulmonares.

- *Alteraciones hormonales.* La elevación importante de la adrenalina, noradrenalina y cortisol es la regla durante la aceleración +Gz; se atribuye principalmente al estrés emocional y físico que acompaña a las maniobras de combate aéreo, de ejecuciones acrobáticas y de investigaciones en la centrífuga humana.
- *Efectos sobre el sistema nervioso central.* Entre las 8 y +9 Gz los pilotos y astronautas pueden presentar pérdida del conocimiento, a veces acompañada de convulsiones; se debe a la disminución crítica del flujo sanguíneo en el cerebro; la recuperación es total al cesar la aceleración. El electroencefalograma no presenta alteraciones durante los episodios de inconciencia; tampoco se han reportado lesiones anatómicas permanentes.

Factores predisponentes

Se reconocen algunos factores que propician efectos exagerados de la aceleración +Gz; los más comunes son los siguientes: menor tolerancia individual, temperatura ambiente elevada, deshidratación del sujeto, ingestión de bebidas alcohólicas, control medicamentoso de la hipertensión arterial, hipoglucemia, mayor edad y la mujer en general tolera menos la +Gz.

Protección contra la +Gz

Desde la Segunda Guerra Mundial se usa en las fuerzas armadas de los diferentes países el traje anti-G, el cual ofrece una mayor tolerancia a los pilotos de naves de alta ejecución. Consiste en un pantalón neumático que al inflarse proporciona presión positiva alrededor de los miembros inferiores y sobre el abdomen; se usa a partir de las 5 o +6 Gz, incrementa su presión sobre la parte inferior del cuerpo a medida que aumenta la intensidad de la aceleración; con ello se impide un desplazamiento masivo de la sangre hacia las regiones inferiores del cuerpo y una brusca disminución de la presión arterial. El efecto protector del traje anti-G se refuerza si al mismo tiempo el piloto realiza una maniobra consistente en forzar la espiración con la glotis ce-

rrada, soltando poco a poco el aire para disminuir la presión intratorácica y permitir el retorno venoso al corazón. El uso del traje anti-G y la ejecución de esta maniobra de Valsava modificada incrementa la tolerancia del piloto de 1 a 1.5 fuerzas G.

Existe otro procedimiento que puede usarse al mismo tiempo; consiste en inclinar ligeramente el asiento del piloto hacia atrás o hacia adelante, de tal manera que el vector de la aceleración incide oblicuamente sobre las grandes columnas sanguíneas, con lo cual disminuye importantemente el desplazamiento de la sangre hacia abajo y mantiene en límite satisfactorio el flujo y la presión arterial en el cerebro.

Finalmente, se ha observado que si se somete a los pilotos de combate en forma repetitiva a la aceleración +Gz en la centrífuga adquieren mayor tolerancia a este tipo de aceleración. Lo anterior se atribuye a un mejor desempeño de los barorreceptores.

Referencias

- Albery WB., Chelette TL., *Effects of G suit type on cognitive performance*. Aviat Space Environ Med, 1998; 69:474-9.
- Alvim KM., Greyout, Blackout, and G-loss of consciousness in the Brazilian Air Force: a 1991-92 survey. Aviat Space Environ Med, 1995; 66:675-7.
- Balldin UI., Tong A., Marsall JA., Regna M., *Premature ventricular contractions during +Gz with and without pressure breathing and extended coverage anti-G suit*. Aviat Space Environ Med, 1999; 70:209-12.
- Balldin UI., Myhre K., Tesch PA., et al., *Isometric abdominal muscle training and G tolerance*. Aviat Space Environ Med, 1985; 56:120-4.
- Balldin UI., Werchan PM., French J., Self B., *Endurance and performance during intense high +Gz exposures with effective anti-G protection*. Aviat Space Environ Med, 2003; 74:303-8.
- Banks R., Grisset JD., Turnipseed GT., et al., *The push-pull effect*. Aviat Space Environ Med, 1994; 65:699-704.
- Banks RD., Gray G., *"Bunt bradycardia": two cases of slowing a heart rate inflight during negative Gz*. Aviat Space Environ Med, 1994; 65:330-1.
- Banks RD., Grisset JD., Saunders PL., Mateczun AJ., *The effect of varying time at -Gz on subsequent +Gz physiological tolerance (push-pull effect)*. Aviat Space Environ Med, 1995; 66:723-7.
- Bateman WA., Jacobs I., Buick F., *Physical conditioning to enhance +Gz tolerance: issues and current understanding*. Aviat Space Environ Med, 2006.
- Bulbulian R., Crisman RP., Thomas ML., et al., *The effects of strength training and centrifuge exposure on +Gz tolerance*. Burton RR. Simulated aerial combat maneuvering tolerance and physical conditioning: current status. Aviat Space Environ Med, 1986; 57:712-4.
- Burns J., Balldin UI., *Positive pressure breathing for augmentation of acceleration tolerance*. Aviat Space Environ Med, 1988; 59:225-33.

- Burton RR., Shaffstall RM., *Human tolerance to aerial combat manoeuvres*. Aviat Space Environ Med, 1980; 51: 641-8.
- Burton RR., *G-induced loss of consciousness: definition, history, current status*. Aviat Space Environ Med, 1988; 59:2-5.
- Cardus D., MCTAGGART WG., *Cardiovascular effects of a sustained -Gz force in the horizontal position*. Aviat Space Environ Med, 1997; 68:1099-1103.
- Chung KY., Lee SJ., *Cardiac arrhythmias in F-16 pilots during aerial combat maneuvers (ACMs): a descriptive study focused on G-level acceleration*. Aviat Space Environ Med, 2001; 72:534-8.
- Convertino VA., Tripp LD., Ludwig DA., Duff J., Chelette TL., *Female exposure to high G: chronic adaptations of cardiovascular functions*. Aviat Space Environ Med, 1998; 69:875-82.
- Fraser WD., Shender BS., Forster EM., Hrebien L., *Cerebral tissue oxygenation and pulse wave delay (PwD) during negative to high positive Gz transitions*. [Abstract.] Aviat Space Environ Med, 2000; 71:274.
- Gallingham KK., *High-G stress and orientational stress: physiologic effects of aerial maneuvering*. Aviat Space Environ Med, 1988; 59(11, Suppl.) A10-20.
- Green NDC., Ford SA., *G-induced loss of consciousness: retrospective survey results from 2259 military aircrew*. Aviat Space Environ Med, 2006; 77:619-23.
- Guillingham KK., Fosdick JP., *High-G training for fighter aircrew*. Aviat Space Environ Med, 1988; 59:12-9.
- Guillingham KK., *Centrifuge training of USAF fighter pilots*. (Abstract) Aviat Space Environ Med, 1984; 55:467.
- Hill RC., *Recent advances in high sustained G protection*. SAFE J 1995; 25(1):78.
- Khomenco MN., Vartbaranov RA., Migachyov SD *Prognostication of the fleyer's + Gz-tolerance on the basis of muscular strength endurance*. Physiologist 1992; 35(1, Suppl.):S126-30.
- Krol JR., Holewinjn M., *The incidence of arrhythmias in F-16 pilots during combat flight*. Aviat Space Environ Med, 1995; 66:459.
- Krutz RW Jr., Burton RR., Forster EM., *Physiologic correlates of protection afforded by anti-G suits*. Aviat Space Environ Med, 1990; 61:106-11.
- Lyons T., Davenport C., Copley GB., et al., *Preventing G-induced loss of consciousness: 20 years of operational experience*. Aviat Space Environ Med, 2004; 75:150-3.
- Lyons TJ., Kraft NO., Copley GB., et al., *Analysis of mission and aircraft factors in G-induced loss of consciousness in the USAF: 1982-2002*. Aviat Space Environ Med, 2004; 75:479-82.
- Lyons TJ., Harding R., Freeman J., Oakley C., *G-induced loss of consciousness accidents: USAF experience 1982-1990*. Aviat Space Environ Med, 1992; 63:60-6.
- Lyons TJ., Marlowe BL., Michaud VJ., McGowan DJ., *Assessment of the anti-G. Straining maneuver (AGSM) skill performance and reinforcement program*. Aviat Space Environ Med, 1997; 68:322-4.
- Martin DS., D'anno DS., Wood ML., South DA., *Repetitive high G exposure is associated with increased occurrence of cardiac valvular regurgitation*. Aviat Space Environ Med, 1999; 70:1197-200.

- Morrisette KL., McGowan DG., *Further support for the concept of a G – LOC syndrome: A survey of military high – performance aviators*. Aviat Space Environ Med, 2000; 71:496-50.
- Nelson JG., *Hydrostatic theory and G protection using tilting aircrew seats*. Aviat Space Environ Med, 1987; 58:169-73.
- Newman DG., White SW., Callister R., *Patterns of physical conditioning in Royal Australian Air Force F/A-18 pilots and the implications for +Gz tolerance*. Aviat Space Environ Med, 1999; 70:739-44.
- Newman DG., Callister R., *Analysis of the Gz environment during air combat maneuvering in the F/A-18 fighter aircraft*. Aviat Space Environ Med, 1999; 70:310-15.
- Newman DG., Callister R., *Cardiovascular training effects in fighter pilots induced by occupational high G exposure*. Aviat Space Environ Med, 2008; 79:774-8.
- Newman DG., White SW., Callister R., *The effect of baroreflex adaptation on the dynamic cardiovascular response to head-up tilt*. Aviat Space Environ Med, 2000; 71:255-9.
- Newman DG., *Head positioning for high +Gz loads: an analysis of the techniques used by F/A-18 pilots*. Aviat Space Environ Med, 1997; 68:732-5.
- Oksa J., Hamalainen O., Rissanen S., et al., *Muscle strain during aerial combat maneuvering exercise*. Aviat Space Environ Med, 1996; 67:1138-43.
- Pluta JC., *LOC survey*. Flying Safety 1984; 25-8.
- Prior ARJ., Adcock TR., McCartly GW., *In-flight arterial blood pressure changes during –Gz to +Gz maneuvering*. Aviat Space Environ Med, 1993; 64:428.
- Prior ARJ., *RAF experience of G induced loss of consciousness*. In: *Proceedings of high G and high G protection*. Aeromedical and operational aspects. London: The Royal Aeronautical Society, 1987:16-25.
- Rickards CA., Newman DG., *G-Induced visual and cognitive disturbances in survey of 65 operational fighter pilots*. Aviat Space Environ Med 2005; 76:496-500.
- Sevilla NL., Gardiner JW., *G-induced loss of consciousness: casecontrol study of 78 G –LOCs in the F-15, F-16, and A-10*. Aviat Space Environ Med, 2005; 76:370-4.
- Shender BS., *Human tolerance to acceleration loads generated in high- performance helicopters*. Aviat Space Environ Med, 2001; 72:693-703.
- Shender BX., Forster EM., Hrebien L., Ryoo HC., Cammarotajp JR., *Acceleration-induce near-loss of consciousness: the “A-LOC” syndrome*. Aviat Space Environ Med, 2003; 74:1021-8.
- Shubrooks SJ., *Changes in cardiac rhythm during sustained high levels of positive (+G_z) acceleration*. Aerosp Med, 1972, 43:1200-6.
- Tachibana S., Akamatus T., Nakamura A., Yagura S., *Serious arrhythmias coinciding with alteration of consciousness in aircrew during +Gz stress*. Aviat Space Environ Med, 1994; 65:60-6.
- Tripp LD., Chellette T., Savul S., Widman RA., *Female exposure to high G: Effects of simulated combat sorties on cerebral and arterial O₂ saturation*. Aviat Space Environ Med, 1998; 69:869-74.
- Vann RD., Moon RE., Freiburger JJ., Denoble PJ., Dear GL., Stolp BW., Massey EW., *Decompression illness diagnosis and decompression study design*. Aviat Space Environ Med, 2008; 79:797-8.

- Whinnery JE., Laughlin MH., Uhl GS., *Coincident loss of conscious and ventricular tachycardia during +Gz stress*. Aviat Space Environ Med, 1980; 51:827-31.
- Whinnery JE., Parnell MJ., *The effects of long-term aerobic conditioning on +Gz tolerance*. Aviat Space Environ Med, 1987; 58:199-204.
- Wood EH., *Development of anti-G suits and their limitations*. Aviat Space Environ Med, 1987; 58:699-706.
- Wood EH., Lambert EH., *Objective documentation and monitoring of human Gz tolerance when unprotected and when protected by anti-G suits or M-1 type straining maneuvers alone or in combination*. SAFE J., 1989; 19:39-48.
- Yilmaz U., Cetinguc M., Akin A., *Visual Symptoms and G-LOC in the operational environment and during centrifuge training of Turkish jet pilots*. Aviat Space Environ Med, 1999; 70:709-12.

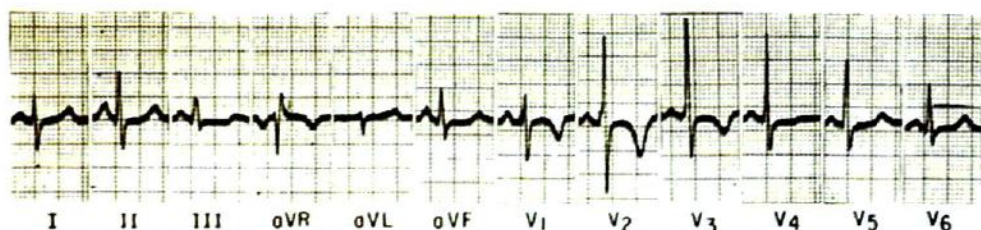


La mayor parte del tráfico aéreo se realiza en la troposfera. A medida que se asciende en esta zona disminuye la presión barométrica, la presión parcial de oxígeno, la densidad del aire, la temperatura y la humedad. En cambio, aumenta la luminosidad, el contenido de ozono y la radiación cósmica.

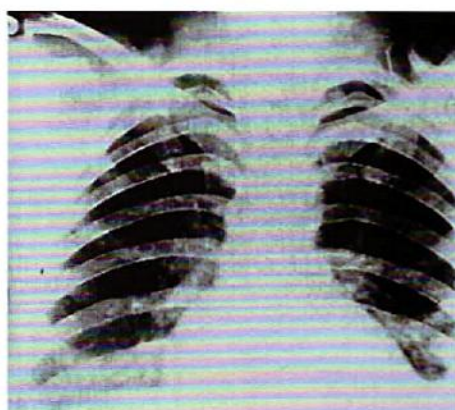


Durante el vuelo, la presión barométrica dentro de la cabina se sitúa en un rango que va de los 1500 a 2500 m smn. Sus características son similares a la de la atmósfera exterior, excepto la temperatura, que se mantiene en límites confortables.

Dr. Paul Bert, conocido ahora como “padre de la medicina aeronáutica” por sus estudios sobre la hipoxia y enfermedad de la altitud, realizados en la segunda mitad del siglo XIX como jefe del Laboratorio de Fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad de París. Sus estudios sobre los efectos de la altitud en el organismo humano los hizo en la primera cámara hipobárica, de la cual fue inventor, en globos aerostáticos y en la cumbre de montañas, incluyendo 152 experimentos efectuados en México.



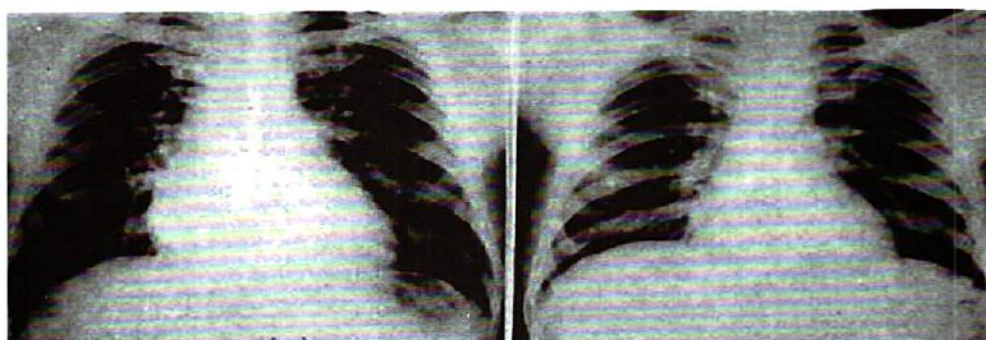
Trazo electrocardiográfico de paciente con enfermedad aguda de la montaña en el que se observan signos de sobrecarga aguda de cavidades derechas. (Trazo publicado por el Dr. Dante Peñaloza, cardiólogo peruano.)



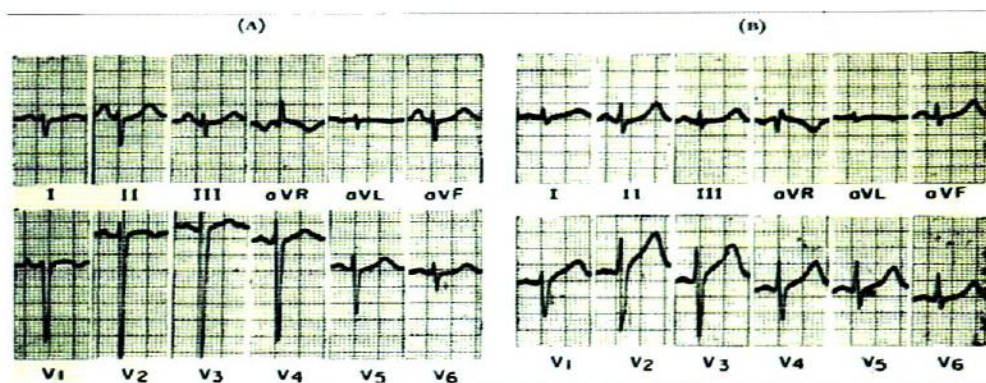
Radiografía de tórax de un paciente con edema agudo pulmonar de la altitud (imagen izquierda) en la que se destacan los datos que se mencionan en el texto. A la derecha, radiografía de tórax del mismo paciente cuatro días después de recibir tratamiento apropiado. Esta imagen corresponde a una publicación del Dr. T. Norboo, médico indú.



Dr. Carlos Monge, médico peruano quien en 1928 publicó la descripción clínica de la enfermedad crónica de la montaña, cuadro clínico que lleva su nombre.



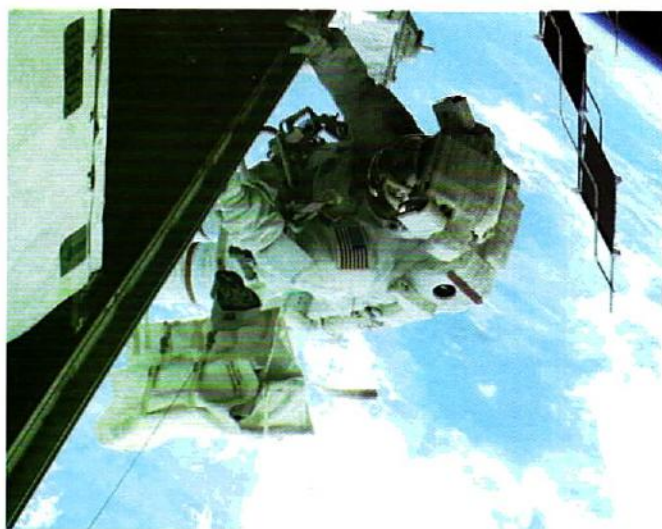
La imagen radiológica izquierda corresponde a un paciente con enfermedad crónica de la montaña. La imagen derecha es del mismo paciente a nivel del mar.



El trazo A corresponde a paciente con enfermedad crónica de la montaña y el trazo B al mismo paciente tiempo después de residir al nivel del mar. (Fuente: Dr. Dante Peñaloza.)



En la actividad submarina (buceo deportivo o profesional y en la tripulación de submarinos) se observan ocasionalmente situaciones de descompresión rápida que conducen a la enfermedad descompresiva.



En la actividad aeroespacial, particularmente en maniobras de combate y en la actividad extravehicular de los astronautas, la enfermedad descompresiva de diferentes grados es un hecho relativamente común.



El Dr. Harry Armstrong, de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, ha sido uno de los investigadores que más aportaron conocimiento sobre la fisiopatología de la enfermedad descompresiva. En la imagen derecha, proporcionada por la Marina Armada de México, se muestra la presencia de burbujas en arterias coronarias.



La figura muestra un avión de línea aérea que se desplaza a una velocidad inferior a un Mach.



Los aviones de combate de las fuerzas armadas desarrollan velocidades supersónicas en un rango de 1 a 5 Mach.



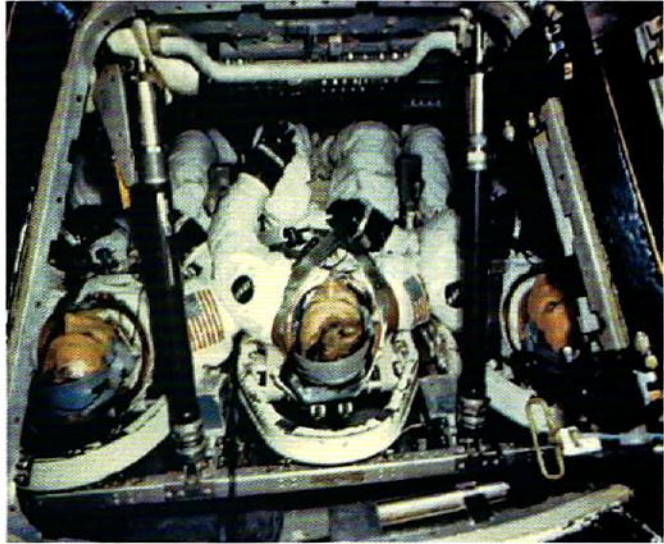
En el futuro cercano habrá transportación aeroespacial, es decir, vuelo de naves con características de avión-cohete que desarrollarán velocidades hipersónicas (de 5 a 20 Mach).



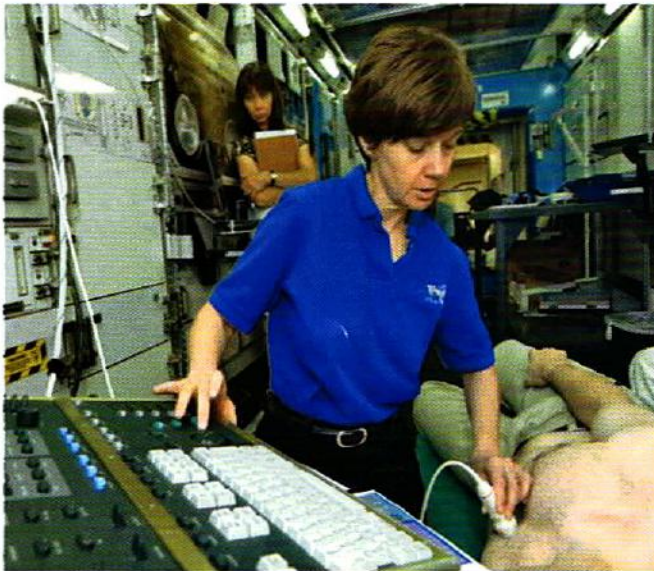
Los vehículos espaciales se desplazan a velocidades que van de 28 000, 40 000 y 150 000 km/h. (Fuente: NASA.)



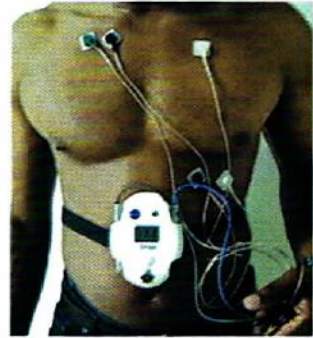
Esta fotografía corresponde al Dr. Earl Wood, investigador de la Clínica Mayo en el momento de estar recibiendo en la centrífuga humana un grado importante de aceleración tipo +Gz, es decir, cuando el vector actúa de la cabeza a los pies.



Los efectos de la aceleración se toleran mejor cuando el vector actúa de adelante hacia atrás y perpendicular al eje longitudinal del cuerpo, es decir, la aceleración tipo +Gx. La figura superior muestra a tres astronautas dentro de una nave Apolo a punto de ser lanzada al espacio.



La selección médica de pilotos aviadores (de línea aérea y militares) incluye numerosos estudios de laboratorio y gabinete para descartar problemas asintomáticos subyacentes del sistema cardiovascular.



Sistema para monitorear frecuencia cardíaca, presión arterial, frecuencia respiratoria, temperatura y electrocardiograma (*in situ* y a distancia).



Antes del vuelo. El estrés mental y físico es generalmente importante antes de un viaje en avión. El horario habitual de reposo, actividad y toma de medicamentos se distorsionan.

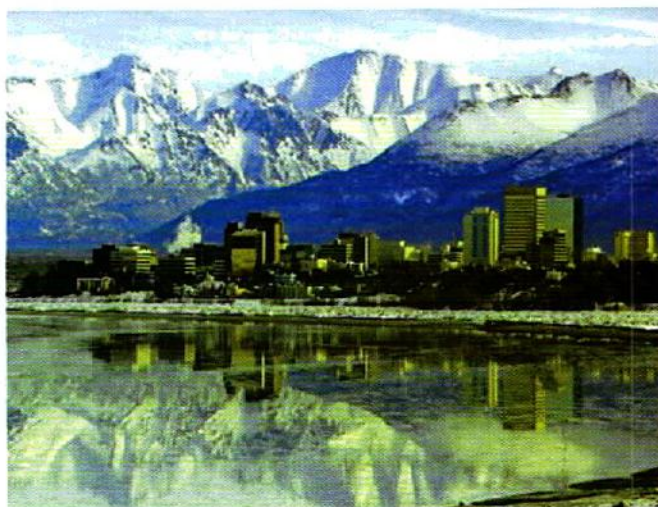


Durante el vuelo. La hipoxia en el ámbito de la cabina, la limitación de espacio e inmovilidad prolongada, la reseca del aire interior, el ruido y vibración, etc., pueden agravar problemas cardiovasculares subsistentes.



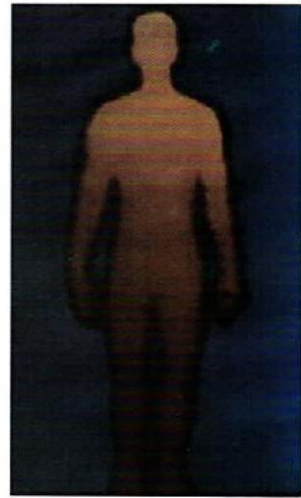
Después del vuelo. Otros factores como temperaturas extremas, diferencia de clima, cambios de husos horarios, etc., pueden influir importantemente en la condición clínica del paciente. Fotografía de la ciudad de Anchorage, Alaska.

Después del vuelo. Las condiciones ambientales del lugar de destino pueden ser radicalmente distintas al lugar de residencia del paciente; es el caso de aeropuertos de gran altitud como el de la Paz, Bolivia, que se encuentra cerca de los 4 000 m SNM.

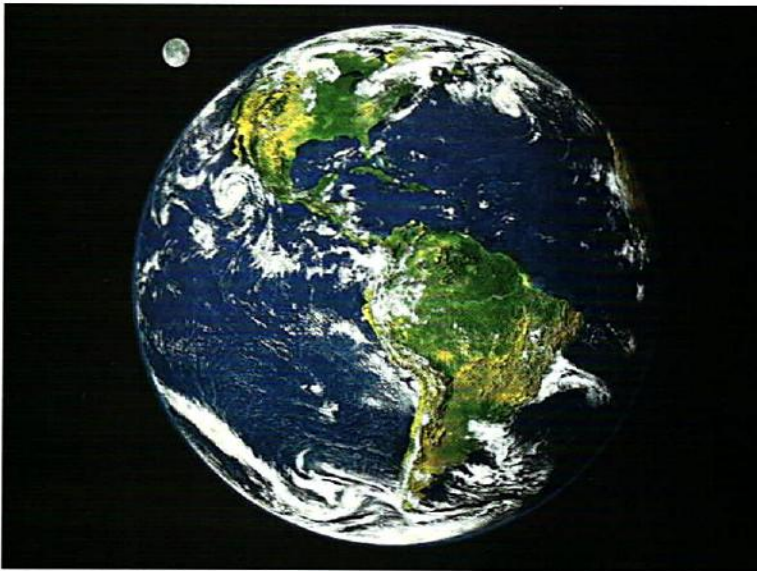




La fuerza gravitacional terrestre influye de manera importante en la hemodinámica; la presión arterial, venosa y capilar es similar en todas las regiones del cuerpo en clinostatismo, pero es considerablemente mayor en las regiones inferiores del cuerpo en ortostatismo. (Fuente: NASA.)



En ortostatismo la gravedad terrestre ocasiona mayor acumulación de líquidos en la parte inferior del cuerpo. (Fuente: NASA.)



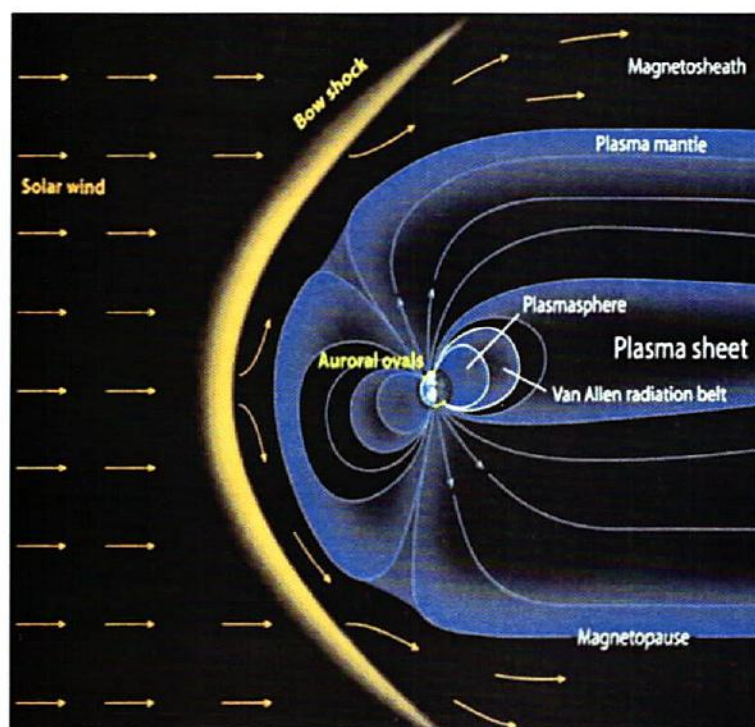
Ausencia de atmósfera. Para algunos investigadores el espacio exterior se inicia a 100 km de altura, nivel en el cual empieza el silencio y la oscuridad absoluta del espacio. (Fuente: NASA.)



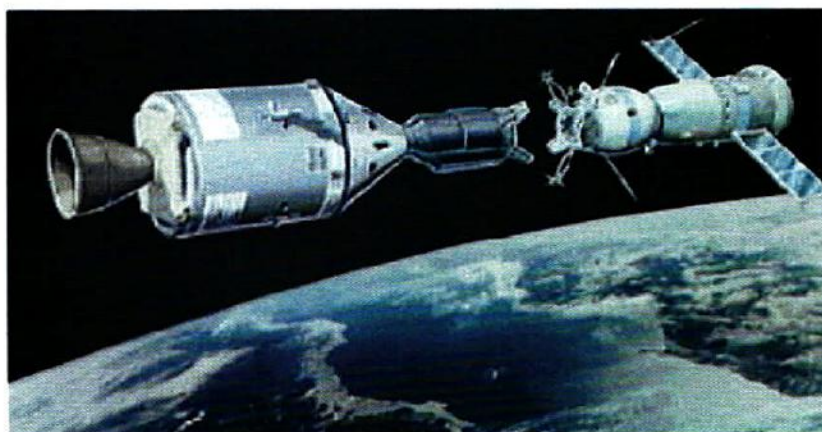
Ausencia de gravedad. Éste es el factor que condiciona la mayor parte de los cambios anatómofisiológicos del sistema cardiovascular. (Fuente: NASA.)



Temperaturas extremas. En el espacio exterior la parte iluminada de naves o trajes espaciales sufre calentamiento excesivo y lo contrario ocurre en la parte sombreada. (Fuente: NASA.)



Radiación cósmica. Éste es otro factor de capital importancia, porque sin la protección adecuada el ámbito espacial es incompatible con la vida. (Fuente: NASA.)



Naves Apollo-Soyuz. Las naves espaciales rusas siempre han tenido en su interior el equivalente de una atmósfera terrestre al nivel del mar. En las naves de la NASA (excepto el transbordador espacial) la atmósfera interior es menor, pero rica en oxígeno. (Fuente: NASA.)

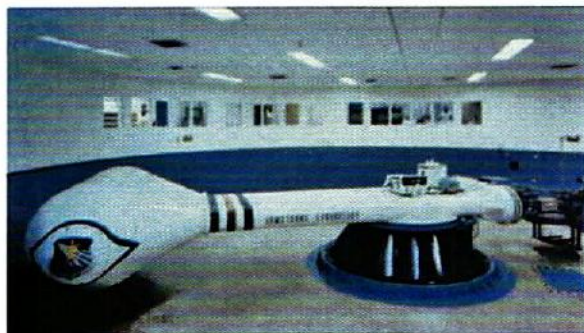
Traje espacial. Todos lo tipos de traje espacial tienen en su interior un 1/3 de atmósfera y oxígeno 100 %. (Fuente: NASA.)



Estación Espacial Mir. Aun cuando en sus 14 años de existencia este laboratorio espacial presentó problemas graves de temperatura, incendios y otros desarreglos, conservó permanentemente las características de la atmosfera terrestre al nivel del mar. (Fuente: NASA.)



Estación Espacial Internacional. Los diferentes módulos que la constituyen conservan en su interior condiciones confortables y una presión barométrica similar a la de la atmosfera terrestre al nivel del mar. (Fuente: NASA.)



Centrifuga humana. Este dispositivo se utiliza para reproducir los diferentes tipos de aceleración y sus efectos sobre el sistema cardiovascular (Fuente: NASA.)



Bolsa de presión negativa en la parte inferior del cuerpo. Con ella se logra conocer la respuesta del sistema cardiovascular al regreso de un vuelo espacial. (Fuente: NASA.)



Cámara de altitud. También llamada cámara hipobárica, puede simular diferentes niveles de altitud, presión barométrica y de hipoxia. (Fuente: NASA.)



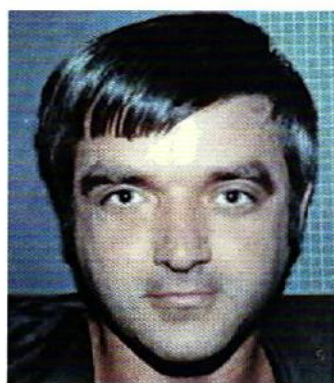
Vuelo parabólico. Aun cuando el periodo de ingravidez es muy breve durante los vuelos parabólicos, las experiencias cardiovasculares que en él se obtienen son valiosas. (Fuente: NASA.)



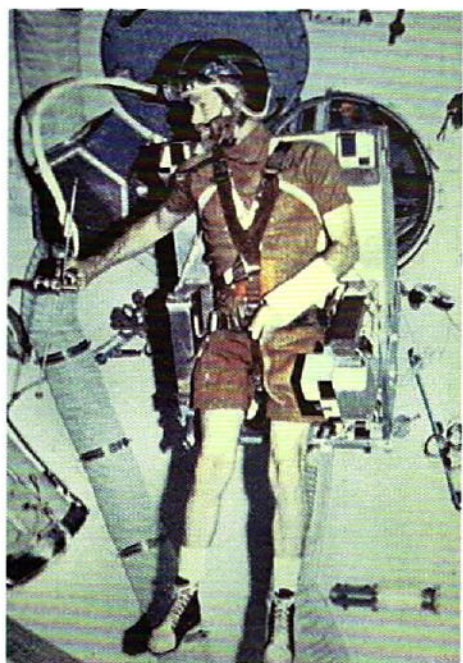
Redistribución de líquidos en cero gravedad. En ausencia de gravedad, los líquidos del cuerpo experimentan una peculiar distribución, tienden a acumularse en mayor proporción en las porciones superiores. (Fuente: NASA.)



Régimen de presiones en microgravedad. Al desaparecer la presión hidrostática (presión gravitacional), la tensión arterial se vuelve uniforme en toda la extensión del cuerpo. (Fuente: NASA.)



El rostro de "luna llena" en los astronautas durante el vuelo, ofrece datos clínicos normales que en tierra tendrían gran significación patológica. (Fuente: NASA.)



“Las piernas de pájaro” que exhiben los astronautas durante la misión espacial presentan flujo sanguíneo, amplitud del pulso y presión arterial disminuidos. (Fuente: NASA.)

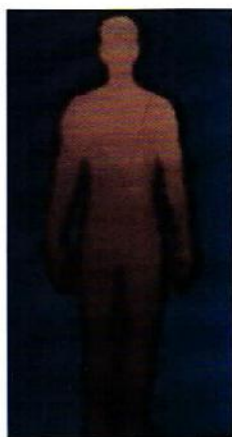
Los estudios ecocardiográficos son usuales y de gran utilidad en la investigación cardiológica espacial; en la imagen se observa a la doctora Rhea Sheddman practicando ecocardiograma al astronauta Garn. (Fuente: NASA.)



El primer cateterismo cardíaco derecho en el espacio le fue practicado al astronauta doctor Andrew Gaffney en junio de 1991. (Fuente: NASA.)



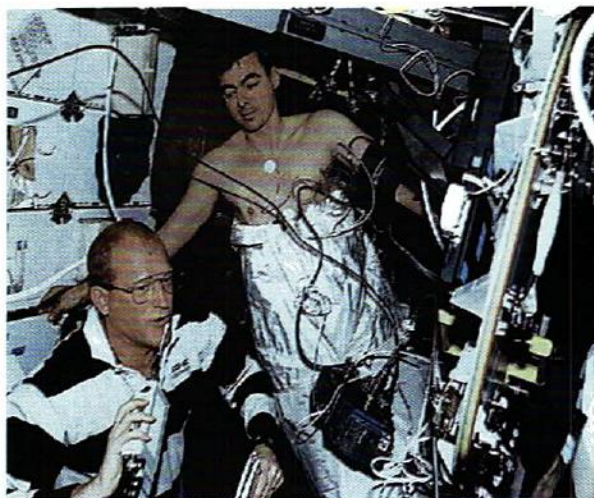
Dos cardiólogos astronautas. El doctor Oleg Atkov (tercero de izquierda a derecha), primer cardiólogo astronauta ruso, realizó los primeros y más extensos estudios ecocardiográficos en vuelo espacial. El doctor Andrew Gaffney (último de izquierda a derecha), primer cardiólogo astronauta norteamericano, fue sometido al primer estudio de cateterismo cardíaco derecho en el espacio. La foto corresponde al acto de inauguración del Primer Simposio Internacional de Cardiología Aeroespacial celebrado en la Ciudad de México en 1987.



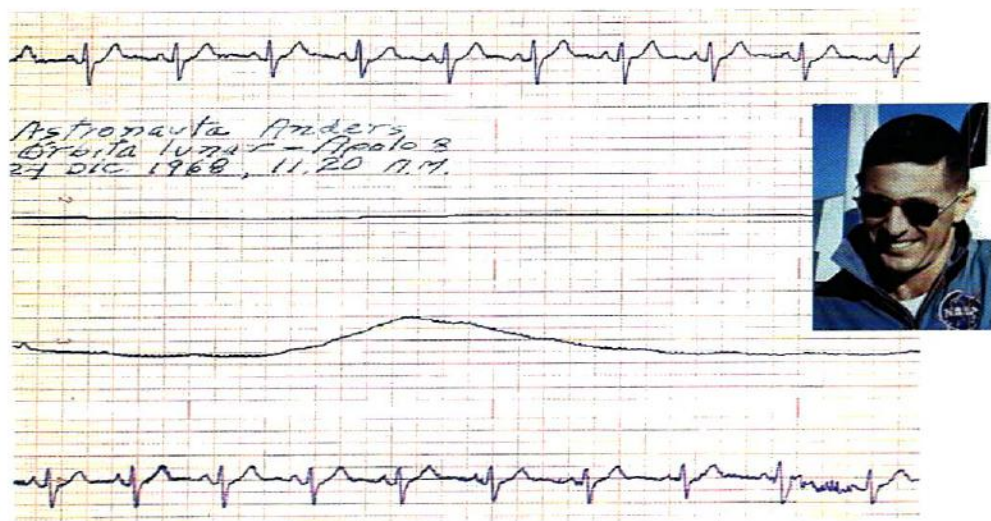
Regreso a tierra. En los vuelos de corta duración (unos días), el desacondicionamiento cardiovascular es menor y permite a los astronautas mantenerse de pie y caminar al regresar a Tierra; pero si la estancia en el espacio es prolongada (semanas o meses), el desacondicionamiento de este sistema puede ser tan severo que les impide incluso mantenerse en posición sedente. En la figura central se muestra gráficamente la importante acumulación de líquidos en la parte inferior del cuerpo, lo que se acompaña por una disminución del retorno venoso, el gasto cardíaco y la presión arterial en las regiones cefálicas. (Fuente: NASA.)



El ejercicio físico en banda sinfín, una o dos horas diarias durante la misión, es la medida más eficaz para contrarrestar parcialmente el desacondicionamiento cardiovascular que genera la ausencia de gravedad. (Fuente: NASA.)



La aplicación de presión negativa en la parte inferior del cuerpo en forma periódica durante las misiones de larga duración es también un procedimiento muy útil, porque simula el efecto de la gravedad terrestre y "recuerda" a los barorreceptores la respuesta correspondiente. (Fuente: NASA.)



Este electrocardiograma, enviado desde órbita lunar en diciembre 1968, corresponde a uno de los tripulantes de Apolo VIII. Se trata de un documento histórico para la medicina, en particular para la cardiología, porque es el primero que se obtiene desde tal distancia. Dicho trazo ECG fue recibido por el autor cuando fue invitado por primera vez al Centro de Control de la NASA en Houston.



En la figura se observa al doctor Jaques Marescaux de Francia realizando la primera telecirugía robótica "transatlántica" (colecistectomía) desde Nueva York, en una paciente en la sala de cirugía del Hospital General de Estrasburgo, Francia, el 7 de septiembre de 2001, a 7 000 km de distancia.



Aparatos de estudio dejados en la Luna por las misiones Apolo funcionaron por años con energía nuclear. Este procedimiento es aplicable en cardiología para alimentar, por décadas, prótesis electrónicas. (Fuente: NASA.)

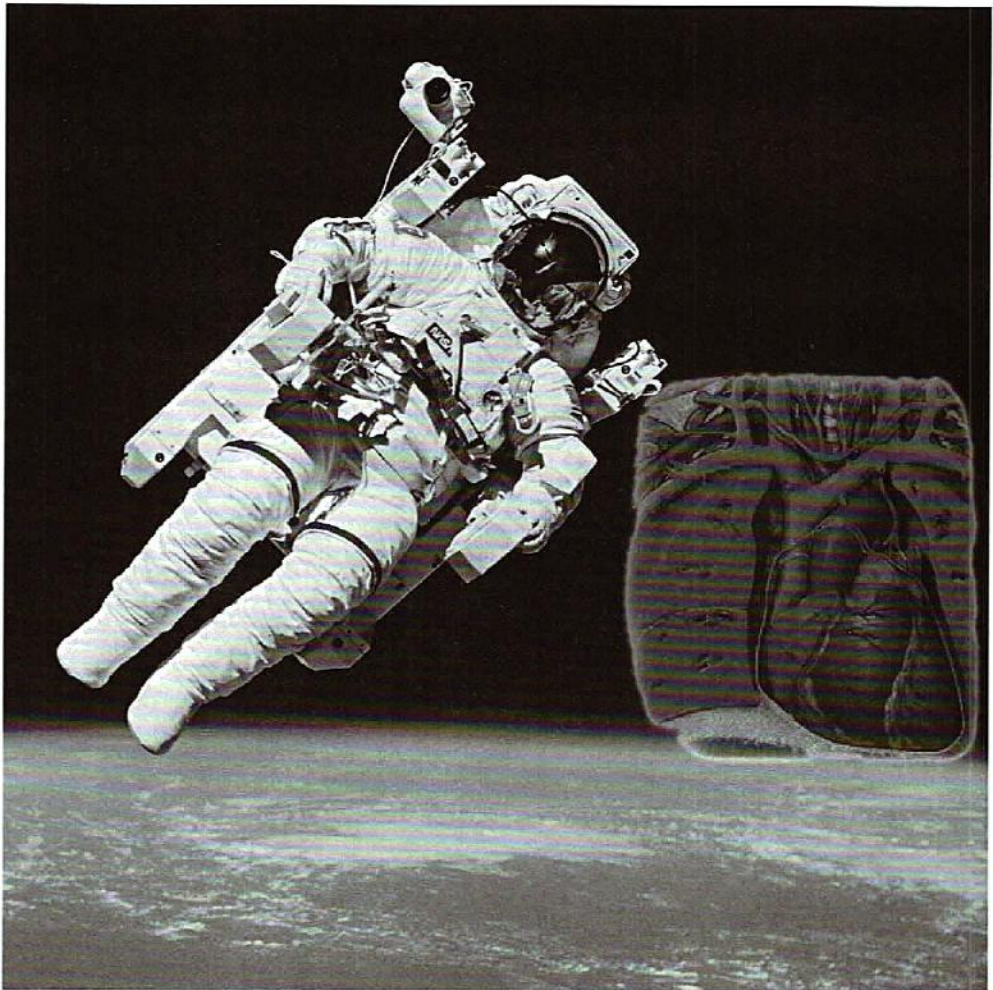


Las técnicas para obtener imágenes de alta resolución en la investigación espacial son usadas actualmente para mejorar la calidad y precisión en la imagenología médica.

Algunos de los nuevos materiales producidos por la industria espacial, son aprovechables para la fabricación de corazones artificiales y prótesis diversas.



Capítulo 6



Certificación cardiológica del personal de vuelo

En este capítulo vamos a hacer referencia a algunos aspectos cardiológicos que merecen puntualizarse antes de tomar una decisión en el examen médico para iniciar la carrera de piloto aviador o para el ingreso a una línea aérea y a las fuerzas armadas, y en el examen periódico para aquellos pilotos aviadores que se encuentran en activo. A manera de ejemplo señalaremos los siguientes.

Presencia de factores de riesgo coronario

Tradicionalmente se reconocen como factores de riesgo cardiovascular la presencia de uno o más de los siguientes: hipertensión arterial, hiperlipidemias, tabaquismo, diabetes mellitus, obesidad, sedentarismo, estrés psicológico y personalidad tipo A, hipotiroidismo y carga genética para enfermedad coronaria. Las empresas aéreas y las fuerzas armadas se reservan el derecho de contratar a aquellos elementos que ofrecen mayores posibilidades de una vida laboral prolongada y, sobre todo, aquellos cuyo estado de salud física y mental ofrece un margen de mayor eficiencia y seguridad en las operaciones aeronáuticas. Aun cuando la mayor parte de estos factores son susceptibles de controlar, su presencia en el examen inicial puede conducir al cardiólogo (apoyado en un criterio prevencionista) a considerar al aspirante como "no recomendable", lo que es distinto a calificarlo "no apto". Cuando en el transcurso de la vida laboral de un piloto aviador aparece cualquiera de estas condiciones clínicas, la conducta que debe seguirse es la valoración cuidadosa del problema y la orientación y el apoyo necesario para su control.

Hipertensión arterial

Ésta es una entidad clínica relativamente frecuente en la población general; los estudios epidemiológicos establecen que la hipertensión arterial afecta al 30% de los adultos de ambos sexos; con frecuencia se le denomina el "asesino silencioso" porque habitualmente no ofrece sintomatología y el paciente puede pasar años sin percatarse del problema; es uno de los factores de riesgo coronario más reconocido e importante y

capaz también de dañar las arterias periféricas, renales, retinianas y cerebrales, además de producir con el tiempo insuficiencia cardíaca por miocardiopatía hipertensiva en fase dilatada.

La Organización Mundial de la Salud acepta como cifras normales altas de presión arterial en adultos 140/90 mmHg; sin embargo, actualmente en la mayor parte de los centros cardiológicos del mundo estas cifras se consideran ya en la frontera de lo patológico; de suerte que en la aviación es preferible seleccionar individuos con cifras tensionales inferiores a las señaladas.

No es raro que algunos individuos durante el examen inicial o el examen periódico experimenten cierto grado de hipertensión transitoria, a la que se ha dado en llamar "hipertensión de la bata blanca"; esto se explica por el estrés psicológico que dichos exámenes producen. En estos casos se recomienda tomar la presión arterial varias veces o en días consecutivos en condiciones de tranquilidad para el examinado, o bien, practicar el registro automático y ambulatorio de la presión arterial durante varias horas.

Tratándose de pilotos aviadores en activo que empiezan a manifestar cifras relativamente altas de presión arterial, es preciso tomar medidas inmediatas para su control. Si la presión arterial sobrepasa los 140/90 mmHg pero no rebasa los 160/100 mmHg, la hipertensión arterial debe considerarse como leve y es susceptible de normalizarla con medidas higiénico dietéticas consistentes en normalización del peso corporal, ejercicio físico cotidiano y moderado, disminución de la ingesta de sal y alcohol y supresión del tabaco. Si las cifras están por arriba de los 160/100 mmHg el tratamiento farmacológico se impone.

Existen varios medicamentos disponibles para controlar la hipertensión moderada sin riesgos mayores de efectos secundarios. Una primera opción puede ser el uso de diuréticos y betabloqueadores. Otra alternativa muy conveniente es la utilización de inhibidores de la enzima convertidora de la angiotensina, a los que se les puede agregar dosis pequeñas de diurético. También se puede disponer de los calcioantagonistas, particularmente en aquellos individuos en los cuales la hipertensión es predominantemente sistólica. Es recomendable que los aviadores que requieren la utilización de estos medicamentos permanezcan en tierra dos a cuatro semanas al iniciar el tratamiento, para asegurarse del control adecuado de la presión arterial y para descartar los efectos secundarios que eventualmente pueden comprometer la eficiencia y la seguridad de su actividad. Más recientemente ha surgido el grupo de antagonistas de los receptores, de la angiotensina II, los cuales pueden usarse en los trabajadores de la aviación siguiendo las recomendaciones anteriormente expuestas.

Cardiopatía isquémica

La cardiopatía coronaria aterosclerosa, la hipertensión arterial y los eventos vasculares cerebrales representan la causa más importante de mortalidad en la mayor

parte de los países del mundo. La identificación de enfermedad coronaria aterosclerosa en un examen inicial o en examen periódico en pilotos aviadores, es motivo de rechazo o de pérdida de la licencia. En un estudio realizado en Inglaterra en pilotos aviadores, civiles y militares, muertos en accidentes aéreos, la necropsia reveló enfermedad coronaria significativa en el 19% de los pilotos cuya edad promedio era de 32 años. Esto significa que una proporción no despreciable de personas sanas presentan desde temprana edad lesiones ateromatosas en la red coronaria que no tienen expresión clínica.

No es una práctica común en la aviación comercial y militar hacer de rutina estudios especializados para detectar enfermedad coronaria; incluso la prueba de esfuerzo sólo se practica en individuos mayores de 40 años, sin embargo, recientemente en algunos servicios médicos de aviación se ha incluido un estudio ecocardiográfico de rutina en el examen de admisión.

En la mayor parte de los países del mundo los pilotos de empresas aéreas o de las fuerzas armadas que presentan sintomatología y datos objetivos de cardiopatía isquémica son puestos en tierra y relevados de su función. Excepcionalmente pilotos civiles o militares con cardiopatía aterosclerosa coronaria mínima (lesiones de menos del 50% de un solo vaso) y algunos que han sido sometidos a revascularización quirúrgica o con *stent*, se les ha permitido reanudar su actividad, con la condición de que siempre formen parte de tripulación múltiple y que las medidas de prevención secundaria del proceso ateromatoso sean estrictas y se sometan periódicamente a estudio de coronariografía.

Lesiones estructurales

En los exámenes de admisión a una línea aérea o a las fuerzas armadas es siempre recomendable la participación de un cardiólogo experimentado; también es aconsejable practicar rutinariamente un ecocardiograma en los exámenes iniciales. La anterior recomendación obedece a que en los exámenes periódicos posteriores que se practican al personal de vuelo se han descubierto lesiones orgánicas mínimas, pero que pueden agravarse con el tiempo o ser motivo de incapacidad en pilotos de combate que son sometidos a fuerzas de aceleración de tipo +Gz. Algunas de las lesiones que se han descubierto en exámenes posteriores en el personal de vuelo mediante estudios ecocardiográficos son las siguientes: prolapso de válvula mitral, válvula aórtica bicúspide, insuficiencia aórtica con valvas normales, comunicación interauricular, coartación de la aorta leve y miocardiopatías.

Actualmente algunos servicios médicos de aviación aplican criterios más liberales que en otros tiempos cuando encuentran en el personal de vuelo lesiones mínimas de insuficiencia o estenosis valvulares. En estos casos autorizan la actividad normal

del piloto aviador bajo dos condiciones: a) que se sometan a un estudio ecocardiográfico anual por el resto de su vida laboral, para conocer a tiempo cualquier progresión o agravamiento de esas pequeñas lesiones; b) cuando se trata de pilotos de combate y de acrobacia deben someterse a pruebas en tierra para simular la aceleración en sus diferentes formas (en la centrífuga), a descompresiones rápidas o explosivas de la cabina (en cámaras de altitud), a pruebas de esfuerzo máximo (en banda sinfín), a diferentes grados de hipoxia (en cámara de altitud) y otras pruebas que se estimen necesarias para simular las condiciones reales de la actividad en este tipo de pilotos.

Cuando las lesiones adquieren el grado de moderada o severa procede la cancelación de la licencia y la separación del trabajador de su actividad específica.

Las dos lesiones valvulares congénitas más comunes en el personal de vuelo que han pasado inadvertidas en el examen inicial son la válvula aórtica bicúspide y el prolapso de la válvula mitral. Los individuos con válvula aórtica bicúspide actualmente pueden continuar su carrera profesional; sin embargo, la válvula aórtica bicúspide puede evolucionar desfavorablemente hacia la estenosis aórtica, la insuficiencia valvular aórtica, la calcificación de las valvas, la endocarditis bacteriana y la dilatación de la raíz aórtica. Por eso es recomendable que los sujetos portadores de esta afección sean revalorados periódicamente con estudio ecocardiográfico y protegerlos con antibiótico en las extracciones dentarias u operaciones quirúrgicas. Por lo que concierne al prolapso de la válvula mitral, se trata de una afección hereditaria dominante que afecta el tejido fibroso de las valvas, el anillo valvular y sus cuerdas; esto provoca que el aparato valvular se debilite y las valvas protruyan a través del anillo auriculoventricular a manera de paracaídas. Esta afección la sufren del 2 al 4% de la población general y pasan años o décadas sin que se presenten problemas, pero cuando los hay pueden manifestarse por endocarditis bacteriana, insuficiencia mitral progresiva, tromboembolias, arritmias cardíacas, paro cardíaco y muerte súbita. Si se detectan la válvula aórtica bicúspide y prolapso de la válvula mitral en el examen inicial a los aspirantes, éstos deben considerarse "no recomendables", pero si estas lesiones se descubren en el personal en funciones debe establecerse en ellos un programa de vigilancia o valoración periódica con estudio ecocardiográfico y Doppler, prueba de esfuerzo, Holter de 24 horas y en el caso de pilotos militares y de acrobacia deben someterse adicionalmente a pruebas especializadas que simulen las condiciones reales en las diferentes fases de su actividad.

También se ha reconocido en el personal de vuelo la presencia de comunicación interauricular, especialmente foramen oval permeable. Esta lesión es un hallazgo común en las autopsias de enfermos no cardíopatas; su diámetro no va más allá de los 5 mm y puede encontrarse en el 25% de la población con corazón sano. Este proceso no tiene manifestación clínica y no es motivo de rechazo o cancelación de

licencia. Su importancia en la actividad aeroespacial radica en que la descompresión rápida o explosiva de la cabina de un avión, o cuando un astronauta debe incursionar fuera de la astronave protegido por el traje espacial que lleva en su interior sólo la tercera parte de la presión barométrica de la nave, con frecuencia conduce a la formación de burbujas de nitrógeno, oxígeno y bióxido de carbono en la sangre venosa, las cuales eventualmente pueden pasar a través del foramen oval a la circulación sistémica y provocar embolias gaseosas en el cerebro y en otras regiones del cuerpo.

En el personal de vuelo, durante los exámenes periódicos, se han detectado a veces pequeñas comunicaciones interauriculares que han pasado inadvertidas en los exámenes iniciales porque no aparecen signos clínicos (soplo sistólico en foco pulmonar y segundo ruido desdoblado fijo), radiológicos (dilatación del tronco de la pulmonar y crecimiento de cavidades derechas) ni electrocardiográficos (bloqueo de rama derecha del haz de Hiss). Una vez detectada la presencia de una comunicación interauricular debe valorarse integralmente el caso por los riesgos que se han mencionado. Sobre todo porque el defecto puede corregirse quirúrgicamente en forma definitiva, y es recomendable hacerlo antes de los veinticinco años de edad.

La coartación de la aorta habitualmente se diagnostica desde la infancia, sin embargo, en el personal de vuelo se han identificado pequeños grados de coartación aórtica en la edad adulta. Si el gradiente de presión arterial a través de la coartación es igual o menor de 20 mmHg, el piloto aviador puede continuar su actividad sin ninguna restricción, pero si este gradiente es mayor, el caso debe valorarse individualmente, y si procede la corrección quirúrgica el piloto debe ser incapacitado porque el riesgo de aneurisma, disección y ruptura de la aorta sigue estando presente aun después de la reparación quirúrgica.

En cuanto a la comunicación interventricular y la persistencia del conducto arterioso, generalmente son diagnosticados desde la infancia y corregidos quirúrgicamente en forma satisfactoria. Un aspirante que presente antecedente de una CIV o un PCA corregido quirúrgicamente desde temprana edad debe valorarse cuidadosamente, y si la evolución ha sido satisfactoria puede considerarse apto para piloto civil o militar.

La pericarditis viral aguda se manifiesta habitualmente por fiebre, mal estado general, incomodidad o dolor retroesternal continuo, frote pericárdico y modificaciones de la onda T y del segmento ST; se trata de un proceso autolimitado que lo sufren ocasionalmente pilotos aviadores cardiológicamente sanos después de un proceso gripal, su duración no va más allá de dos a seis semanas y sólo impone la incapacidad temporal. Caso muy distinto es la pericarditis bacteriana, tuberculosa, por la presencia de un cáncer o de un proceso autoinmune.

Una última consideración que estimo pertinente es el hallazgo de una miocardiopatía en el examen inicial o en un examen periódico. Cualquier tipo de miocardiop-

patía (hipertrófica, restrictiva o dilatada), y en cualquier grado de evolución, es incompatible con la actividad de piloto aviador.

Trastornos de la conducción

El bloqueo incompleto de la rama derecha del haz de Hiss es común en personas sanas; su presencia en el electrocardiograma de un piloto aviador debe considerarse como una variante normal; también lo es habitualmente el bloqueo completo de la rama derecha del haz de Hiss, pero en el examen inicial debe practicarse por lo menos una prueba de esfuerzo, ecocardiograma y cardiología nuclear para descartar cualquier proceso condicionante. Debe tenerse presente que la aparición de un bloqueo completo de rama derecha del haz de Hiss en el transcurso de la vida laboral de un piloto aviador puede tener significado patológico y debe investigarse alguna causa responsable; de no encontrar patología evidente, el piloto debe continuar su actividad sin restricción.

El bloqueo completo de la rama izquierda puede ser la expresión electrocardiográfica de cardiopatía coronaria aterosclerosa, de hipertensión sistémica y de una cardiomiopatía. Pero también puede estar presente en corazones sanos; en efecto, en pilotos aviadores de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, portadores de bloqueo completo de la rama izquierda del haz de Hiss que han sido sometidos a estudios de coronariografía y cardiología nuclear, sólo del 10 al 15% de los casos correspondieron a patología cardíaca. Si ante la presencia de un bloqueo completo de la rama izquierda no se identifica ningún proceso condicionante (miocardiopatía, afección coronaria, fibrosis miocárdica, etcétera), el piloto puede continuar su actividad normal y ser revalorado periódicamente.

El bloqueo auriculoventricular (BAV) de primer grado (segmento PR igual o mayor a 21 centésimas de segundo) se considera en general una variante normal del electrocardiograma y corresponde a vagotonía; si al aumentar la frecuencia cardíaca con el ejercicio el espacio PR se reduce a lo normal o muy cerca de lo normal, el aspirante o el piloto en funciones debe considerarse apto para el inicio o la continuación de sus funciones. El bloqueo AV de segundo grado tipo Mobitz 1 es un hallazgo electrocardiográfico raro y casi siempre corresponde a corazón sano, generalmente se presenta durante el sueño por aumento del tono vagal; algunos cardiólogos aconsejan una valoración cardiológica más amplia que incluya el electrocardiograma con esfuerzo. El bloqueo AV de segundo grado tipo Mobitz 2 con frecuencia produce síntomas como lipotimias o síncope y habitualmente progresa a estadios más avanzados; algunos especialistas indican incluso la colocación de marcapaso preventivo en sujetos sintomáticos; por supuesto, este trastorno de la conducción cardíaca es incompatible con la actividad del piloto aviador. El bloqueo AV de tercer grado o bloqueo completo

del haz de Hiss congénito o adquirido, sintomático o asintomático, representa una contraindicación formal y definitiva para la actividad de piloto aviador.

Trastornos del automatismo

Toda arritmia cardíaca considerada "maligna", crónica, recurrente, incesante, las que requieren el uso de medicamentos, las que siendo esporádicas o breves producen sintomatología (palpitaciones, mareo, lipotimia, síncope, disnea, dolor precordial, etcétera) y, por supuesto, aquellas que obedecen a cardiopatías subyacentes y a otros procesos patológicos extracardiacos, deben considerarse en principio no compatibles con la actividad aérea. Las arritmias cardíacas constituyen un capítulo relativamente complejo, por lo cual es siempre recomendable que antes de que el médico examinador tome una decisión, el caso sea valorado por un experto en esta área de la cardiología, porque actualmente se cuenta con procedimientos como la ablación con radiofrecuencia y la cirugía que pueden corregir definitivamente arritmias incapacitantes como algunas taquicardias y el síndrome de wpw.

Hasta hace poco tiempo, la edad máxima para conservar la licencia de piloto aviador de línea aérea era de 60 años, porque se consideraba que a partir de esa edad los riesgos de incapacidad médica (especialmente cardiovascular) son mayores. Sin embargo, la Organización de Aviación Civil Internacional, a partir del año 2006, ha sugerido que ese límite se lleve hasta los 65 años, pues el promedio de vida se ha incrementado, las condiciones sanitarias son mejores y está demostrado que un buen número de pilotos de líneas comerciales pueden seguir laborando con razonable seguridad.

La condición es que se sometan a examen médico cada seis meses y en ellos se valore con más amplitud el sistema cardiovascular, respiratorio y el sistema nervioso central. Además, el piloto mayor de 60 años debe siempre ser acompañado por un copiloto menor de 60.

Referencias

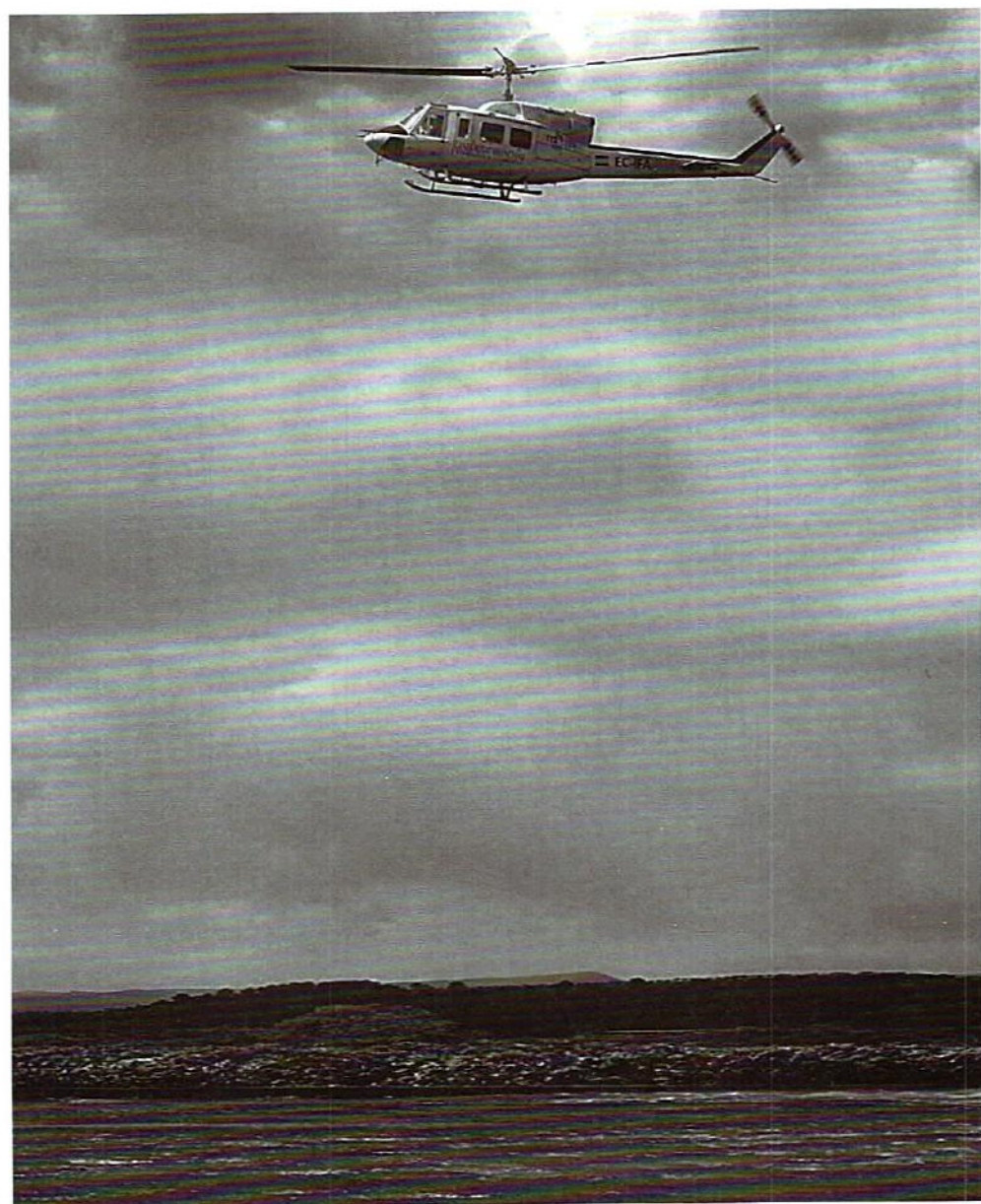
- Agard Aerospace Medical Panel Working Group 18. Echocardiographic finding in nato pilots: do acceleration (+Gz) stresses damage the heart? *Aviat Space Environ Med*, 1997; 68(7):596-600.
- Amroliwalla FK., *Angiotensin converting enzyme (ACE) inhibitors in hypertensive aircrew.* *Aviat Space Environ Med*, 1994; 65(11):1054-1057.
- Armstrong CR., Erikson NS., *Right axis deviation as a criterion for echocardiographic evaluation of aircrew candidates.* *Aviat Space Environ Med*, 1998; 69:833-6.

- Averill KH., Lamb LE., *Electrocardiographic findings in 67,375 asymptomatic subjects: I. Incidence of abnormalities*. Am J. Cardiol. 1960; 6(1):76-83.
- Barnett SL., Lopez FM., Strader JR., et al., *Echocardiographic followup of 52 military aircrew with bicuspid aortic valve* [Abstract]. Aviat Space Environ Med. 2007; 77(3):271. Aerospace Medical Association 77th annual Scientific Meeting, may 2006.
- Bennett G., *First European workshop in aviation cardiology*. Medical-cause accidents in commercial aviation. Eur Hear J., 1992; 13 (suppl H):13-15.
- Booze CF Jr., Staggs CM., *A comparison of postmortem coronary atherosclerosis findings in general aviation pilot fatalities*. Aviat Space Environ Med, 1987, 58(4):297-300.
- Brandt MS., Morrison TO., Butler WP., *Decompression sickness rates for chamber personnel: case series from one facility*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80:570-3.
- Cambell RWF., *First European workshop in aviation cardiology*. Ventricular rhythm disturbances in the normal heart. Eur Heart J., 1992; 13(suppl H):139-143.
- Carter D., Pokroy R., Azaria B., Matetzky S., Prokopetz A., Barenboim E., et al., *Effect of G-force on bicuspid aortic valve in aviators*. Cardiology, 2006; 108:124-7.
- Carter D., Pokroy R., Azaria B., et al. *Effect of G-force on bicuspid aortic valve in aviators*. Cardiology 2006; 108(2):124-127.
- Carter D., Pokroy R., Berenboim E., Azaria B., Goldstein L., *Apical Hypertrophic cardiomyopathy and arrhythmia in military pilots*. Aviat Space Environ Med. 2006; 77:459-61.
- Celio PV., *Aeromedical disposition of arritmias and electrocardiographic findings in aircrew*. In: Lecture Series 189: Cardiopulmonary Aspects in Aerospace Medicine, AGARD-LS, 189 (NATO). Loughton, Essex, UK: Specialized Printinting Services Limited; october 1993:51, to 5-9.
- Celio PV., *Aeromedical disposition for coronary artery disease*. In: Lecture Series 189: Cardiopulmonary aspects in aerospace medicine, AGARD-LS-189(NATO). Loughton, Essex, UK: Specialized Printing Services Limited; october 1993:3-1 to 3-6.
- Chaitmain BR., Davis KB., Dodge HT., et al., *Should airline pilots be eligible to resume active flight status after coronary bypass surgery?: A CASS Registry study*. J. Am Coll Cardiol, 1989; 8(6):1318-1324.
- Chua TP., Sigwart U., *Second European Workshop in aviation cardiology*. What is acceptable revascularization of the myocardium in the context of certification to fly? Eur Hear J. 1999;1(suppl D):D78-D83.
- Dargie HJ., *First European workshop in aviation cardiology*. Late results folowing coronary artery bypass grafting. Eur Heart J., 1992;13(suppl H):89-95.
- Everett WD., *Screening for mitral valve prolapse: an analysis of benefits and costs in the U.S. Air Force*. Aviat Space Environ Med, 1989; 60:A80-8.
- Gardner RA., Kruyer WB, Pickard JS, Celio PV., *Nonsustained ventricular tachycardia in 193 U.S. military aviators: long-term follow-up*. Aviat Space Environ Med, 2000; 71:783-90.
- Georgels APM., Wellens HJJ., Vos AA., *First European workshop in aviation cardiology*. Aviation and antiarrhythmic medication. Eur Heart J., 1992; 13(suppl H):144-148.
- Gray GW., Salisbury DA., Gulino AM., *Echocardiographic and color flow Doppler findings in military pilot applicants*. Aviat Space Environ Med, 1995; 66(i):32-34.
- Gray GW., *Cardiovascular and pulmonary aspects in aerospace medicine*. AGARD LS 189. Neuilly-Sur-Seine, France: NATO-AGARD. 1993; 1-5.

- Grosgogeaert Y., Webb-peploe MM., *First European workshop in aviation cardiology*. Cardiomyopathy and aircrew fitness. Eur Hear J., 1992; 13(suppl H):103-110.
- Hardy JC., *Screening echocardiography in USAF pilot candidates (abstract)*. Aviat Space environ Med, 1998; 69(3):205.
- Hiss RG., Lamb LE., *Electrocardiographic findings in 122, 043 individuals*. Circulation 1962; 25(6):947-961.
- Hoiberg A., *Longitudinal study of cardiovascular disease in U.S. Navy pilots*. Aviat Space Environ Med, 1986; 57(5):438-442.
- Joy M., ed. *First European workshop in aviation cardiology*. Eur Heart J., 1992; 13 (Suppl H):1-175.
- Joy M., ed. *Second European workshop aviation cardiology*. Eur Heart J., 1999; 1(Suppl D): D1-D131.
- Joy M., *Cardiovascular disease*. In: Rainford DJ, Gradwell DP, eds. *Ernsting's aviation medicine*, 4th ed. London: Edward Arnold (Publishers) Ltd, 2006:567-604.
- Joy M., *First European workshop in aviation cardiology. Cardiology aspects of aviation safety-the new european perspective*. Eur Heart J., 1992; 13(suppl H):21-26.
- Kaji M., Tango T., Asukata I., et al., *Mortality experience of cockpit crewmembers from Japan Airlines*. Aviat Space Environ Med, 1993; 64(8):748-750.
- Khan MA., Amroliwalla FK., *Flying status and coronary revascularization procedures in military aviators*. Aviat Space Environ Med, 1996; 67:165-70.
- Khan MA., Amroliwalla FK., *Lipid lowering therapy and military aviators*. Aviat Space Environ Med, 1996; 67(9):867-871.
- Kruyer WB., *Cardiology*. In: Rayman RB., ed. *Clinical aviation medicine*, 4th ed. New York: Professional Publishing Group, Ltd, 2006:147-276.
- Kruyer WB., Gray GW., Leding CJ., *Clinical aerospace cardiovascular medicine*. In: DeHart RL, Davis JR., eds. *Fundamentals of aerospace medicine*, 3rd ed. Philadelphia: Lippincot Williams & Wilkins, 2002:333-361.
- Kruyer WB., Hickman JR., *Medication-induced performance decrements: Cardiovascular medications*. J Occup Med, 1990; 32(4):342-349.
- Kruyer WB., *Screening for asymptomatic coronary heart disease*. In: *Lecture Series 189: Cardiopulmonary aspects in aerospace medicine*, AGARD-LS-189 (NATO). Loughton, Essex, UK: Specialized Printing Services Limited; October 1993:2-1 to 2-5.
- Macintyre NR., Kunkler JR., Mitchel RE., et al., *Eight-year follow-up exercise electrocardiograms in healthy middle- aged aviators*. Aviat Space Environ Med, 1981; 54(4):256-259.
- Mc.Cormick TJ., Lyons TJ., *Medical causes of in flight incapacitation: USAF experience 1978-1987*. Aviat Space Environ Med, 1991; 62:884-7.
- Moorman DL., Kruyer WB., Jackson WG., *Percutaneous transluminal coronary angioplasty (PTCA): long-term outcome and aeromedical implications*. Aviat Space Environ Med, 1996; 67:990-6.
- Nakanishi K., Ohruai N., Nakata Y., Hanada Y., R., Kobayashi M., Ohashi K., *Long-term disability among aviators in Japan Air Self-Defense force: analysis of 260 cases*. Aviat Space Environ Med, 1996; 67:990-6.
- Neutel JM., Smith DH., Jankelow D., et al., *The aeromedical implications of atrial fibrillation*. Aviat Space Environ Med, 1990; 61(11):1036-1038.

- Newman DG., Callister R., *Flying experience and cardiovascular responses to rapid head-up tilt in fighter pilots*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80:723-6.
- Obel OA., Camm AJ., *Second European workshop in aviation cardiology*. Atrioventricular nodal reentry: Prevalence, presentation, management, and new strategies for intervention in the context of aviation. Eur Heart J., 1999; 1(suppl D):D98-D104.
- Osswald S., Miles R., Nixon W., et al., *Review of cardiac events in USAF aviators*. Aviat Space Environ Med, 1996; 67:1023-1027.
- Osswald SS., Gafney FA., Kruger WB., et al., *Analysis of aeromedical endpoints and evaluation in USAF aviators with mitral valve prolapse*. Aviat Space Environ Med, 1998; 69(3):250.
- Osswald S., Miles R., Nixon W., Celio P., *Review of cardiac events in USAF aviators*. Aviat Space Environ Med, 1996; 67:1023-7.
- Pedersen TR., *Second european workshops in aviation cardiology*. Lipid abnormalities in aircrew: Definition and impact on cardiovascular event rate. Eur Heart J., 1999; 1 (Suppl D):D37-D41.
- Rhodes DB., Howe B., *Lisinopril for the treatment of hypertension in USAF aircrew (abstract)*. Aviat Space Environ Med, 1997; 68(7):628.
- Richardson LA., Celio PV., *The aeromedical implications of supraventricular tachycardia*. In: *The clinical basis for aeromedical decision making*, AGARD conference proceedings 553. Hull, Quebec, Canada: Canada Communication Group; september 1994:25-1 to 25-5.
- Strader J., Adair A., Kruger W., *Efficacy of United States Air Force Pilot Applicant Screening Echocardiography* [Abstract]. Aviat Space Environ Med 2007; 78(3):319. Aerospace Medical Association 78th Annual Scientific Meeting, may 2007.
- Strader JR., Harrell TW., Adair A., Kruger WB., *Efficacy of echocardiographic screening of pilot applicants*. Aviat Space Environ Med, 2008; 79:514-7.
- Tunstall-Pedoe H., *First European workshop in aviation cardiology*. Cardiovascular risk and risk factors in the context of aircrew certification. Eur Heart J., 1992; 13(suppl H):16-20.
- Van Leusden AJ., Prendergast PR., Gray GW., *Permanent grounding and flying restrictions in Canadian Forces pilots: a 10-year review*. Aviat Space Environ Med, 1991; 62:513-6.
- Webb-People MM., *Second European workshop in aviation cardiology*. Late outcome following PTCA or coronary stenting: Implications for certification to fly. Eur Heart J., 1999; 1 (Suppl D):D67-D68.

Capítulo 7



Transporte aéreo del cardiópata

Con frecuencia se le pregunta al médico si un enfermo del corazón puede viajar en avión y, en su caso, qué precauciones debe tomar. Desde que la aviación comercial empezó a usar naves presurizadas se estableció el principio general de que "paciente que puede abordar por sí mismo el avión, paciente que puede volar". Esta afirmación se cumple en un buen número de casos, pero hay demasiadas excepciones, particularmente en enfermos cardiovasculares, cerebrovasculares, pulmonares y anémicos. Por eso es aconsejable una valoración individual antes de tomar una decisión.

En el mundo se transportan por avión cerca de 2000 millones de pasajeros al año; la mayor parte de las urgencias médicas graves a bordo, los aterrizajes no programados y muertes durante el vuelo son por causa de enfermedad cardiovascular.

Las condiciones de un vuelo normal son bien toleradas por personas sanas, incluso por el cardiópata compensado; sin embargo, hay una serie de circunstancias en el escenario de un viaje en avión que el médico debe considerar antes de emitir una opinión. A manera de ejemplo mencionaremos las siguientes.

Antes del vuelo

Es común que con motivo del viaje haya cierto grado de estrés psicológico: los aeropuertos son lugares de multitudes, el tiempo para cubrir las formalidades inherentes al vuelo es prolongado, se dan cambios frecuentes en los horarios de vuelo, a veces hay que hacer grandes recorridos en el interior de los aeropuertos, a menudo es necesario realizar esfuerzo físico adicional en el manejo de equipaje, etcétera.

Durante el vuelo

Las naves con cabina presurizada no mantienen en su interior la presión barométrica del nivel del mar. Durante el ascenso la presión dentro de la cabina va disminuyendo progresivamente hasta que se estabiliza en el vuelo de crucero en un rango de presión que va de los 1500 a los 2500 m sobre el nivel del mar; esto impone un estado de hi-

poxia ligera o moderada en la atmósfera de la cabina que produce desaturación de la sangre arterial de los pasajeros de un 7% aproximadamente. Este grado de hipoxia lo toleran satisfactoriamente los individuos sanos (incrementando el número y profundidad de las respiraciones y la frecuencia cardíaca), pero en los pacientes con restricción cardiopulmonar puede eventualmente provocar una exacerbación de su problema; esto es válido para pasajeros que proceden de zonas bajas o del nivel del mar, porque si se trata de individuos que radican en lugares de altitud media (como es el caso del altiplano de la República Mexicana) o en la gran altitud (como las poblaciones de los Andes), entonces obviamente no les afecta la ligera hipoxia en la cabina de un avión.

Los aviones de pasajeros, aun los de mayor capacidad, que realizan vuelos transoceánicos de varias horas de duración y sin posibilidad de realizar aterrizajes de emergencia, no cuentan con servicio médico formal a bordo ni con el equipo y medicamentos suficientes para afrontar con éxito los cuadros agudos cardiovasculares, aun cuando debe reconocerse que en los últimos años algunas empresas han ampliado el botiquín, el entrenamiento de su personal, la comunicación telefónica con los servicios médicos en tierra y hasta la inclusión de equipo portátil de desfibrilación cardíaca.

Los vuelos trasmeridionales, hacia el Este o hacia el Oeste, que cruzan varias zonas del tiempo en una sola jornada, producen ruptura del ritmo circadiano en los pasajeros; este hecho es de particular importancia en enfermos cardíopatas con problemas en otras áreas, los cuales requieren la aplicación de medicamentos en horarios rígidos. El cardiólogo debe orientar a su paciente para que éste pueda ir ajustando la aplicación o toma de sus medicamentos de acuerdo con el número de horas de diferencia entre el lugar de origen y el de destino. Nosotros aconsejamos que este proceso se inicie y se lleve a cabo progresivamente al llegar al lugar de destino.

Un hecho más que debe de tomarse en consideración es que la mayor parte de los aviones de pasajeros tiene asientos relativamente estrechos y las filas muy cercanas unas de otras; esto impone un grado de inmovilización importante de los pasajeros durante lapsos a veces muy prolongados. Los pacientes con edema de miembros inferiores, trastornos de la circulación venosa y factores trombogénicos están mayormente expuestos a trombosis venosas de miembros inferiores y tromboembolia pulmonar. Desde hace algunos años se reconoce el "síndrome de clase turista" o "síndrome de clase económica", que incluye agravamiento de problemas circulatorios de miembros inferiores, particularmente la trombosis de venas profundas.

Los cambios de presión barométrica que modifican importantemente el volumen de los gases contenidos en cavidades cerradas como el oído medio y senos paranasales inflamados, bulas enfisematosas y hernias encapsuladas, pueden representar un riesgo específico. La presencia de una hernia hiatal con parte del estómago en la cavidad torácica y la de un neumotórax constituirían una contraindicación formal para el vuelo, no solamente por la molestia de la expansión del gas en esos espacios, sino por el efecto que tendría sobre el corazón.

Hay otros factores del vuelo como el ruido, la vibración, las aceleraciones, las turbulencias, la baja humedad del aire dentro de la cabina, la radiación cósmica en los vuelos de gran altitud y en las rutas transpolares, la intensa luminosidad exterior, etcétera, no tienen una repercusión directa sobre el sistema cardiovascular, pero en otras áreas pueden eventualmente representar riesgos.

Después del vuelo

Además de los inconvenientes que para un enfermo cardíopata presentan los grandes aeropuertos después del vuelo, hay dos aspectos muy importantes que el cardiólogo debe tomar en consideración al hacer la valoración previa al viaje: a) el número de horas de diferencia entre el tiempo local y el del lugar de destino, porque si es más de dos o tres horas debe aconsejar a su paciente sobre la forma de ajustar los horarios para la aplicación o toma de los medicamentos; b) la altitud sobre el nivel del mar que tiene el lugar a donde se viaja, porque si el paciente parte de una zona baja o del nivel del mar y el lugar de destino está ubicado en una altitud por encima de los 2000 m sobre el nivel del mar, la hipoxia ambiental puede ser un factor de descompensación o de agravamiento de su problema.

Vamos a hacer un análisis de los padecimientos cardiovasculares que imponen en principio algunas restricciones o una contraindicación formal para realizar el viaje en avión.

Hay que recordar que las dos terceras partes de las muertes que se registran durante los vuelos en naves aéreas comerciales son debidas a problemas cardiovasculares.

Cardiopatía Isquémica

La hipoxia ligera, y en ocasiones moderada, que se encuentra en la atmósfera interior de la cabina de un avión, el enfermo y las personas sanas muy susceptibles a la hipoxia la compensan incrementando la frecuencia y profundidad de las respiraciones y la frecuencia cardíaca, esto aumenta el consumo de oxígeno, de manera que los pacientes con una reserva cardíaca limitada pueden presentar síntomas y cierto grado de descompensación. Normalmente, a bordo de las aeronaves el uso de oxígeno suplementario para enfermos está restringido por razones de seguridad, y sólo puede usarse por prescripción médica. En general, los pacientes con angina estable pueden volar a condición de que lleven consigo sus medicamentos y puedan usarlos en cualquier momento. Los pacientes con infarto del miocardio reciente y no complicado pueden volar dos o tres semanas después del inicio, y con mayor seguridad si en una prueba de esfuerzo máxima practicada entre el décimo y decimocuarto día de evolu-

ción no presenta síntomas ni signos de isquemia residual. Pacientes con infarto antiguo del miocardio en general no tienen ninguna restricción para el vuelo, a menos que haya manifestaciones de angina o disfunción ventricular. Los enfermos postoperados de corazón y de vasos con buena evolución tampoco presentan ningún riesgo particular para el vuelo. Lo mismo puede decirse de las intervenciones exitosas de angioplastia y colocación de *stents*.

Los enfermos con hipertensión arterial sistémica razonablemente controlada pueden volar teniendo cuidado de que sus medicamentos siempre estén a la mano. Los pacientes con marcapaso y desfibrilador implantable funcionando adecuadamente y con el problema clínico de base estabilizado no presentan restricción para el vuelo (su interacción con equipo electrónico y los equipos de seguridad en los aeropuertos es muy remota si el marcapaso es de configuración bipolar, aunque teóricamente existe riesgo si es de configuración unipolar). Hay que tener presente que los enfermos con tendencia a la trombosis, recién operados de cirugía mayor, traumatismos recientes en miembros inferiores o en abdomen, obesidad, embarazo, tratamiento con estrógenos y uso de anticonceptivos orales, deshidratación, inmovilización reciente, presencia de venas varicosas en miembros inferiores, etcétera, tienen mayores posibilidades de sufrir trombosis si los vuelos son prolongados y los asientos no permiten la movilización frecuente.

Debemos aclarar que no está demostrado con estudios experimentales o epidemiológicos que la hipoxia por sí misma sea un factor que propicie la trombosis, porque los pacientes que viven en la gran altitud, aquellos que presentan problemas respiratorios crónicos acompañados de hipoxia importante, y el personal de vuelo que por razones de trabajo están expuestos frecuentemente a hipoxia ligera o moderada no presentan una incidencia mayor de trombosis venosa o arterial.

Desde el punto de vista cardiovascular existen contraindicaciones formales para el vuelo, pero no necesariamente absolutas cuando del traslado en avión depende su atención adecuada y oportuna, o cuando no existe otra alternativa, menos aún si durante el vuelo se puede apoyar al paciente con recursos como oxígeno suplementario, marcapasos, medicamentos, desfibrilador, etcétera, mientras se llega al lugar de atención especializada. A continuación se mencionan algunos ejemplos de padecimientos cardiovasculares que contraindican el viaje en avión.

- a) La angina inestable es una clara contraindicación para el vuelo.
- b) El infarto del miocardio reciente y complicado y en el cual la deambulación está limitada; es aconsejable esperar un tiempo razonable para tratar de estabilizar la situación clínica.
- c) Infarto antiguo del miocardio acompañado de angina importante y disfunción del ventrículo izquierdo.
- d) Insuficiencia cardíaca congestiva de clase funcional III a IV de la NYHA.

- e) Arritmias severas no controladas o no totalmente estabilizadas.
- f) Angina residual de grado III a IV de la Asociación Canadiense de Cardiología.
- g) Procedimientos de cardiología intervencionista complicados; en estos casos se sugiere evaluación cardiovascular una o dos semanas después del procedimiento, antes de autorizar el viaje en avión.
- h) Casos operados del corazón en los cuales haya quedado aire atrapado en la cavidad torácica; el aire atrapado en cualquier cavidad incrementa su volumen hasta un 25% dentro de la cabina de un avión en el vuelo de crucero. Se aconseja esperar de 10 a 14 días antes de hacer el viaje para que el gas se reabsorba.
- i) La cardiopatía valvular sintomática es una contraindicación relativa, depende de la severidad de los síntomas y signos y otros datos, como la presencia de hipertensión arterial pulmonar y la fracción de expulsión del ventrículo izquierdo.
- j) Cardiopatías congénitas complejas con crisis intensa de cianosis e incapacidad física importante.
- k) Hipertensión arterial sistémica maligna o en fase acelerada.
- l) Anemia de menos de 8.5 gramos por 100 ml de sangre y anemia de células falciformes.
- m) Tromboembolia pulmonar en evolución o episodios repetidos de este proceso.
- n) Las personas que practican buceo a más de 10 m de profundidad no deben volar antes de 24 h de la última inmersión ni practicar ejercicio físico importante; si no se observa esta regla se corre el riesgo de sufrir durante el vuelo (o poco tiempo después) la formación de burbujas en la sangre que van a provocar embolias gaseosas en pulmón, cerebro, coronarias, etcétera.
- o) La hipertensión arterial pulmonar severa y procesos pulmonares crónicos, como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y crisis repetidas de asma, pueden comprometer importantemente la función cardíaca y pulmonar durante el vuelo; se sugiere una valoración cuidadosa cardiopulmonar antes de autorizar el viaje en avión.

En general, los botiquines que se llevan a bordo de las aeronaves comerciales son limitados, pero existe la tendencia actual de dotarlos de un buen número de medicamentos y equipo accesorio para afrontar con éxito una gran cantidad de emergencias médicas a bordo; se entrena al personal de cabina en primeros auxilios y en maniobras de reanimación cardiopulmonar; se están implementando sistemas de telecomunicación con servicios médicos en tierra para interconsulta incluso la Administración Federal de Aviación de Estados Unidos ha dispuesto que todas las aeronaves comerciales deben llevar a bordo un desfibrilador automático externo a partir del año 2004.

La *Guía médica para el viaje en avión*, publicada por la Asociación de Medicina Aeroespacial de Estados Unidos (mayo 2003), contiene las siguientes recomendaciones específicas para los enfermos cardíopatas que deben viajar en avión.

- a) Asegurar la cantidad suficiente de medicamentos para todo el viaje, incluyendo nitroglicerina sublingual, y mantenerlos siempre a la mano.
- b) Conservar aparte una lista de los medicamentos prescritos, la forma de administración y sus dosis, por si los medicamentos se extravían.
- c) Ajustar los horarios de administración de los fármacos cuando se cruzan varias zonas de tiempo, en forma paulatina, a partir del arribo al lugar de destino.
- d) Llevar consigo una copia del último electrocardiograma.
- e) Solicitar a la empresa la solución de necesidades específicas, como dieta, oxígeno de uso médico, silla de ruedas y asientos convenientes para el enfermo (al frente o cerca del baño).
- f) Evitar deambulación innecesaria, especialmente dentro del avión; de ser necesario, usar silla de ruedas o los carritos para la transportación interna en el aeropuerto.
- g) Asegurar tiempo suficiente para las conexiones.
- h) Considerar el uso de oxígeno durante el vuelo en caso de angina grado III o IV de acuerdo con la clasificación de la Sociedad Canadiense de Cardiología o cuando existe un grado de hipoxemia importante (menos de 70 mmHg de presión de oxígeno arterial).

Es preciso subrayar que estas recomendaciones no representan normas invariables o absolutas, sino que son sugerencias de tipo general, que pueden modificarse de acuerdo con la valoración individual de cada paciente.

Referencias

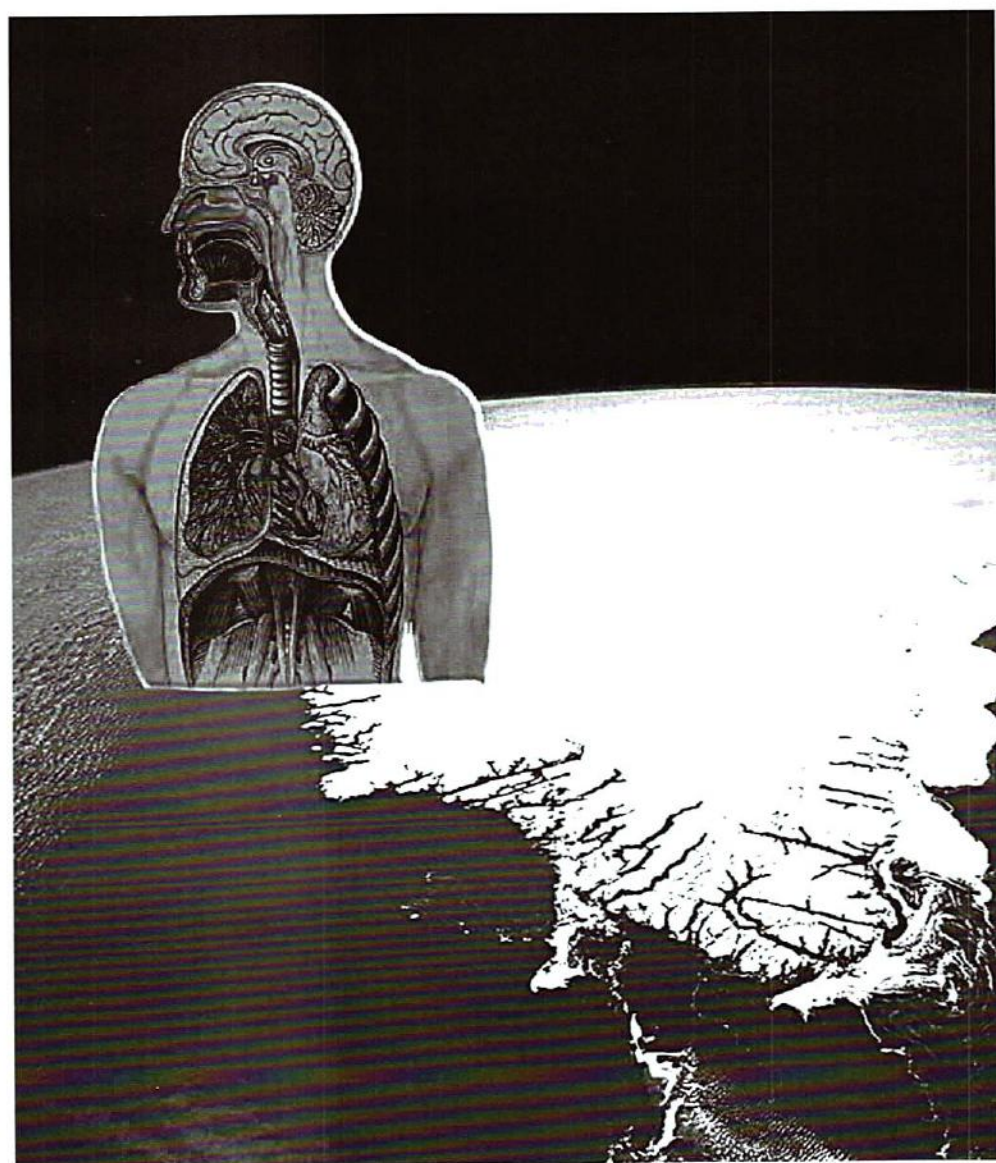
- Aerospace Medical Association, *Air Transportation Medicine Committee*. Medical guidelines for air travel. *Aviat Space Environ Med*, 1996; 67(2:Suppl.): B1-16.
- Aerospace Medical Association Task on Space Travel, *Medical guidelines for space passengers*. *Aviat Space Environ Med*, 2001; 72:948-50.
- Aerospace Medical Association, *Medical guidelines for airline travel*. Alexandria, VA: ASMA, 1997.
- Akero A., Christensen CC., Edvardsen A., Skjonsnberg OH., *Hypoxaemia in chronic obstructive pulmonary disease patients during a commercial flight*. *Eur Respir J.*, 2005; 25:725-30.
- Alexander JK., *Coronary problems associated with altitude and air travel*. *Cardiol Clin* 1995; 13:271-8.

- American Medical Association., *Medical aspects of transportation aboard commercial aircraft*. JAMA, 1982; 247:1007-11.
- Bagshaw M., Air Transport Medicine committee, Aerospace Medical Association. Traveller's thrombosis: a review of deep vein thrombosis associated with air travel. Aviat Space Environ Med, 2001; 72:848-51.
- Barry M., Bia F., *Pregnancy and travel*. JAMA, 1989; 261:728.
- Benoit R., *La maladie thrombo-embolique du voyageur: le syndrome de la classe économique (traveller's thromboembolic disease: the economy-class syndrome)*. J. Mal Vasc, 1992; 17(Suppl B):84-7.
- Bellinger R., Califf R., Mark D., et al., *Helicopter transport of patients during acute myocardial infarction*. Am J. Cardiol, 1988; 61:718-22.
- Bendz B., Rostrup M., Sevre K., et al., *Association between acute hypobaric hypoxia and activation of coagulation in human beings*. Lancet, 2000; 356:1657-8.
- Bendz B., Sandset PM., *Deep-vein thrombosis in long-haul flights*. Lancet, 2001; 358: 837-8.
- Castillo CY, Lyons TJ. The transoceanic air evacuation of unstable angina patients. Aviat Space Environ Med, 1999; 70:103-6.
- Cheung B., Duflo J., *Pre-existing pulmonary thromboembolic disease in passengers with the "economy class syndrome"*. Aviat Space Environ Med, 2001; 72:747-9.
- Connor S., Lyons TJ., *A review of United States Air Force aeromedical evacuation of acute myocardial infarction patients in Europe*. Mil Med, 1995; 160:491-3.
- Cottrell JJ., Callaghan JT., Khon GM., et al., *In-flight medical emergencies*. One year of experience with the enhanced medical kit. JAMA, 1989; 262:1653-6.
- Cottrell J., Callaghan J., Kohn G., et al., *In-Flight medical emergencies*. JAMA, 1989; 262:1653-6.
- Cox GR., Peterson J., Bouchel L., Delmas JJ., *Safety of commercial air travel following myocardial infarction*. Aviat Space Environ Med, 1996, 67:976-82.
- Cruikshank JM., Gorlin R., Jennett B., *Air travel and thrombotic episodes: the economy-class syndrome*. Lancet, 1988; 2:497-8.
- Cummins RO., Chapman PJC., Chamberlain DA., et al., *In-flight deaths during commercial air travel*. JAMA, 1988; 269:1983-8.
- Cummins RO., Schubach JA., *Frequency and types of medical emergencies among commercial air travelers*. JAMA, 1989; 261: 1295-9.
- Davies G., Degotardi P., *In-flight medical facilities*. Aviat Space Environ Med, 1982; 53:694-700.
- DeJhon C., Véronneau S., Wolbrink A., et al., *An evaluation of the U S. In-flight medical kit*. Aviat Space Environ Med, 2002; 73:496-500.
- DeJohn C., Veronneau S., Hordinsky JR., *Inflight medical care. An update*. Oklahoma city, OK: Office of Aviation Medicine Report, february, 1997. DOT/FAA/AM-97/2.
- Delaune EF., Lucas RH., Illig P., *In-flight medical events and aircraft diversions: one airline's experience*. Aviat Space Environ Med 2003; 74:62-8.
- Dillar TA., Beninati WA., Berg BW., *Air travel in patients with chronic obstructive pulmonary disease*. Arch Intern Med, 1991;151:1793-5.
- Dillard TA., Moores LK., Bilello KL., Phillips YY., *The preflight evaluation. A comparison of the hypoxia inhalation test with hypobaric exposure*. Chest, 1995; 107:352-7.

- Eklof B., Kistner RL., Masuda EM., et al., *Venous thromboembolism in association with prolonged air travel*. Dermatol Surg, 1996; 22:637-41.
- Essebag V., Lutchmedial S., Churchill-Smith M., *Safety of long distance aeromedical transport of the cardiac patient: a retrospective study*. Aviat Space Environ Med, 2001; 72:182-7.
- Forbes CD., Johnston RV., *Venous and arterial thrombosis in airline passengers*. J. Roy Soc Med, 1998; 91:565-6.
- Giangrande PL., *Air travel and thrombosis*. Int J. Clin Pract, 2001; 55:690-3.
- Gong H., *Air travel and oxygen therapy in cardiopulmonary patients*. Chest, 1992; 101:1104-13.
- Gong H., Mark JAL., Cowan MN., *Preflight medical screenings of patients: analysis of health and flight characteristics*. Chest, 1993; 104:788-94.
- Goodman PH., *Medical emergencies during air travel*. Postgrad Med, 1986; 80(8):54-66.
- Groh WJ., Boschee SA., Engelestein ED., *Interactions between electronic article surveillance systems and implantable cardioverter-defibrillators*. Circulation, 1999; 100(4):387-392.
- Hays M., *Physicians and airline medical emergencies*. Aviat Space Environ Med, 1977; 48:468-70.
- Hordinsky JR., George MH., *Response Capability during civil air carrier in-flight medical emergencies*. Aviat Space Environ Med, 1989; 60:1211-4.
- Incenogle T., *Long distance transport of cardiac patients in extremis: The Mobile Intensive care (MOBI) concept*. Aviat Space Environ Med, 1988; 59:571-4.
- Jagoda A., Pietrzak M., *Medical emergencies in commercial air travel*. Emerg Med Clin North Am, 1997; 251-9.
- JAMA Commission on Emergency Medical Services. *Medical aspects of transportation aboard commercial aircrafts*. JAMA, 1982; 247:1007-11.
- Kaplan L., Walsh D., Burney R., *Emergency aeromedical transport of patients with acute myocardial infarction*. Ann Emerg Med, 1987; 16:79-81.
- Kelly PT., Swanney MP., Secombe LM., Frampton C., Peters MJ., Beckert LE., *Air travel hypoxemia vs the hypoxia inhalation test in passengers with COPD*. Chest, 2008; 133:920-92.
- Kesteven P.J.L., Robinson B.J., *Clinical risk factors for venous thrombosis associated with air travel*. Aviat Space Environ Med, 2001; 72:125-8.
- Lapostolle F., Surget V., Borron SW., et al., *Severe pulmonary embolism associated with air travel*. N Engl J Med, 2001; 345:779-83.
- Levy Y., George J., Shoenfeld Y., *The occurrence of thromboembolic events following airplane flights - the economy class syndrome*. Isr J Med Sci, 1995; 31:621-3.
- Liznicki J., Dietzman S., Howe J., *In-flight medical emergencies*. Aviat Space Environ Med, 2000; 71:832-8.
- Medical guidelines for Air Travel*. Aviat Space Environ Med 1996; 67:B1-B16.
- Mendis S., Yach D., Alwan A., *Air travel and venous thromboembolism*. Bull World Health Organ, 2002; 80:403-6.
- Mercer A., Brown JD., *Venous thromboembolism associated with air travel: a report of 33 patients*. Aviat Space Environ Med, 1998; 69:154-7.
- Mills FJ., Harding RM., *Fitness to travel by air. Physiological considerations*. BMJ, 1983; 286:1269-71.

- Moorman DL., Kruyer WB., Jackson WG., *Percutaneous transluminal coronary angioplasty (PTCA): long-term outcome and aeromedical implications*. Aviat Space Environ Med, 1996; 67:990-6.
- Mortazavi A., Eisenberg MJ., Langleben D., Ernst P., *Altitude-related hypoxia: risk assessment and management for passengers on commercial aircraft*. Aviat Sapce Environ Med, 2003; 74:922-7.
- Newson-Smith MS. *The legal implication of pre-flight medical screening of civil airline passenger*. Aviat Space Environ Med, 1997; 68: 923-5.
- O'Rourke M., Donaldson E., Geddes J., *An airline cardiac arrest program*. Circulation 1997; 96:2849-53.
- Paganin F., Bourdé A., Yvin J-L Genin R., Guijarro J-L Bourdin A., Lasalle C., *Venous thromboembolism in passengers following a 12-h flight: a case-control study*. Aviat Space Environ Med, 2003; 74:1277-80.
- Roby H., Lee A., Hopinks A., *Safety of air travel following acute myocardial infarction*. Aviat Space Environ Med, 2002; 73:91-6.
- Ryan T., *Guidelines for the management of patients with acute myocardial infarction*. J. Am Coll Cardiol 1996; 28:1328-428.
- Sarvesvaran R., *Sudden natural deaths associated with comercial air travel*. Med Sci Law, 1986; 26:35-8.
- Secombe LM., Kelly PT., Wong CK., Roger PG., Lim S., Peters MJ., *Effect of simulated commercial flight on oxygenation in patients with interstitial lung disease and chronic comsstructive pulmonary disease*. Thorax, 2004; 59:966-70.
- Scurr JH., Machin SJ., Bailey-King S., et al., *Frequency and prevention of symptomless deep-vein thrombosis in long-haul flights: a randomized trial*. Lancet, 2001; 357:1485-9.
- Shair F., Molther SR., *Economy-class syndrome*. Aviat Space Environ Med, 1994; 65:957-60.
- Shesser R., *Medical aspects of commercial air travel*. Am J. Emerg Med, 1989; 7:216-25.
- Skjenna OW., Evans JF., Morre MS., et al., *Helping patients travel by air*. CMAJ 1991; 144:287-293.
- Spangler D., Rogers W., Gore J., et al. *Early TPA treatment and aeromidical transport of patients with acute myocardial infarction*. J. Interven Cardiol, 1991; 4:81-9.
- Speizer C., Rennie C., Brenton H., *Prevalence of in-flight medical emergencies*. Ann Emerg Med, 1989; 18:26-9.
- Stoller JK., Hoisington E., Auger G., *A comparative analysis of arranging in-flight oxygen aboard commercial air carriers*. Chest, 1999; 115:991-5.
- Wallace W., Wong T., O'Bichere A., Ellis BW., *Managing in flight emergencies*. BMJ 1985; 311:375.
- Zahger D., Leibowitz D., Tabb IK, Weiss AT., *Long-distance air travel soon after acute coronary syndrome: a prospective analysis of a triage protocol*. Am Heart J., 2000; 140:241-2.

Capítulo 8



Efectos de la fuerza de gravedad sobre el sistema cardiocirculatorio

En este capítulo analizaremos algunos cambios fisiológicos que la gravedad terrestre impone al aparato cardiovascular.

Desde que el primer homínido tomó la posición erguida (hace unos cinco millones de años) y empezó a desplazarse exclusivamente sobre sus extremidades pélvicas, adquirió muchas ventajas evolutivas sobre el resto de los antropoides. En efecto, amplió su horizonte visual y la información sobre su entorno; quedaron libres sus extremidades superiores, lo que le permitió utilizarlas para funciones más especializadas. Como consecuencia de lo anterior (o por otras razones), su cerebro empezó a incrementar su tamaño; así lo confirman los cráneos fósiles de las diferentes variedades que le sucedieron; su inteligencia fue también cada vez mayor, lo que se pone de manifiesto en el desarrollo progresivo de las diferentes culturas líticas, en las evidencias del uso de estrategias para la cacería cada vez más avanzadas, en los vestigios muy remotos del uso del fuego y de construcciones primitivas para su protección. Los sistemas muscular y esquelético experimentaron cambios de adaptación muy notables, pero sin duda el aparato cardiovascular fue uno de los que adquirió los cambios anatómicos y funcionales más importantes, orientados a contrarrestar el efecto de la fuerza gravitacional sobre las grandes columnas sanguíneas y asegurar en todo momento la perfusión sanguínea cerebral y evitar el edema en los miembros inferiores.

Ahora que el ser humano ha incursionado en el espacio exterior y ha permanecido en ausencia de gravedad durante varias semanas o meses, el aparato cardiovascular ha vuelto a experimentar modificaciones considerables que responden a un nuevo proceso de adaptación a un ámbito que le era ajeno. Para comprender mejor los ajustes fisiológicos que se operan en el aparato cardiocirculatorio en gravedad cero vamos a revisar algunos aspectos que tienen que ver con la acción de la gravedad terrestre sobre el corazón, los vasos y la circulación.

Recordemos en primer lugar que el sistema cardiocirculatorio tiene a su cargo funciones específicas que se pueden resumir en las siguientes: a) llevar el oxígeno y los nutrientes a todas las células del organismo; b) recoger el bióxido de carbono (producto de la respiración interna) y las sustancias de desecho del metabolismo y llevarlas a los órganos que se encargan de su eliminación; c) transportar y distribuir las hormonas a diferentes partes del cuerpo; d) hacer llegar los anticuerpos y las células de defensa a los sitios afectados, y e) contribuir a mantener las condiciones

apropiadas del medio interno (homeostasis) para el buen funcionamiento y supervivencia de las células y tejidos que conforman el cuerpo humano.

Para el cumplimiento de estas funciones se requiere, entre otras cosas, que la presión intravascular, el flujo, el volumen y la distribución de la sangre sea la adecuada en todas las regiones del cuerpo. La fuerza de gravedad influye en estas variables de acuerdo con la posición del cuerpo con respecto a la horizontal o la vertical. La mayor parte de los fisiólogos toman la posición de pie o sedente como referencia para el estudio de la fisiología cardiopulmonar, debido a que es en esta postura en la que pasamos la mayor parte del tiempo de nuestra vida (dos terceras partes del día en promedio.)

Son múltiples los mecanismos que intervienen en el control de la presión arterial y el flujo sanguíneo en las diferentes regiones del cuerpo. El más conocido, y quizá el más importante, es el sistema de barorreceptores o presorreceptores, que son terminaciones nerviosas ubicadas en las paredes de los senos carotídeos (pequeñas dilataciones en la bifurcación de las arterias carótidas primitivas) y en la pared de la arteria aorta.

Estas formaciones son estimuladas cuando aumenta o disminuye la presión arterial y el flujo sanguíneo sistémico. Las señales de los barorreceptores del seno carotídeo son transmitidas a través del nervio de Hering, el cual se une al glossofaríngeo, de ahí al tracto solitario y el bulbo; las señales de los barorreceptores aórticos se envían a través del nervio vago hacia la misma zona del bulbo raquídeo.

Cuando la presión arterial aumenta, sobre todo si este cambio es brusco e importante, los barorreceptores se activan y por vía refleja se produce vasodilatación periférica, bradicardia, disminución del gasto cardíaco y menor energía contráctil del corazón. Por el contrario, la caída de la PA y el flujo sistémico provoca vasoconstricción generalizada, taquicardia, lo que se traduce por aumento de la PA y el gasto cardíaco.

La habilidad de los barorreceptores para mantener la PA relativamente estable es particularmente importante en el momento en que una persona se incorpora de la posición supina o de cuclillas a la posición de pie, pues la fuerza de gravedad, actuando en el eje longitudinal del cuerpo, de la cabeza a los pies, provocaría disminución brusca de la PA y de la perfusión cerebral, y hasta la pérdida del conocimiento, si no funcionan adecuadamente estos sensores llamados barorreceptores.

Efectos de la gravedad en ortostatismo

Los numerosos estudios realizados para determinar los cambios hemodinámicos que se operan al pasar de la posición supina a la bipedestación coinciden en que por efecto de la gravedad ocurre una disminución importante de los siguientes parámetros:

- a) Retorno venoso al corazón
- b) Llenado ventricular
- c) Gasto cardíaco
- d) Volumen latido
- e) Volumen diastólico final
- f) Presión venosa central
- g) Flujo coronario
- h) Trabajo cardíaco
- i) Consumo de O_2 por el miocardio
- j) Presión arterial pulmonar

Por el contrario, se acentúan las siguientes respuestas:

- a) Vasoconstricción periférica
- b) Resistencias periféricas
- c) Frecuencia cardíaca

Al pasar de la posición de clinostatismo a la de ortostatismo se pone en juego una respuesta hormonal tendiente a elevar el volumen sistémico y reducir la *compliance* de los vasos de capacitancia, lo que se traduce por aumento del retorno venoso. En un individuo normal que se incorpora de la posición horizontal a la vertical se observa desde los primeros minutos un aumento promedio de norepinefrina de 100%, epinefrina 75%, renina 100%, aldosterona 180% y vasopresina 60%, el cortisol descende o permanece sin cambios.

La redistribución caudal de la sangre al tomar la posición ortostática provoca disminución del volumen sanguíneo torácico, reducción del diámetro de las aurículas y descenso de la presión venosa central. Clínicamente se aprecia aumento de la frecuencia cardíaca, pero la presión arterial y la presión del pulso no se modifican sustancialmente. Una respuesta similar se observa cuando se aplica presión negativa en la parte inferior del cuerpo en clinostatismo.

En una persona joven, sana, en posición de pie, sin movimiento durante algunos minutos, se registran cifras de presión arterial distintas en las diferentes partes del cuerpo. La presión arterial media en el cerebro es de unos 70 mmHg, a nivel del corazón de 100, en la división de la aorta abdominal de 140 y al nivel de la arteria pedia alcanzará aproximadamente 200 mmHg. Estas diferencias notables en la presión arterial en posición ortostática se deben exclusivamente a la acción de la gravedad terrestre sobre las columnas sanguíneas, lo que se traduce por incremento de la presión intravascular en las regiones inferiores del cuerpo; es la llamada presión hidrostática o presión gravitacional.

Por lo que respecta a las cifras de presión venosa en un individuo en ortostatismo, las diferencias son aún más notables: en el seno venoso longitudinal superior (situado en la parte más alta del cerebro) la presión es aproximadamente de menos 10 mmHg, en la desembocadura de la vena cava es de cero, a la altura del abdomen bajo de 25, en el tercio medio del muslo de 40 y en el tobillo de 90 mmHg.

Conviene aclarar que la presión venosa en las extremidades inferiores, en posición erguida, habitualmente es menor que las cifras que se han mencionado para un individuo inmóvil debido a que en movimiento las contracciones musculares exprimen el contenido de las venas, las válvulas venosas impiden el regreso de la sangre y ésta fluye continuamente hacia el corazón; por eso durante la marcha la presión venosa a nivel del tobillo es de unos 25 mmHg (en vez de 90 mmHg).

La presión capilar en ortostatismo también experimenta variaciones por efecto de la gravedad; en la cabeza es de aproximadamente 25 mmHg, a nivel del corazón de 30 y en el tobillo de 90 mmHg.

La presión arterial pulmonar en ortostatismo también sufre variaciones: en la porción central la presión sistólica pulmonar es en promedio de 25 mmHg, en los vértices de unos 10 y en las bases de aproximadamente 33 mmHg; como se ve, la diferencia de presión entre la porción más alta y la más baja del pulmón es importante.

La presión venosa pulmonar sigue el mismo comportamiento regional que la presión arterial pulmonar, es decir, es más baja en los vértices y considerablemente más alta en las bases. La presión hidrostática (presión gravitacional) determina que las venas pulmonares sean más aparentes radiológicamente en las bases.

El volumen total de sangre en un individuo de complexión media es de 4 a 4.5 litros y su distribución en las diferentes partes del cuerpo es de la siguiente manera:

Venas, vénulas y capilares venosos	64%
Arterias	13%
Arteriolas y capilares	7%
Cavidades cardíacas	7%
Vasos pulmonares	9%

El sistema venoso, sistémico y visceral, es considerado como gran reservorio de sangre que suple el volumen que en un momento dado puede requerirse en algunas regiones del cuerpo humano; por ejemplo, los sinusoides del hígado pueden descargar varios centenares de mililitros de sangre hacia la circulación general, el bazo unos 100, las grandes venas abdominales 300 y los plexos debajo de la piel pueden con-

tribuir con varios centenares de mililitros de sangre. Las cavidades cardíacas y los pulmones pueden también contribuir con 100 y 200 mililitros de sangre, respectivamente.

En posición ortostática una parte considerable del volumen sanguíneo, arterial y venoso, se acumula del diafragma hacia abajo, la diferencia es de 1 a 1½ litros más en posición de pie que en posición supina.

En párrafos anteriores se ha postulado que si un individuo permanece de pie o sentado sin moverse se acumula una gran cantidad de sangre en los miembros inferiores (300 a 550 mililitros en los vasos de capacitancia); el gasto cardíaco puede disminuir hasta el 40%, aparecen síntomas de isquemia cerebral si el flujo sanguíneo disminuye a menos del 60% del que se tiene en clinostatismo.

Pero el aparato cardiovascular tiene mecanismos de regulación que impiden, en la mayoría de los casos, una disminución importante de la presión y flujo sanguíneo cerebral. Estos mecanismos de ajuste hemodinámico, como se ha mencionado antes, son los barorreceptores situados en la bifurcación de las carótidas primitivas y en el arco aórtico; son sensores nerviosos que detectan cambios de presión y de volumen. Si desciende la presión y el volumen circulante se desencadena por vía refleja una serie de cambios que se manifiestan por vasoconstricción periférica, taquicardia, aumento del gasto cardíaco, elevación de la presión arterial e incremento rápido de las concentraciones circulantes de renina y aldosterona. Por su parte, el cerebro pone en juego mecanismos compensadores adicionales para asegurar su perfusión: la resistencia vascular cerebral disminuye; hay descenso de la presión venosa (lo que facilita la llegada de sangre al cerebro); la disminución previa del flujo sanguíneo en el encéfalo provoca el aumento de la presión parcial de bióxido de carbono y descenso de la presión parcial de oxígeno cerebral, lo que se traduce por dilatación activa de los vasos cerebrales.

Debido a la puesta en marcha de estos mecanismos autorreguladores, el flujo sanguíneo cerebral se reduce solo un 20% cuando el individuo cambia de la posición supina a la posición erguida, esto es, cuando el vector de la gravedad empieza actuar en la misma dirección de las grandes columnas sanguíneas; pero la extracción de oxígeno por unidad de sangre aumenta, el resultado neto es que el consumo de oxígeno en posición erguida y supina es prácticamente el mismo.

Lo anterior se cumple en la mayor parte de las personas normales, pero hay un pequeño porcentaje de jóvenes y niños que al permanecer mucho tiempo en posición de pie y relativamente inmóviles sufre síncope (pérdida transitoria del conocimiento) por insuficiente perfusión cerebral; basta interrumpir la acción de la gravedad sobre el eje longitudinal del cuerpo, es decir, poner al paciente en posición horizontal, para que se recupere en segundos o en pocos minutos. Otro hecho clínico frecuente es el estado lipotímico, y aun la pérdida del conocimiento, cuando una persona se incorpora de su cama por las mañanas, o al ponerse de pie después de haber estado en

cuclillas o sentado por algún tiempo. Estos eventos reproducen muy de cerca (como se verá más adelante) lo que le ocurre a un astronauta al regresar a la Tierra.

En lo que se refiere al flujo sanguíneo en la circulación pulmonar, en posición erecta y en reposo, se observa que éste es muy bajo en los vértices, pero es cinco veces mayor en las bases pulmonares; esa diferencia hemodinámica dentro del pulmón es atribuida al efecto de la gravedad. Durante el ejercicio, el flujo pulmonar aumenta considerablemente, pero el incremento ocurre fundamentalmente en las partes altas del pulmón donde aumenta siete a ocho veces el flujo normal, mientras que en las partes bajas sólo aumenta de dos a tres veces el flujo normal; esto significa que durante el ejercicio el flujo pulmonar es uniforme en toda la extensión del pulmón.

En ortostatismo, las vísceras abdominales, por su peso, jalan hacia abajo al diafragma y el vientre se abulta, la respiración se hace mediante la expansión de la caja torácica haciendo trabajar a los músculos intercostales ("respiración torácica"); radiológicamente la silueta cardiaca se verticaliza, el ápex se localiza un poco más hacia abajo, el segundo arco izquierdo se vuelve más aparente; el electrocardiograma muestra generalmente una desviación hacia la derecha del eje eléctrico y hay cambios de la onda T y el complejo QRS que se explican por el cambio de posición del corazón.

Efectos de la gravedad en clinostatismo

Los cambios hemodinámicos que se operan durante el estado de reposo en cama son similares, a veces idénticos, a los que se observan cuando el cuerpo humano flota en el agua o en el espacio exterior. Por ello, los estudios preliminares que se hacen en Tierra para conocer de antemano los efectos de la ausencia de gravedad se realizan poniendo a los sujetos de experimentación en reposo en cama con la cabeza inclinada 6° abajo de la horizontal (-6°) por periodos variables, o flotando en tanques de agua por unas horas. Tomaremos como base los resultados de los numerosos estudios que se han hecho hasta ahora colocando a sujetos sanos en reposo en cama.

Las respuestas hemodinámicas iniciales al adoptar la posición horizontal se aprecian desde los primeros minutos. Aproximadamente de 700 a 900 mililitros de sangre se redistribuyen desde la mitad inferior del cuerpo hacia la parte superior (pulmón, corazón, cuello y cabeza). Se registra un aumento del llenado cardiaco (precarga), incremento del gasto cardiaco, aumento de volumen por latido, el flujo pulmonar se eleva de un 20 a un 30%. Los barorreceptores son estimulados, sobreviene una ligera disminución de la frecuencia cardiaca y de la resistencia vascular periférica; la presión arterial se mantiene sin cambios significativos, sus cifras son similares en todas las porciones del cuerpo, lo mismo ocurre con la presión venosa.

La diuresis se incrementa en las primeras horas; llega a su máximo nivel entre las cuatro y las ocho horas, de ahí en adelante disminuye progresivamente hasta alcanzar el nivel de antes de iniciar el reposo; se registra una pérdida importante de sodio y potasio durante las primeras 24 horas, esta pérdida de agua y electrolitos a través de la orina ocurre sin incremento del reflejo de la sed ni de la ingestión de líquidos.

En las primeras cuatro a ocho horas de iniciado el reposo en cama se opera un descenso en la actividad de la renina plasmática, de la hormona antidiurética y de la aldosterona; en cambio, se observa una elevación del péptido natriurético atrial.

En los días subsecuentes continúa excretándose una mayor cantidad de potasio, la eliminación de sodio se estabiliza; la diuresis no es uniforme, pues registra episodios periódicos de una intensidad mayor, pero, en general, se mantiene en el mismo nivel durante semanas o meses; el volumen total de plasma disminuye y también decrece el volumen total de agua del cuerpo; en la orina se observan productos de catabolismo muscular.

Durante el reposo se configura un estado de hipovolemia y una disminución de la masa total de glóbulos rojos; éste es un fenómeno que se observa también al flotar en el agua y durante los vuelos espaciales, y puede contrarrestarse parcialmente practicando ejercicio físico durante los experimentos y los vuelos espaciales.

El gasto cardíaco y el volumen por latido continúan decreciendo en el transcurso de algunos días, pero se estabilizan en el nivel original algunos días después.

En los experimentos prolongados de reposo en cama se observa también una disminución del tamaño del corazón, de un 11 a un 18%; la mayor parte de los investigadores lo atribuyen a una disminución del volumen plasmático y no a una pérdida de la masa miocárdica. La contractilidad del corazón parece no alterarse significativamente, pero no hay un acuerdo definitivo en torno a este punto porque los resultados de estudios en diferentes laboratorios son a veces contradictorios.

En clinostatismo la posición del corazón es diferente a la que tiene en ortostatismo; el diafragma se eleva ligeramente, el corazón se horizontaliza y el ápex se desplaza un poco hacia arriba y a la izquierda. Durante el reposo prolongado en cama se observan algunos cambios del electrocardiograma, por ejemplo, incremento de la onda T en V_1 , descenso de la T en V_6 , aparición o incremento de la onda U en derivaciones precordiales, desplazamiento del eje eléctrico hacia la izquierda, incremento de la amplitud de la onda P en derivaciones II, III y AVF, incluso desplazamiento negativo del segmento ST e inversión de la onda T. Estos cambios del electrocardiograma en sujetos sanos sometidos a reposo prolongado en cama son atribuidos indistintamente a cambios de posición del corazón, desbalance del sistema nervioso autónomo, trastornos metabólicos del miocardio, variaciones del nivel de catecolaminas y del volumen sanguíneo. Se observa también una acentuación notable de la arritmia respiratoria normal durante las tres primeras semanas de reposo en cama, lo que se atribuye a un predominio de la función parasimpática.

En los experimentos para simular la ausencia de gravedad en tierra, se acostumbra poner a los sujetos de estudio en posición horizontal pero con una inclinación del extremo cefálico de 6° abajo debajo de la horizontal; esta postura reproduce con mayor aproximación los cambios cardiovasculares que se operan en ingravidez; en esta posición ocurren exactamente las mismas modificaciones que se han mencionado en los párrafos anteriores, pero con mayor rapidez e intensidad.

Por lo que respecta a las presiones pulmonares en posición supina, se dan también algunos cambios que son de importancia hemodinámica y clínica: la presión arterial media es de unos 20 mmHg en la arteria pulmonar, de 10 mmHg en la zona ventral (abajo del esternón) y de 30 mmHg en la parte dorsal (al nivel de la columna). La presión venosa es de 0 a nivel de la desembocadura de las venas cavas, de -10 junto al esternón y de + 10 mmHg en la región dorsal. La presión intrapleurale es de -7 a nivel del corazón, de -12 en la porción ventral y de +2 mmHg en la región dorsal. Es conveniente tomar en consideración estas diferencias de presión en los estudios hemodinámicos y en la práctica cardiológica, porque nos explican algunos datos clínicos en pacientes descompensados desde el punto de vista cardíaco.

Referencias

- Blomqvist CG., Stone HL., *Cardiovascular adjustments to gravitational stress. In: Handbook of physiology. The cardiovascular system, sect. 2, vol. III, ch. 28.* Bethesda, MD: American Physiological Society, 1983; 1025-63.
- Cirovic S., Walsh C., Fraser WD., Gulino A., *Venous filling and elastance in the positioned above and below heart level.* Aviat Space Environ Med, 2006; 77:1009-14.
- Convertino VA., *Cardiovascular consequences of bed rest: effect on maximal oxygen uptake.* Med Sci Sports Exerc, 1997; 29:191-6.
- De Groot PCE., Bleeker MWP., Hopman MTE., *Ultrasound, a reproducible method to measure conduit vein compliance.* J. Appl Physiol, 2005, 98:1878-83.
- Fluck DC., Salter C., *Effect of tilting on plasma catecholamine levels in man.* Cardiovasc Res 1973; 7:823-6.
- Foldager N., Andersen TAE., Jessen FB., *Central venous pressure in humans during gravity.* J. Appl Physiol, 1996; 81:408-12.
- Fortney SM., Schneider VS., Greenleaf JE., *The physiology of bed rest. In: Fregley MJ, Blatteis CM, eds. Handbook of physiology, environmental physiology.* Bethesda, MD: American Physiological Society; 1996: sect.4, vol. II, chapt. 39, p. 889-939.
- Halliwill JR., Minson CT., Joyner MJ., *Measurement of limb venous compliance in humans: technical considerations and physiological findings.* J. Appl Physiol, 1999; 87:1555-63.
- Katkov VE., Chestukhin VV., *Blood pressure and oxygenation in different cardiovascular compartments of normal man during postural exposures.* Aviat Space Environ Med, 1980; 51:1234-42.

- Kugler C., Strunk M., Rudofsky G., *Venous pressure dynamics of the healthy human leg*. J. Vasc Res, 2001; 38:20-9.
- Mancia G., Mark AL., *Arterial baroreflexes in humans*. In: *Handbook of physiology. The cardiovascular system*, sect. 2, vol III, ch. 20. Bethesda, MD: American Physiological Society, 1983; 755-93.
- Meck JV., Dreyer SA., Warren LE., *Long duration head-down bed rest: project overview; vital signs, and fluid balance*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80(5, Suppl.):A1-8.
- Newman DG., White SW., Callister R., *The effect of baroreflex adaptation on the dynamics cardiovascular response to head up tilt*. Aviat Space Environ Med, 2000; 71:255-9.
- Pavy-Le Traon A., Heer M., Narici MV., Rittweger J., Vernikos J., *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.
- Platts SH., Martin DS., Stenger MB., Perez SA., Ribeiro LC., Summers R., Meck JV., *Cardiovascular adaptations to long-duration head-down bed rest*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80(5, Suppl.):A29-36.
- Reschke MF., Bloomberg JJ., Paloski WH., Mulavara AP., Feiveson AH., Harm DL., *Postural reflexes, balance control, and functional mobility with long-duration head-down bed rest*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80(5, Suppl.):A45-54.
- Sagawa K., *Baroreflex control of systemic arterial pressure and vascular bed*. In: *Handbook of physiology. The cardiovascular system*, sec 2, vol. III, ch. 14. Bethesda, MD: American Physiological Society, 1983; 453-96.
- Smith JJ., Ebert TJ., *General response to orthostatic stress*. In Smith JJ., ed. *Circulatory response to upright posture*. Boca Raton: CRC Press; 1990; 1-46.

Capítulo 9



El ámbito espacial

Las condiciones físicas del espacio exterior son distintas a las del medio ambiente terrestre. El espacio cósmico es inhóspito, es incompatible con la vida. Sin embargo, con la protección de ecosistemas artificiales (trajes, naves, estaciones) el ser humano es capaz no solamente de sobrevivir, sino de realizar complejas actividades físicas e intelectuales y hasta de disfrutar su estancia fuera de la Tierra.

Las misiones espaciales tripuladas se han realizado a la fecha en tres diferentes escenarios: a) en órbita baja de la Tierra (entre 250 y 500 km de altura); b) en el espacio profundo (entre la Tierra y la Luna), y c) en la superficie lunar. En las primeras décadas del siglo **xxi** se iniciarán los vuelos tripulados interplanetarios, en particular al planeta Marte y a otras regiones del Sistema Solar.

La medicina tiene un papel fundamental en el desarrollo de los programas espaciales, porque se ocupa del cuidado de la salud y la vida de los astronautas y del estudio de los cambios anatómicos, fisiológicos y mentales que se operan en el ser humano por la influencia de los diversos factores presentes en el cosmos.

La "cardiología espacial" adquiere un rango particularmente destacado porque el aparato cardiovascular experimenta cambios muy importantes como parte de un proceso de adaptación a un ámbito que le es ajeno. Esos cambios no pueden considerarse patológicos sino adaptativos, pero al regreso a la Tierra representan un estado de desacondicionamiento cardiocirculatorio severo.

En este capítulo vamos a revisar brevemente las condiciones a las que se exponen los astronautas durante las operaciones espaciales que tienen interés para la salud y la seguridad de los viajeros cósmicos.

Ausencia de atmósfera

Mucho antes de que una nave alcance la altitud orbital baja (250 a 500 km sobre el nivel del mar) desaparece el aire, el oxígeno y, por lo mismo, la presión atmosférica; sin embargo, no se trata de un vacío absoluto, porque aun en los límites de la atmósfera superior y el espacio ultraterrestre se encuentran algunas moléculas de gas por centímetro cúbico.

El problema de la ausencia de atmósfera en el espacio exterior es resuelto artificialmente con sistemas ecológicos cerrados, como las astronaves, las estaciones y los trajes espaciales.

La pérdida de la atmósfera interior de estos sistemas de apoyo vital conduce a la anoxia y al síndrome de descompresión, cuyos efectos sobre el sistema cardiovascular son mortales.

Ausencia de gravedad

Una vez que la astronave es colocada en órbita terrestre, los tripulantes no sólo dejan de sentir el peso excesivo que les produce la aceleración, sino que lo pierden totalmente, es decir, flotan sin esfuerzo dentro de la cabina. La velocidad que requiere un vehículo para entrar en órbita terrestres es de 28 000 km/h y representa una fuerza centrífuga, y la atracción gravitacional del planeta, una fuerza centrípata; las dos son de igual magnitud pero de signo opuesto, el resultado es cero; por ello, los objetos y los astronautas mismos pierden su peso en órbita terrestre.

La ausencia de gravedad tiene otras denominaciones: gravedad cero, microgravedad, ingravidez e impesantez. Se habla de hipogravedad cuando la fuerza de atracción la ejercen cuerpos más pequeños que la Tierra, como la Luna o Marte; hipergravedad se refiere a la fuerza gravitacional de astros mayores que la Tierra, como la que ejercen los grandes planetas exteriores (Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno) y el Sol, e isogravedad cuando la fuerza gravitacional es igual o similar a la de la Tierra, como es el caso de Venus, que posee una gravedad equivalente al 80% la de la Tierra.

El aparato cardiovascular es afectado de manera importante por la ausencia de gravedad; experimenta un marcado proceso de adaptación al nuevo ambiente, pero a medida que se adapta a la ingravidez, se desadapta al campo gravitacional de la Tierra. Sin duda, durante los vuelos espaciales la microgravedad o ausencia de gravedad es el factor que más influye en los cambios anatómicos y funcionales, como se verá en el capítulo siguiente.

Radiación cósmica

Se trata de un factor de riesgo muy importante para la salud y la vida de los astronautas y para los residentes de las bases espaciales del futuro. Todas las formas de vida en nuestro planeta están protegidas contra la radiación cósmica por la atmósfera y el campo magnético terrestre. Un ser humano expuesto sin la debida protección a la acción directa de los rayos cósmicos moriría en unos minutos.

Hay dos tipos de radiación en el cosmos: a) corpuscular, es decir, partículas cargadas de energía como protones (núcleos de hidrógeno), núcleos de helio (partículas alfa), electrones (rayos beta), neutrones y núcleos de elementos mas pesados; b) electromagnética, constituida por diversos tipos de energía que se trasmite en el vacío en forma ondulatoria a 300 000 km/s, como las ondas de radio, microondas, luz infrarroja, luz visible, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma, algunas de las cuales, a su paso por un cuerpo sólido, líquido o gaseoso le tramiten energía y pueden desorganizar su estructura atómica y molecular.

La radiación corpuscular en el ámbito de las operaciones espaciales tiene tres fuentes de origen: las estrellas (y galaxias lejanas), el Sol y los cinturones de Van Allen. La radiación que tiene su origen fuera del Sistema Solar es conocida como radiación cósmica galáctica y está formada por protones (núcleos de hidrógeno), 85%; núcleos de helio (partículas alfa), 14%, y núcleos de otros elementos más pesados, 1%. Son partículas animadas de gran velocidad y cargadas de enorme energía, llamados también "rayos cósmicos primarios", y llegan a la Tierra desde todas direcciones; afortunadamente su cantidad es relativamente pequeña en el espacio profundo, por lo que puede tolerarse durante periodos prolongados con la protección actualmente disponible.

La radiación procedente del Sol, la radiación cósmica solar, llega a la Tierra en forma de "viento solar"; es el flujo constante de material ionizado que el Sol esparce radialmente al espacio interplanetario y está formado por protones, núcleos de helio y núcleos de otros elementos (oxígeno, magnesio, silicio, calcio, carbono, hierro, etcétera.) y electrones. Las partículas de origen solar son mucho más abundantes que las que vienen de otras estrellas; tienen una velocidad menor (400 a 500 km/s) y buena parte de esta radiación es rechazada, transformada por la atmósfera o retenida por el campo magnético terrestre. Cada once años el Sol entra en un estado de hiperactividad, lo que se manifiesta por la aparición de "manchas solares" seguidas por explosiones gigantescas en su superficie en forma de protuberancias y fulgores, los cuales lanzan al espacio inmensas cantidades de material ionizado durante varios días. Estas emisiones hacen elevar de manera importante el nivel de radiación en el espacio interplanetario y representan un serio peligro para los astronautas. Para su protección, se han asignado áreas especiales dentro de las naves y diseñado trajes con material protector adicional. Debe aclararse que a la fecha no se han registrado dosis excesivas de radiación cósmica en ningún astronauta, ni siquiera en los vuelos a la Luna ni en las misiones de larga duración del programa ruso.

Una fuente más de radiación se encuentra en los cinturones de Van Allen, que son acúmulos circulares de partículas cargadas de energía situados por encima del ecuador terrestre. Existe un cinturón interno situado entre los 1000 y 10 000 km de altura, que contiene principalmente protones, y un cinturón externo constituido principalmente de electrones y se extiende a varios miles de km de altura. Existe una

zona de radiación que desciende hasta 200 km sobre el nivel del mar llamada Anomalía del Atlántico Sur; las naves espaciales en vuelos orbitales suelen desplazarse entre los 250 y 500 km de altura, y con frecuencia cruzan esta zona, lo que ha ocasionado que la mayor parte de la radiación recibida por los astronautas sea precisamente en esta anomalía, situada frente a Brasil.

Las naves Apolo que fueron a la Luna tuvieron que atravesar los cinturones de Van Allen al salir y al regresar, y se observó que la mayor cantidad de radiación recibida por los astronautas en esas misiones fue justamente al cruzar estos cinturones.

Como parte de la radiación corpuscular se encuentran también neutrones libres (partículas formadas por un protón y un electrón) que se originan por la interacción nuclear de las partículas cósmicas primarias con los materiales de las astronaves y los componentes de la atmósfera. Aunque su vida media es de sólo 11 minutos, su inestabilidad y la alta probabilidad de intercambiar energía al chocar con un núcleo de hidrógeno los hace de particular interés biomédico, pues el cuerpo humano contiene gran cantidad de hidrógeno en las grasas, las proteínas y el agua. Sin embargo, las determinaciones que se han hecho del flujo de neutrones dentro de las naves de las diferentes misiones espaciales no son tan altas como para considerarlas un peligro biológico importante.

Por lo que concierne a la radiación electromagnética (ondas de radio, microondas, luz infrarroja, luz visible, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma) sólo mencionaremos que en el espacio profundo alcanza valores muy superiores a los que se reciben en la superficie terrestre. La luz visible, las microondas y las ondas de radio cruzan la atmósfera; los rayos gamma y los rayos X son absorbidos por la atmósfera; y la luz infrarroja y ultravioleta llegan al nivel del mar en una proporción relativamente pequeña, la mayor parte es absorbida o rechazada por la atmósfera.

Si bien la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma son terriblemente nocivos para la materia viviente en las dosis que registra el espacio ultraterrestre, la pared de las naves y trajes espaciales ofrecen una adecuada protección contra esta radiación ionizante.

La temperatura

La luz infrarroja (rayos infrarrojos o rayos calóricos) es la parte del espectro electromagnético que transmite el calor del Sol; este tipo de radiación no es percibida por el ojo humano, pero puede captarse con cámaras especiales y telescopios de luz infrarroja. Al igual que la luz visible, disminuye de intensidad a medida que aumenta la distancia al Sol. En las proximidades de la Tierra su efecto es de dos calorías por centímetro cuadrado por minuto (constante calórica solar). En la tabla 1 se expresan

las estimaciones de los científicos H. Strughold y O. Ritter sobre la intensidad del calor procedente del Sol en la proximidad de cada planeta.

Tabla 1. Constante calórica solar de los planetas

Mercurio	13	cal/cm ² /min
Venus	4	cal/cm ² /min
Tierra	2	cal/cm ² /min
Marte	1	cal/cm ² /min
Júpiter	0.07	cal/cm ² /min
Saturno	0.02	cal/cm ² /min
Urano	0.005	cal/cm ² /min
Neptuno	0.002	cal/cm ² /min

En razón de la gran diferencia regional de la temperatura en el espacio interplanetario pueden establecerse tres zonas térmicas, a saber: eutérmica, comprendida entre Venus y Marte; hipertérmica, entre Venus y el Sol, e hipotérmica, entre Marte y Neptuno. Esta división no es meramente académica, tiene su importancia práctica y operativa, pues el diseño de las naves espaciales y sus sistemas de apoyo vital deberán considerar el ambiente térmico de la región donde operarán.

Con la sola excepción de Venus, que conserva una elevada temperatura por el efecto de invernadero que ejerce la espesa capa de nubes que lo envuelve, la temperatura media aproximada de la superficie de los diferentes planetas va disminuyendo a medida que se incrementa la distancia al Sol, como se expresa en la tabla 2, según H. Strughold y O. Ritter.

En el espacio exterior la superficie de los objetos que reciben directamente la luz del Sol intensifican su temperatura; al contrario, en la parte sombreada la temperatura desciende casi al cero absoluto; lo anterior obedece a la ausencia de los gases (aire, vapor de agua y bióxido de carbono) que regulan la temperatura en la atmósfera terrestre.

Tabla 2. Temperatura promedio en la superficie de los planetas del sistema solar

Mercurio	+ 350 °C
Venus	+ 480 °C
Tierra	+ 15 °C
Marte	- 23 °C
Júpiter	- 150 °C
Saturno	- 180 °C
Urano	- 210 °C
Neptuno	- 220 °C

Aun cuando los astronautas cuentan con sistemas activos de control de la temperatura interior, existe también un sistema pasivo para regularla, el cual consiste en girar el vehículo sobre su eje longitudinal para repartir uniformemente el calor solar; es lo que se conoce coloquialmente como "rostar el pollo". Este procedimiento se usó para controlar pasivamente la temperatura de las naves Apolo durante su trayecto a la Luna y el regreso.

Si bien los astronautas son expuestos a temperaturas extremas como parte de su entrenamiento en tierra, a la fecha no se han registrado episodios de frío o calor intenso, excepto durante el vuelo de Apolo 13, en el que los tripulantes sufrieron temperaturas muy bajas en el módulo lunar donde se refugiaron, y ocasionalmente elevación de la temperatura, como la ocurrida durante la misión Skylab 2, y en algunas ocasiones en el interior de la estación Mir.

Luminosidad

Del amplio espectro de la radiación electromagnética, la retina humana sólo percibe una porción muy estrecha: la luz visible; en cambio, le pasan inadvertidas las ondas de radio, las microondas, la luz infrarroja, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Los telescopios modernos, contruidos con sensores especiales para cada una de estas variedades de radiación, han perfeccionado la observación del Universo y precisado aspectos muy importantes que escapan a los telescopios de observación visual. Como el ojo humano sólo logra identificar la estrecha banda de la luz visible, puede decirse que vemos el mundo que nos rodea y el firmamento a través de una "hendidura", de ahí nace la apreciación de que si la raza humana fuera galáctica sería declarada legalmente ciega, o en el mejor de los casos, seriamente incapacitada visualmente. Así y todo, el aparato visual es el único órgano sensorial de que disponen los astronautas para su orientación en el espacio.

La luz visible es un haz de fotones, una forma de la energía que incluye los siete colores del arcoiris. La luz nos llega del Sol en proporción muy elevada, sólo una cantidad mínima procede de las estrellas de la Vía Láctea; viaja en el espacio interplanetario a la velocidad de 300 000 km/s; su rango de frecuencia está entre los 3800 y 1000 angstroms.¹ Por no existir aire en el espacio abierto, la luz no es dispersada, por lo que el firmamento aparece completamente negro, aun cuando los astros se observan más brillantes, más grandes y más nítidos.

La intensidad de la luz en el sistema planetario decrece en razón directa al cuadrado de la distancia al Sol, por ello, la luz que reciben los planetas interiores es considerablemente superior a la que llega a los planetas más alejados; en efecto, de

¹ Un ángstrom es la diezmillonésima de un milímetro.

acuerdo con los cálculos de los investigadores H. Strughold y O. Ritter, la intensidad de luz solar en el límite superior de la atmósfera de los diferentes planetas sería la que se expresa en la tabla 3.

Ciclo día/noche

La luz ambiental es uno de los factores que más influyen en la fisiología humana; el ciclo día-noche terrestre ha impuesto a los seres vivos el ritmo biológico diario o ritmo circadiano; existen otros ritmos biológicos de mayor duración, como los que se repiten cada mes, cada estación del año y otros; también los hay ultradianos, es decir, los que se repiten varias veces durante el lapso de 24 horas, como los cambios de temperatura corporal, el apetito, etcétera.

El ritmo circadiano es el más estudiado y mejor conocido de todos los ritmos biológicos; ahora se sabe que prácticamente todas las funciones orgánicas están sincronizadas con el ciclo día-noche terrestre. En particular, los parámetros fisiológicos cardiovasculares y la presentación o agravamiento de las enfermedades cardíacas guardan una clara relación con ciertas fases del ciclo de 24 horas.

El periodo día-noche natural se modifica de manera importante en el ámbito espacial; en efecto, las naves y estaciones en órbita terrestres baja tienen un ciclo día-noche de 90 minutos (45 de noche y 45 de día); en órbita lunar es de dos horas; en la superficie de la Luna de 28 días; en trayectoria interplanetaria desaparece el día y la noche, pero se crea un nuevo ciclo cuando se hace girar el vehículo espacial sobre un eje para repartir la temperatura uniformemente en su superficie (a las naves Apolo se les daba un giro completo cada hora); así, en general, se tienen diferentes perio-

Tabla 3. Intensidad de la luz solar en la proximidad de los planetas

Mercurio	940 000	lux ²
Venus	270 000	lux
Tierra	140 000	lux
Marte	60 000	lux
Júpiter	5200	lux
Saturno	1510	lux
Urano	380	lux
Neptuno	155	lux

Tabla 4. Duración del día de los planetas del sistema solar

Mercurio	58.6 días terrestres
Venus	243 días terrestres
La Luna	28 días terrestres
Marte	24.6 horas
Júpiter	9.9 horas
Saturno	10.6 horas
Urano	17.2 horas
Neptuno	10 horas

² Un lux es la intensidad de la luz que emite una bujía (vela) a un metro de distancia en un cuarto oscuro.

dos de luz y de sombra de acuerdo con la velocidad de giro de los diferentes cuerpos celestes.

Sólo existe un planeta en el Sistema Solar que tiene un día casi igual al de la Tierra, éste es Marte, con un día de 24 horas y 37 minutos. Ésta es una de las razones, entre muchas otras, que convierten a este planeta en un objetivo prioritario de los futuros proyectos de exploración cósmica.

La ruptura del ritmo circadiano por las razones que se han mencionado se evita creando artificialmente ciclos de luz y oscuridad con una duración similar al día y la noche terrestre dentro de las astronaves.

Campos magnéticos

Dentro de los límites del Sistema Solar las sondas de exploración cósmica no tripuladas han identificado campos magnéticos bien definidos en los diferentes planetas; se conocen sus dimensiones, su extensión, su intensidad y el componente de radiación atrapada en cada uno de ellos. Las astronaves tripuladas del futuro cruzarán algunos de esos campos, de hecho, el campo magnético terrestre fue atravesado por nueve vehículos Apolo, con tres tripulantes cada uno, de ida y regreso, con la consecuencia de que en los pocos minutos que duró la travesía de los cinturones de Van Allen recibieron más radiación ionizante que en toda la misión. Un campo magnético planetario es de la misma naturaleza que el que desarrolla una pequeña barra de hierro imantada; se originan por la rotación de los planetas y el movimiento de grandes masas metálicas en su interior, las cuales genera fuerzas que se disponen en forma de arco alrededor de los astros y actúan sobre partículas cargadas eléctricamente, provocando que se muevan continuamente de un polo a otro.

Sin pretender entrar en detalle sobre las características de los campos magnéticos de los diferentes planetas, mencionaremos solamente que la Luna, Mercurio, Venus y Marte poseen campos magnéticos tan débiles que no representan ningún riesgo para los seres humanos que se expongan a ellos; en cambio, los poderosos campos magnéticos de los grandes planetas exteriores merecen estudio especial. El campo de Júpiter, por ejemplo, es 4000 veces más poderoso que el de la Tierra; en la parte iluminada se extiende de cuatro a ocho millones de km y el lado opuesto va mucho más lejos; dentro de sus límites atrapa una cantidad inmensa de radiación ionizada. Saturno, Urano y Neptuno desarrollan, por su parte, campos magnéticos muy extensos que retienen importante cantidad de material energético. El Sol también produce numerosos campos magnéticos regionales cargados de radiación ionizada. Las naves espaciales tripuladas deberán eludir estas regiones cargadas de radiación cósmica.

Los estudios experimentales en los que se crean campos magnéticos similares a los que poseen Mercurio, Venus, la Luna y Marte no revelan cambios en la fisiología humana; sin embargo, aún no están bien definidas las consecuencias de campos de mayor intensidad. Lo que se ha observado con claridad es que durante las tormentas solares el campo magnético terrestre sufre trastornos que se traducen, entre otras cosas, por lo siguiente: a) trastornos de los generadores eléctricos, de las corrientes de alta tensión, de las brújulas y de las transmisiones de radio de onda corta y TV; b) cambios severos del clima, precipitaciones pluviales intensas o sequías prolongadas; c) desarreglos de la fisiología de los seres vivos, como es el hecho de que las aves migratorias y las palomas mensajeras pierden el rumbo; d) los trastornos mentales se incrementan y los del ritmo cardíaco suelen aparecer o agravarse; e) las epidemias son más graves, por ejemplo, la influenza, la salmonelosis, el cólera y otras.

Campos gravitacionales

La ley de gravitación universal establece: "Los cuerpos en el Universo se atraen en razón directa de sus masas e inversamente proporcional al cuadro de la distancia que los separa", así que cuanto mayor es la masa de un objeto, mayor es su fuerza de atracción. El Sol, en razón de su gran masa, tiene una fuerza gravitacional superior a la de Júpiter (que por sí sólo tiene mayor masa que todos los demás planetas juntos).

La fuerza de atracción de un cuerpo disminuye geométricamente con la distancia, por ello, un hombre que pese en la Tierra 70 kg, a 6500 km de altura pesará 17 kg; a 13 000 km se reducirá a 7.5 kg; y a 58 000 km su peso será sólo de 700 gramos.

El espacio sobre el que un cuerpo celeste ejerce su fuerza de atracción se llama graviósfera; ésta es más amplia cuanto mayor es la masa del planeta, pero la influencia del campo gravitacional del Sol modifica esta relación, por ejemplo, Mercurio y Plutón son de un tamaño similar, pero mientras que el primero tiene una graviósfera de 200 mil km de radio, la del segundo alcanza un radio de 50 millones de km. De acuerdo con su masa y su distancia al Sol, el campo gravitacional de los diferentes planetas alcanza las dimensiones que se expresa en la tabla 5, según Strughold y Ritter.

Tabla 5. Campos gravitacionales (graviósfera) de los planetas

Mercurio	220 000 km radio
Venus	1 000 000 km radio
Tierra	1 500 000 km radio
Marte	500 000 km radio
Júpiter	53 000 000 km radio
Saturno	65 000 000 km radio
Urano	116 000 000 km radio
Neptuno	70 000 000 km radio
Plutón	50 000 000 km radio

Material disperso

En el espacio interplanetario existe material disperso consistente en polvo, micrometeoroides, meteoroides, asteroides y cometas.

El *polvo cósmico* es producto de colisiones entre meteoroides y asteroides y a la cauda de partículas que los cometas van dejando en sus largos recorridos alrededor del Sol. Aunque en las cercanías de la Tierra las partículas de polvo están distantes varios metros unas de otras, su presencia puede destacarse como un tenue resplandor hacia el oriente antes del amanecer y en el poniente después del crepúsculo; a ese fenómeno se le conoce como "luz zodiacal".

Los micrometeoroides son granitos de roca, de metal o de una mezcla de ambos que se originan de la misma manera que el polvo cósmico. No son muy abundantes, pero la cubierta de las naves espaciales exhiben varios impactos de micrometeoros a su regreso. Su tamaño va de 0.1 a 1 mm de diámetro, aunque los hay también de 0.1 a 1 cm de diámetro.

Atmósferas planetarias

Cuando se analizan las características de los planetas del Sistema Solar habitualmente se les divide en dos grupos: a) planetas interiores (o "terrestres") formado por Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, y b) planetas exteriores (o gigantes gaseosos) integrado por Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno (Plutón no clasifica en ninguno de los dos grupos, pues más bien tiene las propiedades de una luna de los planetas exteriores).

Ningún planeta del Sistema Solar tiene una atmósfera similar a la de la Tierra y ninguno es habitable sin la protección adecuada, pues sus atmósferas se sitúan en los dos extremos: demasiado tenues o excesivamente pesadas y turbulentas.

Haremos primero una breve descripción de las atmósferas y las condiciones generales que privan en la superficie de los planetas interiores y la Luna.

- *Mercurio.* Este planeta virtualmente carece de atmósfera, la pequeñísima cantidad de gas que se ha detectado a su alrededor está formada casi exclusivamente de helio (98%), hidrógeno y argón; está erizado de cráteres como la Luna; por estar cerca del Sol y no poseer atmósfera, la temperatura en el día alcanza 350 °C y en la noche desciende a -170 °C; por carecer también de campo magnético, la radiación cósmica llega a su superficie con toda su intensidad; su día es de 59 días terrestres, su año de 89 días; su día, pues, ocupa las dos terceras partes de su año; la atracción gravitacional en su superficie es el 17% de la gravedad terrestre.

- *Venus*. Es el más parecido a la Tierra en cuanto a su tamaño y masa (80% la de la Tierra), pero presenta muchas diferencias, a saber: su atmósfera es de 90 a 100 veces más pesada que la terrestre; está constituida de bióxido de carbono en el 96%, nitrógeno 3.45 y el resto por bióxido de azufre y oxígeno; existe vapor de agua en las partes superiores de la atmósfera que al combinarse con el óxido de azufre forma ácido sulfúrico, el cual queda suspendido en las nubes en forma de aerosol y es lo que le da su color amarillento; la espesa capa de nubes sufre desplazamientos laterales por vientos que se mueven desde la región ecuatorial a más de 300 km/h; la temperatura en la superficie va de 480 a 500 °C (por efecto de invernadero que ejercen las nubes); su superficie es pedregosa o cubierta de lava, destacándose grandes planicies y montañas más elevadas que los Himalaya. Hay dos aspectos sorprendentes del planeta Venus: su día (de 243 días terrestres) es más largo que su año (224 días terrestres) debido a que el giro sobre su eje lo hace demasiado lento; además, lo ejecuta en sentido contrario a como lo hacen el Sol y los demás planetas, es decir, gira hacia el Oeste en el plano de la eclíptica.

En la atmósfera de Venus se registra una intensísima actividad eléctrica, pues en un área limitada se producen hasta 25 relámpagos por segundo. Venus no es un objetivo inmediato para el establecimiento de bases habitadas, en virtud de las características inhóspitas de su atmósfera.

- *La Luna*. Por su tamaño es la sexta luna en el Sistema Solar (su diámetro es de 3476 km); su distancia a la Tierra es en promedio de 386 000 km; su día y su mes son iguales (cerca de 28 días terrestres), porque el giro sobre su eje lo hace en el mismo lapso que el recorrido de la órbita alrededor de la Tierra, con la consecuencia de que siempre presenta el mismo hemisferio y que el día y la noche lunar son de 14 días terrestres cada uno; la superficie selenita está cubierta de una capa de polvo gris oscuro de unos 5 cm de espesor; no posee atmósfera ni campo magnético, por lo que la radiación cósmica penetra libremente; la temperatura máxima en el día lunar es de 137 °C y la mínima en la noche es de menos 134 °C; su fuerza gravitacional es el 16% la de la Tierra, por lo que un ser humano de 70 kg pesará allá sólo 11 kg. La Luna es un lugar muy atractivo para el aprovechamiento de sus recursos naturales y el establecimiento de industrias, estaciones de energía solar, centros mineros, puertos espaciales y observatorios astronómicos.
- *Marte*. El arribo de las primeras naves tripuladas a Marte está previsto para el final de la tercera década del presente siglo; se trata del inicio de una de las empresas de la mayor importancia para el futuro de la Humanidad.

Marte es en muchos sentidos el planeta más parecido a la Tierra, y lo fue más hace 3000 y 4000 millones de años aproximadamente, cuando contó con una atmósfera húmeda y tibia similar a la de la Tierra. Ahora su atmósfera

es 100 veces menor que la de nuestro planeta; la densidad, temperatura y presión en la parte más baja de la atmósfera marciana es comparable a la que tiene la atmósfera terrestre a los 30 o 40 km de altura.

La atmósfera de Marte está compuesta básicamente por dos gases: el bióxido de carbono (95.3%) y el nitrógeno (2.7%); el resto lo forman varios elementos entre los que destacan el argón (1.6%), el oxígeno (1.3%) y el monóxido de carbono (0.7%), y el vapor de agua ocupa el 0.03%. Se estima que en sus orígenes Marte tuvo una atmósfera tibia compuesta de bióxido de carbono y agua, y permitió la existencia de agua líquida.

El cielo se ve de color naranja o rojizo debido a la presencia de polvo de óxido ferroso; se observan tenues nubes de vapor de agua y de bióxido de carbono; se registran vientos leves, como suave brisa, pero en ocasiones soplan vientos hasta de 300 km/h, y aun verdaderas tempestades que cubren de polvo todo el planeta; en el fondo de los valles se forman masas de bruma al calentar el sol por las mañanas, lo cual se debe a la evaporación de la escarcha que se precipita por las noches. La temperatura global media es de 23 °C bajo cero, pero en los polos desciende a 90 °C bajo cero, y a la mitad del verano puede llegar a niveles por encima de 0 °C.

Marte contiene agua en los polos y se estima que existen verdaderos océanos de agua congelada bajo la superficie. Hay señales geológicas en abundancia que atestiguan que en el pasado lejano el planeta rojo fue asiento de ríos caudalosos y lagos extensos.

El terreno marciano presenta ciertas similitudes con el terrestre; es rojizo pedregoso, como el desierto de Arizona, pero lo diferencian, entre otras cosas, la ausencia de vida, la presencia de cañones gigantescos de hasta 200 km de ancho y 8 km de profundidad y la existencia del volcán más grande del Sistema Solar, el Monte Olimpo, de 25 km de alto, con un cráter de 70 km de diámetro y una base de 500 km de diámetro.

El ciclo día/noche de Marte es casi igual al terrestre, pues su duración es de 24 horas y 37 minutos; la inclinación de su eje de rotación sobre el plano de la eclíptica también es similar al de la Tierra, por lo que se dan las cuatro estaciones del año pero más prolongadas, porque su órbita alrededor del Sol está más distante que la de nuestro planeta; su año dura 687 días terrestres.

Marte es el planeta con mayores posibilidades de ser visitado y, eventualmente, de ser poblado por el hombre y algunas especies animales y vegetales; por supuesto, las bases marcianas requerirán de sistemas ecológicos cerrados o una modificación de su atmósfera, procedimiento que está en la actualidad en estudio. Se estima que Marte, con un 38% de la gravedad terrestre, no impondrá riesgos ni modificaciones sustanciales al aparato cardiovascular humano.

- *Los planetas exteriores.* La atmósfera de los cuatro "gigantes gaseosos" (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) son entre sí muy similares y están formadas por hidrógeno, helio, amonio, metano, agua y CO_2 . Con algunas peculiaridades en algunos de ellos, todos poseen atmósferas voluminosas, muy turbulentas, los vientos alcanzan velocidades que van de 300 a 1800 km/h; estos gigantes gaseoso giran muy rápido sobre su eje de rotación, y paralelamente al ecuador se disponen bandas de nubes huracanadas.

La estructura general de los grandes planetas exteriores consiste de un núcleo rocoso envuelto por tres capas: una interna de agua y amonio congelado; otra media de hidrógeno metálico e hidrógeno molecular líquido y, rodeando a éstas, una capa gaseosa, la atmósfera propiamente dicha, que es mucho más pesada y densa que la atmósfera terrestre.

Como se ve, estos planetas no ofrecen una superficie de sustentación; sus atmósferas son incompatibles con la vida, sus vientos tienen una violencia extrema, y sus campos magnéticos y gravitacionales son notoriamente superiores a los de la Tierra. La exploración de estos cuerpos celestes es a través de sondas y pruebas automáticas, como las naves Pionero X y XI, Viajero I y II, Galileo (Júpiter) y Cassini (Saturno).

- *Lunas de los planetas exteriores.* Los satélites más grandes de cada uno de los cuatro "gigantes gaseosos" están compuestas de un núcleo rocoso rodeado de una gruesa capa de agua congelada; carecen de atmósfera (excepto la luna Io de Júpiter y Titán de Saturno), su superficie está erizada de cráteres y su temperatura extremadamente baja.

La mayor parte de estas lunas no tiene por ahora otro atractivo que el de ser grandes depósitos de agua congelada; sin embargo, entre ellas hay tres con características muy peculiares que serán sin duda objetivos interesantes en las próximas décadas. Nos referimos a la luna Io de Júpiter, la cual posee una corteza de azufre de 19 km de espesor que flota en un inmenso océano de azufre fundido; esta sustancia imprime a su superficie un color que varía del rojo al amarillo, "como una pizza", al decir de los astrofísicos. Otro hecho sorprendente es que se trata del objeto celeste con mayor actividad volcánica en el Sistema Solar, pues las naves Viajero I y II, en 1979, fotografiaron ocho volcanes en plena actividad al mismo tiempo, cuyas plumas alcanzaban de 70 a 300 km de altura, y es el más grande depósito de azufre conocido; es un sitio de particular interés en virtud de que el azufre forma parte importante de diversos procesos industriales.

La luna Europa de Júpiter es por ahora un objeto de gran atractivo en la investigación de vida extraterrestre, pues está cubierta de una capa de hielo con grietas gigantescas que exhiben un color oscuro y en las profundidades océanos de agua líquida y quizá alguna forma de vida.

La luna Titán de Saturno es otro de los objetos interesantes del sistema planetario, pues es la única luna que posee atmósfera, la cuál está constituida por sustancias que se consideran precursoras de la vida en la Tierra; contiene 94% de nitrógeno (la atmósfera terrestre está formada en el 79% por este gas) y el 6% es una mezcla de gases como el metano, etano, acetileno, etileno, cianuro de hidrógeno y otros. Hacia los 40 km de altura existen espesas nubes de metano y más arriba, a los 300 km de altitud, se identifica una densa zona brumosa de hidrocarburos. Al parecer la superficie de Titán está cubierta por lagos o mares de metano líquido.

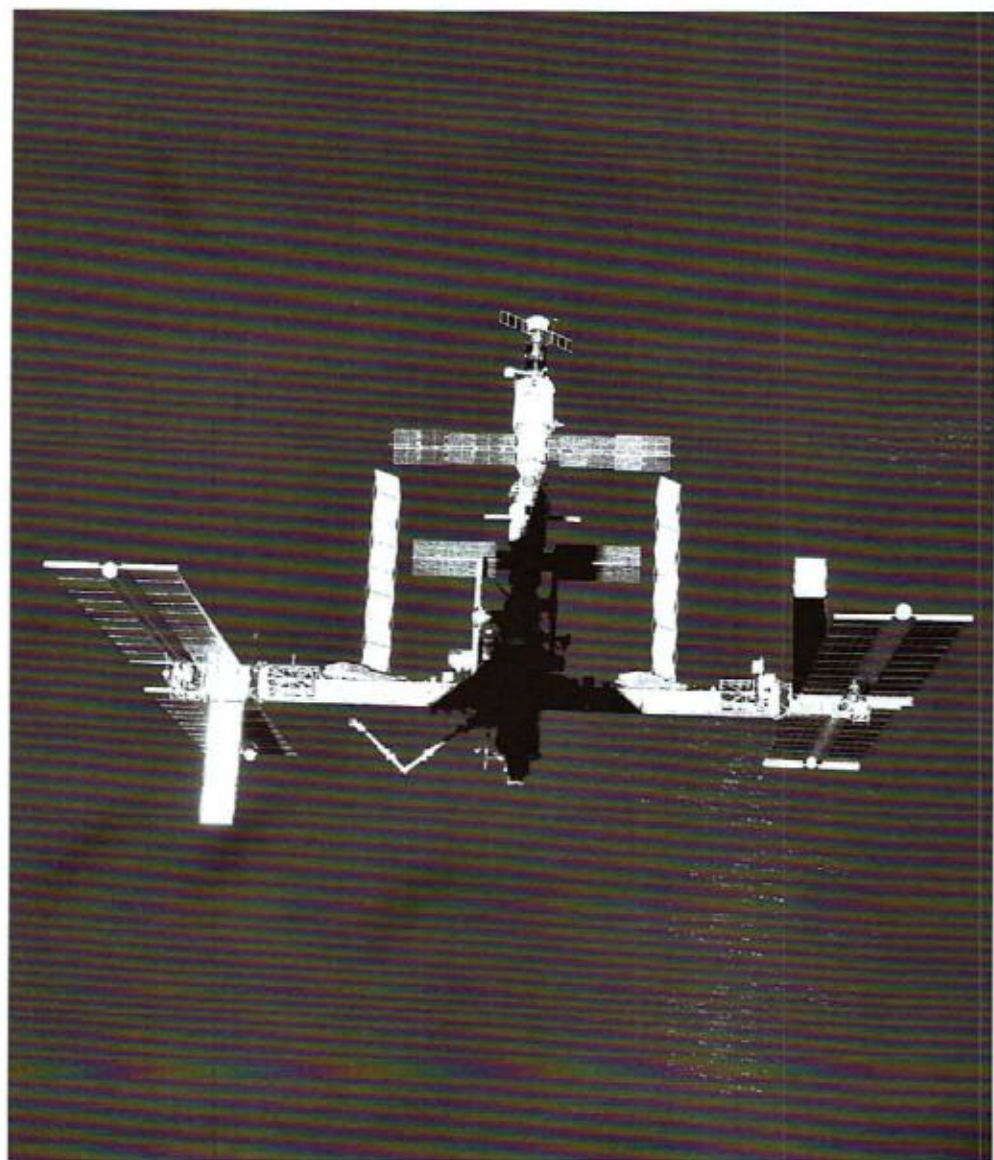
La temperatura en la superficie de esta luna es de 146 °C bajo cero; la presión barométrica es algo más de una y media veces la atmósfera terrestre; la visibilidad en la superficie sería como la de un crepúsculo brumoso en la Tierra. Lo anterior configura un escenario como el que tuvo la Tierra hace 4000 millones de años, y se ha sugerido que esta similitud presagia para Titán una cadena de eventos que conduciría eventualmente a la aparición de la vida en este cuerpo celeste.

Referencias

- Astronómica, *El Sistema Solar*. México-Madrid. Editoriales Diana y Libsa, 2006, pp. 43-109.
- Duke MB., Blanchard DP., *Planetary exploration in: Space physiology and medicine. Edited by Nicogossian AE, Huntoon CL., and Pool SL., Philadelphia. Lea and Febiger, pp.63-78, 1994.*
- Frank A., *Blowing in the solar wind*. Astronomy 1998; 26(10):60-65.
- Henbest N., Marten M., *The new astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- Henry JP., *Biomedical aspects of space flight*. New York: Holt, Rineharts, Winston, Inc. 1966.
- Hoyle F., *Highlights in astronomy*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1975.
- Iglesias R., *La Ruta hacia el hombre cósmico*, 2ª ed. México: Editorial Limusa, 2009.
- Jones B., *An introduction to practical astronomy*, New Jersey: Chartwell Books, 1991.
- Langham WH (ed)., *Radiobiological factors in manned space flight*. Washington DC: Printing and Publishing Office-National Academy of Sciences, 1967.
- Lawier A., *Onward into space*. Astronomy 1998; 256(12):42-51.
- LePage AJ., *Habitable moons*. Sky and Telescope 1998; 96(6):50-56.
- Lovell B., Hensbest N., Bath G., et al., *Space travel and astronomy*. London: Octopus Books Limited, 1979.
- Mirsky S. *Destination Titan*. Astronomy 1997; 25(11):42-47.
- Moore P., *Stars and planets*. New York: Exeter Books, 1987.
- Nicogossian AE., *Characteristics of the space environment. in: Space physiology and medicine. Edited by Nicogossian AE., Huntoon CL., and Pool SL., Philadelphia. Lea and Febiger, PP.50-62, 1994.*

- Noyes RW., *El Sol, nuestra estrella*, México: Edamex, 1985.
- Rogan J., *Bound for the ringed planet*. Astronomy 1997; 25(11):36-41.
- Rowan-Robinson M., *Cosmic landscape*. Oxford University Press, 1979.
- Scotti JV., *Fleeting expectations: The tale of an asteroid*. Sky and Telescope, 1998; 96(1):30-34.

Capítulo 10



Sistemas de apoyo vital en el espacio

Las naves, las estaciones y los trajes espaciales son sistemas ecológicos sellados; son sustitutos (en pequeño) del medio ambiente natural terrestre y han sido diseñados para proteger al hombre y a otros seres vivos en el espacio exterior y en la superficie de otros cuerpos celestes.

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo anterior, las condiciones del espacio extraterrestre son incompatibles con la vida. Sin protección adecuada, los factores como la falta de atmósfera, la radiación cósmica, las temperaturas extremas, la radiación electromagnética (luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma) y el impacto de meteoros son por sí mismos mortales de necesidad; sin embargo, el uso de sistemas de protección como los trajes, las naves y las estaciones espaciales hacen posible la sobrevivencia humana.

Otros factores como la iluminación, la ruptura del ciclo día/noche, los campos magnéticos, las aceleraciones, el confinamiento y la desaparición del escenario natural introducen algunos cambios fisiológicos y psicológicos, pero sus efectos son controlables. Hay un factor más: la ausencia de gravedad, que sin representar un especial riesgo para la salud y la vida, al menos a corto o mediano plazo, es el que determina los cambios más importantes de la fisiología humana, particularmente del corazón y la circulación.

A la fecha las misiones tripuladas sólo han tenido cuatro escenarios: a) en órbita terrestre baja (250 a 500 km de altura), b) en trayectoria lunar; c) en órbita lunar (a 100 km de altura); y d) en la superficie de la Luna. En el primer escenario se han desarrollado todas las misiones tripuladas rusas con las naves Vostok, Voshod y Soyuz, y las estaciones Salyut y Mir. En la órbita baja también se han desplazado las naves norteamericanas de los programas Mercurio, Géminis, Apolo (Apolo 7 y Apolo 9), Skylab y los transbordadores del Sistema de Transportación Espacial. En el espacio ultraterrestre (trayectoria a la Luna) y sobre la superficie lunar sólo las naves tripuladas Apolo lo han logrado. La Estación Espacial Internacional en la que participan Estados Unidos, Rusia, la Unión Europea, Canadá, Japón y Brasil se ubica en órbita baja terrestre.

Naves espaciales

No es el propósito de esas líneas analizar en detalle el perfil de las diferentes misiones espaciales ni hacer una descripción técnica completa de las naves tripuladas, sino solamente mencionar las condiciones de la atmósfera interior de estas burbujas metálicas que protegen la salud y la vida de los astronautas fuera del planeta Tierra.

Naves norteamericanas

NAVES MERCURIO

Las primeras naves tripuladas de la NASA fueron las del proyecto Mercurio; estas misiones (seis en total) se realizaron entre mayo de 1961 y mayo de 1963. El objetivo principal de este programa fue probar que el ser humano era capaz de navegar más allá de la atmósfera terrestre y regresar sano y salvo. Las naves Mercurio eran muy pequeñas, tenían un cupo apenas suficiente para alojar un astronauta, pero su estructura ofrecía la suficiente protección contra los rayos cósmicos, los extremos de temperatura, la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma; además, sus paredes eran suficientemente resistentes para mantener una presión atmosférica interior compatible con la vida y dar protección contra el impacto de micrometeoros.

La atmósfera interior de la cabina estaba constituida de oxígeno 100% a una presión de 250 mmHg; la temperatura se mantuvo entre los 18 y 22 °C; la humedad fluctuaba entre el 50 y 70%, y el bióxido de carbono generado por la respiración del astronauta era fijado por reacción química con hidróxido de litio que se llevaba dentro de la nave.

NAVES GÉMINIS

Entre marzo de 1965 y diciembre 1966 la NASA realizó 10 vuelos orbitales del proyecto con una permanencia en órbita de unas horas a varios días. Estos vehículos tenían la misma configuración de las naves Mercurio, pero eran más grandes, con capacidad para dos astronautas. Las metas de este programa fueron mucho más amplias que las del anterior y en buena medida llevaban la intención de preparar el camino para llegar a la Luna.

Las paredes de las naves Géminis cumplían los mismos propósitos de protección; su atmósfera interior tenía un sólo componente, el oxígeno, a una presión de 250 mmHg; poseían también las condiciones necesarias de temperatura, humedad y fijación del bióxido de carbono.

Desde el punto de vista médico, el programa Géminis empezó a aportar los primeros conocimientos sobre la fisiología y la medicina espacial, muy particularmente en el área cardiovascular, a la cual se dedicó el mayor número de estudios clínicos (antes, durante y después del vuelo). Los datos clínicos monitoreados durante las diferentes fases de la misión fueron: frecuencia cardiaca, presión arterial, electrocardiograma y neumograma. Pero antes y después del vuelo se hicieron estudios diversos: radiografía de tórax, fonomecanocardiograma, exámenes de laboratorio, electrocardiograma, prueba en la mesa de posiciones, mediciones del volumen de los miembros inferiores (para estimar la movilización de líquidos y la atrofia muscular), pruebas funcionales respiratorias, prueba de esfuerzo, aceleraciones en la centrífuga, descompresiones en cámara de altitud, aplicaciones de presión negativa en la parte inferior del cuerpo y otras.

NAVES APOLO

Representa sin duda la hazaña tecnológica más importante del siglo xx. Entre los años de 1968 y 1972 se realizaron 11 misiones Apolo; dos se ejecutaron en órbita terrestre (Apolo 7 y 9) para probar equipos y practicar maniobras relacionadas con los siguientes vuelos; dos más (Apolo 8 y 10) llegaron a las proximidades de la Luna y la circunvolvieron para elegir los posibles sitios de alunisaje. De las siguientes siete misiones, seis lograron poner en la superficie lunar a 12 astronautas (Apolo 11, 12, 14, 15, 16 y 17) y regresaron a la Tierra sin problemas, y uno (Apolo 13) fracasó por el estallamiento de un tanque de oxígeno en el módulo de servicio cuando se encontraba en ruta hacia la Luna, pero los astronautas lograron sobrevivir refugiándose en el módulo lunar mientras se encontraban en el espacio exterior, y en el módulo de comando al reingresar a la atmósfera terrestre.

Es imposible analizar los numerosos adelantos científicos y tecnológicos obtenidos en este programa, pero podemos destacar algunos hechos de importancia fundamental para la medicina espacial y para el futuro de la humanidad fuera del planeta Tierra, por ejemplo: a) los astronautas salieron virtualmente de este mundo; b) dentro de sus naves desarrollaron la segunda velocidad cósmica, la velocidad necesaria para vencer el campo gravitacional de la Tierra, es decir, 40 000 km/h; c) por unos días vivieron sin la referencia del ciclo día/noche de 24 horas; d) experimentaron la fuerza gravitacional de un cuerpo celeste distinto a la Tierra; e) con un peso seis veces menor que el normal, estos seres humanos pudieron desarrollar actividades complejas y múltiples en la superficie de la Luna; f) su capacidad intelectual les permitió realizar estudios científicos y enviar mensajes a la Tierra de profundo contenido humanista y filosófico; y g) y lo más importante para la medicina: quedó confirmado que el sistema del equilibrio, el músculo esquelético, el cardiovascular y otros órganos funcionan bien sobre otro cuerpo celeste distinto a nuestro planeta.

Los alcances de las misiones a la Luna no se circunscriben solamente al ámbito de las ciencias espaciales, sino que adquieren una dimensión histórica de enorme importancia.

Por lo que concierne a las características de las naves Apolo, éstas estaban constituidas por dos módulos habitables, el módulo de comando y el módulo lunar, y un tercer módulo, el de servicio, con los elementos necesarios para el funcionamiento de estos vehículos. El módulo de comando era una nave cónica grande (3.91 m de diámetro en su base y 3.48 m de alto y un volumen interior habitable de 6m^3); tenía capacidad para tres tripulantes; su atmósfera interior en el momento del lanzamiento era de una mezcla de oxígeno 60% y nitrógeno 40%, pero en el transcurso de las primeras 30 horas de la misión la atmósfera interior se volvía de oxígeno 100% a una presión de 250 mmHg; la humedad se mantenía entre 40 y 70%; su temperatura entre 21 y 26 °C; el bióxido de carbono se fijaba en hidróxido de litio dentro de la cabina y nunca sobrepasó las cifras aceptables. Los tres astronautas de cada una de estas misiones permanecían en el módulo de comando durante las siguientes fases: el lanzamiento, en órbita terrestre, en trayectoria hacia la Luna, en órbita lunar, en trayectoria de regreso hacia la Tierra y durante el reingreso a la atmósfera terrestre.

El módulo lunar se utilizó para descender dos astronautas a la superficie de la Luna y para darles protección durante su estancia en ella; la porción superior de este módulo (módulo de ascenso) se utilizó para traer de regreso a los astronautas a la órbita lunar y reunirse con el módulo de comando donde había permanecido el tercer astronauta; esta segunda parte del módulo lunar era abandonada y se dejaba caer libremente a la superficie de la Luna donde se destruía por el impacto. El módulo de ascenso lunar tenía un diámetro de 4.3 m y una altura de 3.8 m, con un volumen habitable de 4.5 m^3 . La atmósfera interior era también de oxígeno 100% a 250 mmHg de presión; el resto de las variables eran exactamente las mismas que se han mencionado para el módulo de comando.

LABORATORIO SKYLAB

Fue un laboratorio espacial en órbita terrestre que alojó las tripulaciones de tres misiones diferentes en el transcurso de los años de 1973 y 1974, con una duración de 28, 56 y 84 días respectivamente. Si bien el laboratorio Skylab cumplió numerosos objetivos en diferentes disciplinas de las ciencias espaciales, su propósito más importante fue el estudio de la fisiología humana en gravedad cero. Esta gran estructura estaba formada por el módulo de comando de las misiones Apolo y un gran cilindro de 6.7 m de diámetro, 14.6 m de largo y un volumen habitable de 275 m^3 . La atmósfera interior del Skylab tenía una presión de 250 mmHg pero

conteniendo dos gases: 70% de oxígeno y 30% de nitrógeno; se prefirió esta mezcla para abatir en lo posible riesgo de incendios y también los efectos de la hiperoxia crónica; la presión parcial de oxígeno en esta mezcla es exactamente la misma que al nivel del mar; la temperatura, la humedad y los niveles de bióxido de carbono dentro de la cabina fueron mejor controlados y más satisfactorios que en las naves de los programas anteriores. Los tres astronautas de cada misión Skylab regresaron a la Tierra en caída libre en el módulo de comando, y el gran cilindro del laboratorio cayó a la atmósfera en julio de 1979 quemándose casi totalmente por la fricción con el aire.

TRANSBORDADORES ESPACIALES

Se integró con una flotilla de cinco transbordadores espaciales que han viajado varias veces a la órbita terrestre baja, cumpliendo numerosas tareas científicas y tecnológicas; una de estas naves (el Challenger) sufrió una explosión que lo destruyó apenas unos segundos de haber iniciado el ascenso, ocasionando la muerte de los siete astronautas en enero de 1986. Otro transbordador, el Columbia, se destrozó en el descenso en enero del 2003, muriendo sus siete tripulantes. Los transbordadores espaciales son naves con una capacidad similar al de un avión DC-9, pesan aproximadamente 68 toneladas, despegan verticalmente con el impulso de cohetes poderosos y descienden planeando horizontalmente, como un avión. Disponen de un volumen habitable de aproximadamente 71 m³. Su atmósfera interior, por primera vez en las naves norteamericanas, tiene una presión de 760 mm Hg (14.7 libras por pulgada cuadrada) con los dos componentes gaseosos normales de la atmósfera terrestre al nivel del mar: nitrógeno 80% y oxígeno 20%; la temperatura, la humedad y el contenido de bióxido de carbono se mantienen en límites fisiológicos.

Naves rusas

Desde el histórico vuelo de la nave Vostok 1, el 12 de abril de 1961, que puso en órbita terrestre al primer ser humano (Yuri Gagarin), las naves rusas siempre han tenido en su interior un contenido de gases y una presión similar a la que tiene la atmósfera terrestre al nivel del mar. La temperatura, la humedad y el bióxido de carbono siempre han estado en el rango del confort fisiológico; por lo tanto, no tenemos mucho que comentar respecto al medio ambiente interior de las astronaves rusas tripuladas; sin embargo, haremos una brevísima descripción de las características más importantes de los diferentes vehículos tripulados del programa ruso de exploración cósmica.

NAVES VOSTOK

Son cápsulas con capacidad para un solo cosmonauta con su traje espacial puesto y con posibilidad de permanecer en órbita durante varios días; las naves Vostok tienen dos componentes: a) un módulo de descenso, esférico, con un diámetro de 2.3 m, que es la porción que aloja al cosmonauta y tiene un peso de 2460 kg; b) el módulo de instrumentos es la porción del conjunto que aloja los sistemas de apoyo vital, equipo electrónico y retrocohetes. Este vehículo tenía facilidades para registrar y transmitir datos clínicos, como el electrocardiograma, neumograma, quinotocardiograma y oculonistagmografía. Los módulos pesaban en conjunto 4730 kg. El regreso se realizó en el módulo esférico, en caída libre, generando fuerzas de desaceleración de 8 a 10 G; a los 7 km de altura un asiento de eyección provisto con un paracaídas disparaba al cosmonauta hacia fuera del módulo de descenso, del que luego se separaba el cosmonauta y éste descendía en otro paracaídas, tocando tierra a 5 m/s (18 km/h). El módulo de instrumentos se dejaba caer libremente en la atmósfera destruyéndose por la fricción con el aire, pero el módulo de descenso se rescataba haciéndolo descender en un paracaídas propio, tocando el suelo a una velocidad de 10 m/s (36 km/h).

Se realizaron seis vuelos Vostok entre el 12 de abril de 1961 y el 16 de junio de 1963; la duración de las misiones fue de una hora a cuatro días; es digno de recordar que Vostok 6 llevó como tripulante a la primera mujer cosmonauta (Valentina Tereskova).

NAVES VOSKHOD

Estos vehículos tenían esencialmente la misma configuración de Vostok con sus dos módulos: el de descenso de forma esférica y el de instrumentos, que era en realidad un cilindro; hay, sin embargo, algunas diferencias: en primer lugar, el Voskhod era de mayores dimensiones, el módulo de descenso podía alojar a tres cosmonautas, tenía un volumen habitable de 5 m³, llevaba una estructura adicional para permitir al cosmonauta salir y practicar actividades fuera de la nave, protegido con su traje, el peso total de este conjunto era de 5682 kg; sólo se realizaron dos misiones Voskhod: en la primera (12 de octubre de 1964) viajó por primera vez un médico (el doctor Yegorov) y en la segunda (18 de marzo de 1965) viajó el astronauta Leonov, quien fue el primero que realizó actividad extravehicular durante unos minutos, protegido solamente con su traje espacial.

Las facilidades de investigación médica fueron similares a la de las misiones Vostok. El descenso experimentó algunas modificaciones: el módulo esférico descendía con los tres tripulantes a bordo en caída libre, a cierta altura se abría un para-

caídas que disminuía adicionalmente su velocidad y antes de tocar tierra se activaban retrocohetes que reducían la velocidad de impacto a 7.2 km/h.

NAVES SOYUZ

En uso desde 1967, se convirtió en un vehículo capaz de transportar cosmonautas a la órbita baja o exclusivamente carga útil (equipos diversos, alimentos, combustibles). Su composición es diferente a los vehículos anteriores, pues posee tres módulos. En un extremo el módulo orbital, de forma oval o casi esférica, tiene un diámetro de 2.25 m con 6.5 m³ de volumen libre, destinado al lugar de trabajo y habitación para los cosmonautas. El módulo de descenso, en la parte central del complejo, tiene una forma de campana que permite un descenso más suave, pues la desaceleración de reingreso no sobrepasa los 3 o 4 fuerzas G; un paracaídas se abre a los 9 km de altura y otro mayor un poco más abajo y un metro antes de tocar el suelo se activan retrocohetes que permiten un impacto de 7.2 a 10.8 km/h; el módulo de instrumentos se ubica en el otro extremo del conjunto, contiene el equipo electrónico, computadoras, paneles solares, antenas y sistemas para maniobrar la nave.

El complejo Soyuz pesa en su totalidad 7070 kg, posee 10 m³ de volumen habitable, 2.3 m de diámetro y 7.5 m de largo. El módulo de descenso se diseñó originalmente para tres cosmonautas sin el traje puesto, pero cuando el Soyuz 11, en junio de 1971, sufrió una descompresión súbita durante el descenso y en ese percance murieron los tres cosmonautas (Dobrovolsky, Volkov y Patsayev), se redujo a dos plazas, con el traje espacial puesto durante el despegue y el aterrizaje; a partir de noviembre de 1980 este módulo de nuevo volvió a tener la capacidad de tres astronautas a bordo con el traje puesto.

Las naves Soyuz han realizado decenas de viajes a la órbita baja, transportando astronautas de diferentes nacionalidades a las estaciones Salyut y Mir y de regreso a la Tierra, excepto a los astronautas norteamericanos, porque ellos utilizan el transbordador espacial. Una adaptación de Soyuz para convertirlo exclusivamente en un vehículo de carga útil ha dado origen a la nave Progreso para llevar a las estaciones mencionadas equipo técnico y de investigación, combustible, alimentos y otros elementos para el mantenimiento de las estaciones. Ninguna de las tres porciones de Progreso regresa a Tierra sino que, al terminar la misión, descienden en caída libre y se destruyen al atravesar la atmósfera, pero se le ha agregado una cápsula de recuperación que se desprende del vehículo a 110 km de altura y, mediante el apoyo de un paracaídas, desciende trayendo consigo 150 kg de material de experimentos, grabaciones fílmicas y alguna otra información de interés científico.

Cabe mencionar que en el interior de la nave Soyuz prácticamente no se han realizado experimentos médicos de importancia, porque se trata de un vehículo de transporte desde los centros de lanzamiento a las estaciones orbitales y en sentido inverso; la

permanencia de los cosmonautas en el interior de estas naves es muy breve, a veces de unas cuantas horas, cuando mucho de dos a tres días; los estudios médicos programados se han realizado en el interior de las estaciones Salyut y Mir.

Estaciones espaciales

Las estaciones espaciales son sistemas ecológicos sellados con las condiciones interiores apropiadas para la protección de la vida humana y la de otros seres vivos. Hasta ahora, dos estaciones orbitales rusas han estado en pleno funcionamiento; nos referimos a las estaciones Salyut y Mir.

ESTACIÓN SALYUT

Por muchas razones ésta puede considerarse la primera estación orbital tripulada que permaneció en uso desde abril de 1971 a mayo de 1986. Desde Salyut 1 este complejo sufrió varias modificaciones, pero básicamente estuvo constituida por tres compartimientos: a) el de transferencia, un cilindro de 3 m de largo y 2 de diámetro, contaba con una puerta de acoplamiento para las naves Soyuz, a la mitad tenía una escotilla que permitía la salida y entrada de los cosmonautas que realizaban actividad extravehicular; b) conectaba con el compartimiento intermedio, otro cilindro de 3.8 m de largo y 2.9 m de diámetro que alojaba los paneles de control de la estación y varios instrumentos; c) finalmente, el compartimiento grande de trabajo, un cilindro de 4.1 m de largo y 4.15 m de diámetro, el cual contenía equipo médico, instrumentos científicos y facilidades para dormir, tomar alimentos, hacer ejercicio y realizar la higiene personal.

Este complejo contaba con dos puertas de desembarco (una en cada extremo) y sobre el compartimiento intermedio se fijaban tres paneles de energía solar.

La atmósfera interior de estos tres compartimientos era igual al de todas las naves rusas: una atmósfera de presión, 80% nitrógeno y 20% de oxígeno, humedad, temperatura y contenido de bióxido de carbono en los límites fisiológicos.

En estas misiones, especialmente en la Salyut 6 y 7, se dan tres hechos dignos de ser mencionados: a) algunas misiones fueron muy prolongadas, varios cosmonautas permanecieron en el espacio exterior durante meses; b) las tripulaciones se vuelven internacionales al incluir sucesivamente cosmonautas de varios países de Europa Oriental, Mongolia, Vietnam y Cuba; c) en las estaciones Salyut se realizaron numerosos estudios médicos que incluyeron, entre otros, electrocardiograma, ecocardiograma, balistocardiografía, oscilometría, ultrasonido abdominal, aplicación de la bolsa de presión negativa en la parte inferior del cuerpo, ejercicio en banda sinfín y bicicleta ergométrica, aplicación del traje "pingüino", mediciones de masa muscular,

monitorización de las variables del medio ambiente interior de la cabina, electroestimulación muscular, estudios de microbiología, psiconeurología y recolección de diversos productos (orina, sangre y secreciones del cuerpo humano) para su análisis posterior en la Tierra.

ESTACIÓN MIR

La primera parte de la estación Mir fue puesta en órbita en febrero de 1986; primero se llevó el módulo central, llamado también compartimiento de trabajo y habitación. El módulo central o corazón del complejo es un cilindro de 14.5 m de largo y 4.5 de sección; en su interior se ubica el tablero de mando, el equipo para el control de la atmósfera de la cabina y diferentes instrumentos para realizar ejercicio cotidiano, una mesa con cuatro sillas para tomar los alimentos y realizar algunos trabajos, anaqueles para almacenar alimentos, cubículos individuales para dar privacidad a los cosmonautas, bolsas de dormir, fregadero, taza de excusado, tocador y una ducha; a la nave se le asigna un "techo" y un "piso"; sus paredes son de color verde claro y el conjunto interior luce como un hogar terrestre.

Los elementos para el ejercicio, que por cierto es fundamental en los viajes de larga duración, consisten en una banda sinfín, una bicicleta ergométrica y cuerdas elásticas para ejercitar las diferentes porciones del cuerpo humano. En este módulo se ubica también la mayor parte del equipo médico para realizar estudios diversos durante la misión, como electrocardiografía, ecocardiografía, oscilometría, cardiografía por impedancia, electroestimulación muscular, medición de la masa muscular y aplicación de presión negativa en la parte inferior del cuerpo. La atmósfera interior de la cabina sigue siendo igual o muy similar a la que han tenido las naves rusas anteriores. En la parte distal del módulo central se acopló el módulo Kvant-1, un cilindro de 5.8 m de largo por 4.15 m de sección con un volumen habitable de 40 m³; pesa aproximadamente 11 toneladas e incluye 1500 kg de instrumentos científicos, 2500 kg de abastecimiento para la estación, un aparato de electroforesis para purificar productos biológicos, equipo para experimentos de astrofísica y telescopios de luz ultravioleta y de rayos X; en el extremo libre del Kvant-1 existe una puerta circular de acoplamiento con las naves Soyuz y Progreso.

En el otro extremo del módulo central está conectada una esfera llamada módulo de transferencia, con seis puertas circulares de acoplamiento y desembarco: cuatro situadas radialmente sobre el "ecuador" de la esfera y una en cada "polo". En una de las puertas del ecuador de la esfera fue acoplado el módulo Kvant-2, que tiene una longitud de 13.7 m y sección de 4.15 m con un volumen habitable de 62 m³; el extremo distal del Kvant-2 tiene una escotilla para dar salida a cosmonautas para la realización de actividad fuera del vehículo; en el interior contiene una regadera, una incubadora para huevos de aves, un horno para procesar materiales y cámaras fo-

tográficas para el estudio de recursos terrestres. En la puerta opuesta del módulo de transferencia, a 180°, se acopló, en 1990, el módulo Kristal con dimensiones y configuración enteramente similares al Kavant-2, el cual contiene en su interior una banda sinfín para el ejercicio de los cosmonautas, el equipo para producción de semiconductores, una unidad de electroforesis, un invernadero, un refrigerador/congelador y en el extremo distal una puerta para acoplamiento con diversas naves, entre las que se cuenta el transbordador espacial de la NASA. En las dos puertas restantes del ecuador del módulo de transferencia se colocaron las porciones denominadas Spektr y Priroda para estudios diversos; además de los tres paneles para la captación de energía solar que tiene el módulo central. Cada uno de estos cuatro módulos tiene su propio panel para la captación de calor solar y su posterior transformación a energía eléctrica.

La estación Mir fue diseñada originalmente para durar seis o siete años, pero su vida útil fue de 15 años, aun cuando al final tuvo desperfectos y accidentes. Recibió un gran número de cosmonautas científicos de diferentes países, en estancias cortas la mayor parte de ellos, pero varios astronautas de la NASA realizaron vuelos de varios meses de duración; sin embargo, los récords más impresionantes de permanencia en el espacio los conservan los cosmonautas rusos Romanenko en 1987, que cumplió 326 días, Manarov y Titov, 366 días, y Polyakov, 438 días.

ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

Varios países del mundo durante la segunda mitad de la década de los noventa del siglo pasado llegaron al acuerdo de construir un complejo orbital a donde pudieran concentrarse varios laboratorios de investigación y sirviera, además, de plataforma para misiones dentro del Sistema Solar o más allá. Los países que participan en esta extraordinaria empresa son: Estados Unidos (NASA), Rusia (RKA), la Unión Europea (ESA), Japón (JAXA), Canadá (CSA) y Brasil (AEB).

La Estación Espacial Internacional (EEI) está situada en órbita baja (entre los 350 y 450 km de altura) y podrá verse a simple vista; vuela alrededor de la Tierra hacia el Este a una velocidad de 28 000 km por hora; realiza una vuelta completa a la Tierra en 90 minutos, es decir, 16 órbitas en 24 horas. Se inició su construcción en diciembre de 1998 y ha sido terminada a finales del año 2010.

El diseño general de la Estación Espacial Internacional es el siguiente: una especie de "torre" o eje central de algo más de 100 m de largo en la que se sujetan seis módulos cilíndricos (dos de la NASA, dos de la Agencia Espacial Rusa, uno de la Agencia Espacial Europea y uno del Japón), un brazo robótico aportado por la Agencia Espacial Canadiense que podrá recorrerse sobre la barra central para realizar múltiples acciones y cuatro paneles gigantes para recoger la luz solar y convertirla en energía eléctrica. Sin entrar en detalles sobre las características y funciones

específicas de cada uno de estos módulos, sólo mencionaremos que servirán como laboratorios de investigación, habitación, servicio médico e instalaciones para la producción de oxígeno, agua y alimentos. Las condiciones interiores son las de un sistema ecológico sellado con una presión barométrica similar a la del nivel del mar, nitrógeno y oxígeno en una proporción similar a la de la atmósfera terrestre; la humedad, la temperatura, la ventilación, la iluminación en límites confortables, además del control del bióxido de carbono y otros gases contaminantes. La EEI estará siempre habitada por seis o siete astronautas permanentemente, cuya estancia será de tres a seis meses.

En su proceso de construcción se han utilizado cuatro tipos de vehículos para llevar material, equipo, combustible, personas, agua y alimentos: la nave rusa Progreso que ha tenido como función llevar material y regresar basura o desperdicio; la nave Soyuz de Rusia para transportar astronautas y equipo técnicos especializado; el transbordador espacial de la NASA que cubre las dos funciones, y el vehículo de transferencia automática "Julio Verne" de la Agencia Espacial Europea.

La EEI totalmente terminada tendrá en su conjunto una zona interna presurizada de un volumen aproximado de 1300 m³, un espacio equivalente a dos cabinas de pasajeros del avión Jet 747.

TRAJES ESPACIALES

Una de las contribuciones más sobresalientes en la creación de sistemas ecológicos sellados es el traje espacial. Se trata en realidad de una pequeña nave adaptada al cuerpo humano que protege al astronauta de la misma manera que una nave o estación espacial, pero el volumen de atmósfera interior que maneja es infinitamente más pequeño que el de estos sistemas, pues está limitado al espacio que existe entre la piel del astronauta y la capa interna del traje.

El uso del traje espacial es necesario para realizar infinidad de actividades fuera de las naves y las estaciones, como son: poner en órbita satélites de todo tipo, arreglar desperfectos de los mismos, rescatarlos cuando se ha perdido su control, hacer arreglos en el exterior de las astronaves, reparar instrumentos científicos, como fue el caso del telescopio Hubble, realizar experimentos médicos, participar en la construcción de la Estación Espacial Internacional, caminar en la superficie de la Luna para efectuar tareas diversas, etcétera.

El traje espacial está formado por capas sencillas, dobles o triples, de diferentes materiales, como nailon, teflón, polietileno, mylar, kevlar, neopreno, dacrón, fibra de vidrio, gortex, kaptón y algodón en la parte más interna. Como se ve, la pared de un traje espacial está formada por un conjunto de telas que adosadas unas a otras proporciona la protección adecuada contra la radiación cósmica, el impacto de micrometeoros, las temperaturas extremas, el vacío total,

además de permitir la movilidad y la ejecución de tareas fuera de la nave o la estación espacial.

En su conjunto, el traje espacial está constituido por el casco, las extremidades, el tronco y una mochila que contiene el sistema de apoyo vital. Este último es el que controla la presión interior del traje, el contenido de gases para la respiración, la fijación del bióxido de carbono, la humedad y la temperatura.

El casco está diseñado de tal manera que permita al astronauta una visibilidad completa, además de llevar consigo micrófono y audífonos para una comunicación adecuada con el centro de control y sus compañeros, protege de la luz ultravioleta y tiene también una pequeña pantalla para recibir mensajes.

El traje también está dotado de un depósito de agua para beber, alimento en bocado, tubos y depósitos para recoger la orina y las heces fecales, en caso necesario.

Los trajes del futuro estarán aún mejor dotados, de tal manera que podrán generar su propia energía eléctrica mediante sensores fotoeléctricos, la cual se utilizará para el funcionamiento del equipo de apoyo vital y de comunicaciones; los nuevos materiales serán capaces de reparar instantáneamente perforaciones y desgarros pequeños; también en su estructura llevarán sustancias para eliminar gérmenes patógenos.

Sólo para subrayar la importancia del traje espacial mencionaremos lo que ocurriría si un ser humano fuera expuesto al vacío exterior sin la protección del mismo: a) la falta de oxígeno lo dejaría inconciente en 15 segundos o menos; b) la ausencia de presión barométrica haría que los gases disueltos en el organismo humano se dilatasen súbitamente para provocar el "hervor" de la sangre y de otros líquidos que convertirían virtualmente al cuerpo humano en un globo; c) quedaría expuesto a temperaturas extremas (a la luz solar sufriría temperatura de 120 °C o más a la sombra en poco tiempo la temperatura descendería a 100 °C bajo cero o menos); d) la radiación cósmica solar sería también mortal; e) el impacto directo de micrometeoros que viajan entre 15 y 20 km por segundo perforarían el cuerpo humano.

Referencias

- Belew L. F., (ed.) *Skylab, our first Space Station* (NASA SP-400). Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, 1977.
- Brady J. C., et al., *Apollo command and service module and lunar module environmental control systems*. In: *Biomedical Results of Apollo* (NASA SP-368). Edited by Johnston, R. S., Dietlein L. F., and Berry, C. A., Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, pp. 517-544, 1975.
- Clark P., *The Soviet Manned Space Programme*. New York, Orion, 1988.

- Gemini Summary Conference (NASA SP-138). Washington, D.C., NASA 1967.
- Grimwood J. M., *Project Mercury: a chronology* (NASA SP-4001). Washington, D. C., NASA, 1963.
- Heppenheimer TA., *Colonies in space*. Stackpole Books, 1977.
- Iglesias R., *La Ruta hacia el hombre cósmico*, 2ª ed. México: Editorial LIMUSA S.A. de C. V., 2009.
- Jhonson RD., Holbrow C., *Space settlements*. A design study. NASA SP-413, 1977.
- Johnston R. S., *Skylab medical program overview*. In: Biomedical Results From Skylab (NASA-SP-377). Edited by Johnston, R. S., and Dietlein, L. F. Washington, D. C., NASA, pp. 3-19, 1977.
- Johnston R. S., and Hull W. E., *Apollo missions*. In: *Biomedical Results of Apollo* (NASA-SP-368). Edited by Johnston, R. S., Dietlein, L. F., and Berry, C. A. Washington, D. C., NASA, pp. 9-40, 1975.
- Johnston R.S., and Dietlein L.F., (eds.) *Biomedical Results from Skylab* (NASA-SP-377). Washington D.C., U.S. Government Printing Office, 1977.
- Johnston R.S., Dietlein L.F., and Berry, C.A. (eds) *Biomedical results of Apollo* (NASA-SP-368). Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1975.
- Kidger N., *Mir misión report: cosmonauts chalk up more than 30 hours of spacewalks*. Space-flight 33(10): 359-360, 1991.
- Lafontaine B., *International space station*. Mineola NY: Dover Publications Inc., 2003.
- Mercury Project Summary (NASA-SP-45). Washington, D.C., NASA, 1963.
- Mueller G. E., *Introduction*. In: *Gemini Summary Conference* (NASA-SP-138). Washington D. C., U. S. Government Printing Office, pp. 1-3, 1967.
- Neri R., *Manned Space Stations*. The Netherlands: ESA Publications Division, 1990.
- Nicogossian AE. Vehicles for human space flight. In: *Space Physiology and medicine*. Edited by Nicogossian AE, Huntoon CL, and Pool SL. Philadelphia. Lea and Febiger, pp.81-108.1994.
- O'Neill GK., *Space resources and space settlements*. NASA-SP-428, 1977.
- O'Neill GK., *The high Frontier: Human colonies in space William Morrow and company*, 1977.
- Pickard JS., Gradwell DP. *Respiratory Physiology and protection against Hypoxia*. In: Davis JR., Johnson R., Stepanek J., Fogart y JA., eds. *Fundamentals of Aerospace Medicine*, 4th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Lippincott Williams & Wilkins, 2008:20-45.
- Pisacane VL., Kuznetz LH., Logan JS., Clark JB., Wissler, EH., *Thermoregulatory models of space Shuttle and Space Station Activities*. Aviat Space Environ Med, 2007; 78 (4, Suppl.) A48-55.
- Pochkayev, I., Serebrov A., and Uliyanov V., *The Mir space station*. Aviatskaya i Kosmonavtika, november 22-23, 1986.
- Sauer R. L., and Jorgensen G. K., *Waste management system*. In: Biomedical Results of Apollo (NASA-SP-368). Edited By Johnston, R. S., Dietlein L. F., and Berry, C. A. Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, pp. 469-484, 1975.
- Sauer R. L., and Westover J B., *The potable water system in Skylab*. SAE Technical Papers Series no. 74ENAs17, Intersociety Conference on Emnvironmental Systems, Seattle, WA. july 29-aug 1, 1974.

Capítulo 11



Selección de astronautas: aspectos cardiovasculares

El sistema cardiovascular es el que con mayor intensidad se afecta por los factores presentes en el ámbito de las actividades espaciales; es también el más accesible para ser estudiado en situación de reposo y durante el estrés físico y psicológico, y finalmente, el que ofrece más información sobre las condiciones fisiológicas del sujeto en estudio. Históricamente, es el área de la fisiología humana que se ha estudiado mejor desde el inicio de las misiones espaciales tripuladas y la que ha aportado el mayor número de conocimientos a la medicina espacial.

En este capítulo nos ocuparemos de la evaluación integral cardiovascular a la que los aspirantes a astronautas son sometidos antes de ser calificados como tales; mencionaremos el examen clínico y las pruebas de laboratorio y gabinete que se realizan para conocer el estado de salud del sistema cardiocirculatorio; también describiremos brevemente los procedimientos que en la Tierra se utilizan para simular las diferentes fases del vuelo y los factores que afectan particularmente al sistema cardiovascular, como son: aceleración, actividad fuera del vehículo, ausencia de gravedad, descompresión de la cabina, diferentes grados de hipoxia, temperaturas extremas, etcétera.

Valoración cardiovascular

Historia clínica

El médico examinador deberá actuar como prevencionista, es decir, debe tratar de identificar todos aquellos procesos ya existentes cuya evolución natural conduce al daño del aparato cardiovascular y a situaciones clínicas que comprometen la vida del astronauta o la seguridad y el éxito de las misiones en las que participará. No es un buen candidato aquel que presente factores de riesgo para el corazón y los vasos como los siguientes: obesidad, sedentarismo, carga genética intensa para enfermedad coronaria, tabaquismo, alcoholismo intenso, algún tipo de drogadicción, hipo e hipertiroidismo, hiperlipidemia, hipertensión arterial, diabetes mellitus, gota, antecedentes de síncope de cualquier origen, síndrome de Woff Parkinson White,

personalidad tipo A muy acentuada, antecedentes de sufrir arritmia o fibrilación auricular con el ejercicio, anemia de células falciformes y antecedente de alteraciones electrocardiográficas.

Sin duda, algunos de estos factores de riesgo son modificables, como la obesidad, el sedentarismo, la hiperuricemia, ciertas formas de dislipidemia, algunas variedades del síndrome de Woff Parkinson White, los daños autoimpuestos como el tabaco, el alcohol y las drogas. Pero en candidatos a astronautas o a pilotos aviadores que presenten este tipo de factores de riesgo para la salud cardiovascular se consideran, en principio, no recomendables para esas funciones específicas, pero en algunos casos el rechazo no es definitivo, porque ha ocurrido que, en evaluaciones posteriores, ciertas condiciones como las que se han mencionado se han corregido en forma total y definitiva.

Si el aspirante manifiesta en el interrogatorio sufrir o haber sufrido síntomas como disnea, palpitaciones, dolor precordial, edema de miembros inferiores, síncope de cualquier origen, cifras altas de presión arterial, antecedentes de reumatismo en la infancia o en la juventud, antecedentes de soplo cardíaco en la infancia, cianosis, tos persistente, fatiga crónica, etcétera, debe investigarse cuidadosamente para tratar de conocer el significado de estos datos.

Examen físico

Los procedimientos clásicos de inspección general, palpación, percusión y auscultación se siguen igualmente en el examen físico cardiovascular para aspirantes a astronautas y pilotos aviadores, pero no es de esperarse encontrar patología evidente en personas que proceden de algunas de las ramas de las fuerzas armadas o en científicos civiles que proceden de diferentes instituciones, porque previamente han sido calificados física y mentalmente, de acuerdo con los estándares vigentes en las diferentes agencias espaciales. Sin embargo, existe la experiencia de que en algunos casos de pilotos de aviación civil o militar, y aun en la selección de astronautas, han pasado inadvertidos algunos procesos cuya expresión clínica es a veces difícil de captar; por ejemplo, comunicación interauricular, persistencia del conducto arterioso, prolapso de válvula mitral, pequeñas estenosis aórticas, grados menores de coartación de la aorta, hiperreactores tensionales, episodios de taquicardia ventricular y de fibrilación auricular, espacio PR corto en el electrocardiograma (que puede ser la única expresión de un WPW), etcétera.

Cualquier anomalía detectada en el examen clínico cardiovascular se valora cuidadosamente y se piden los estudios adicionales que se consideren pertinentes, pero la decisión final se toma cuando se revisan todos los estudios que aquí se mencionan. Por lo que respecta a la presión arterial, las cifras máximas aceptables son 140/90 mmHg para las tres categorías de astronautas y para pilotos aviadores.

Pruebas de laboratorio

Desde los inicios de la exploración espacial las pruebas de laboratorio han sido numerosas durante los exámenes de selección; destacan entre ellas el examen general de orina, la química sanguínea completa, pruebas inmunológicas, serológicas y endocrinológicas, urocultivo, biometría hemática y algunas otras. Por supuesto, todos estos exámenes de laboratorio tienen interés desde el punto de vista cardiovascular, pero el cardiólogo pone énfasis en aquellas que eventualmente puedan ser la causa de trastornos cardíacos y de la circulación; por ejemplo, la presencia de anemia de células falciformes, las dislipidemias, los datos de disfunción endocrinológica y metabólica, los trastornos electrolíticos, las evidencias de nefropatía, neumopatía, etcétera.

Exámenes de gabinete

En lo que respecta a la evaluación del aparato cardiovascular son de rutina los estudios siguientes: a) radiografías de tórax (posteroanterior y lateral); b) electrocardiograma en reposo; c) Holter de 24 horas, d) ECG con esfuerzo máximo en banda sinfín; e) ecocardiograma (los rusos practican también fonomecanocardiograma); f) pruebas funcionales respiratorias; g) mesa de posiciones y h) masaje al seno carotídeo.

Las pruebas anteriores, practicadas a aspirantes a pilotos aviadores y astronautas, han detectado en algunos casos procesos isquémicos subyacentes, susceptibilidad a arritmias cardíacas con el esfuerzo, sensibilidad extrema de los senos carotídeos, prolapso de la válvula mitral, algunas irregularidades del electrocardiograma en los estudios Holter, y hasta la presencia de cardiopatías congénitas que habían pasado inadvertidas.

Pruebas especiales

Los pilotos aviadores (civiles o militares) y los astronautas deben ser calificados en forma física y mental, no sólo para desarrollar las actividades habituales y tolerar adecuadamente los diferentes factores que intervienen en la actividad aeroespacial normal, sino que deben contar con la suficiente dotación biológica, psicológica y técnica para afrontar con éxito las diferentes eventualidades que pueden presentarse durante una misión. Es por esto que una vez seleccionados los astronautas desde el punto de vista médico y técnico, son sometidos a una serie de pruebas que tienen como finalidad hacerles llegar un entrenamiento preliminar sobre sus actividades posteriores, sobre todo, para observar la forma en que su organismo reacciona ante

estímulos que van a encontrar en ciertas fases de la misión. Por cierto, todas estas pruebas inciden en el funcionamiento del aparato cardiovascular en forma preponderante.

Reposo en cama

Es uno de los procedimientos más conocidos y con los que se tiene ya una gran experiencia. Consiste en colocar a los astronautas horizontalmente en una cama sin almohada con una inclinación de 6° abajo de la horizontal (en el extremo de la cabeza); los sujetos deben permanecer siempre en decúbito, en reposo, sólo se les permite, como a los enfermos hospitalizados, realizar los movimientos necesarios para tomar sus alimentos y realizar sus necesidades fisiológicas sin abandonar la cama. La duración de los experimentos puede ir de unos días a varias semanas, incluso meses; en ese lapso se les protege médicamente y se les practican diversos estudios para conocer los cambios que esa postura ocasiona en la fisiología y la anatomía humana.

Esta posición del cuerpo humano reproduce en el transcurso de días o semanas casi todos los cambios que va a experimentar el astronauta durante el vuelo espacial, por ejemplo, se observa una muy evidente migración de líquidos de la parte inferior del cuerpo hacia las regiones cefálicas, atrofia muscular, pérdida de calcio en los huesos, disminución del volumen sanguíneo y de los glóbulos rojos, desacondicionamiento cardiovascular (que se manifiesta clínicamente por intolerancia ortostática), etcétera. Desde el punto de vista anatómico se observa adelgazamiento de las extremidades inferiores, edema facial y palpebral, enrojecimiento de las conjuntivas, congestión nasal, dilatación de las venas de la frente y el cuello.

Inmersión en agua

Los centros de investigación médica espacial y las áreas de entrenamiento para astronautas usan cisternas dotadas de una serie de facilidades para estudiar los cambios fisiológicos y anatómicos de los sujetos de experimentación, cambios que son enteramente similares a los que se operan en ausencia de gravedad. Estas cisternas especiales también sirven para practicar ciertas operaciones específicas que los astronautas deben realizar dentro o fuera de las naves espaciales, por ejemplo, arreglar desperfectos como el que presentó el telescopio Hubble, rescatar satélites, practicar la construcción en gravedad cero y otras.

Los efectos en el cuerpo humano de la inmersión prolongada en agua se manifiestan rápidamente y en forma muy clara, sobre todo en lo que respecta a la migración de los líquidos hacia la parte superior del cuerpo, la disminución del volumen total de plasma, la pérdida de electrolitos y la intolerancia ortostática. Este proce-

dimiento no se usa por un periodo mayor de 24 h, debido a los efectos nocivos del contacto prolongado del agua sobre la piel; sin embargo, en Rusia este problema se ha subsanado haciendo flotar a los cosmonautas sobre una tela muy fina colocada sobre la superficie del agua, lo cual les permite flotar y sumergirse sin poner en contacto el agua con la piel; es lo que se conoce como "inmersión seca".

Ahora bien, para practicar las diferentes acciones que los astronautas deben realizar fuera de la nave, éstos son sumergidos con el traje espacial puesto a cierta profundidad de la cisterna; al traje se le añade peso adicional con trozos de plomo en las extremidades y en el tronco, de tal manera que el astronauta no se hunda ni flote en la superficie, sino que se logre balancear en estas dos tendencias y se obtenga lo que se llama "flotación neutral". El traje ofrece al astronauta protección del contacto con el agua y le suministra el aire para respirar y la temperatura adecuada. Dentro de estos depósitos se puede simular el aspecto interior de las astronaves, los diferentes escenarios donde se va a trabajar y con ello practicar las acciones específicas que forman parte del programa de la misión.

Vuelos parabólicos

Existe un procedimiento para obtener la ausencia de gravedad total sin salir de la atmósfera, es decir, suprimir la fuerza de atracción terrestre por unos segundos; esto se logra poniendo a los astronautas en aviones especialmente acondicionados para realizar vuelos parabólicos experimentales. La NASA utiliza un modelo modificado del Boeing 707, al cual se le denomina KC-135. El avión se eleva a 8000 m, una vez que el vuelo es recto y nivelado toma una trayectoria hacia arriba con una inclinación de 45° que dura unos 20 segundos; durante ese trayecto, el peso de los astronautas se incrementa casi al doble; al alcanzar una altitud de unos 10 000 m el avión empieza a describir una parábola, eso lo lleva a una altura de unos 11 000 m y de ahí empieza la parte descendente de la parábola hasta alcanzar de nuevo los 10000 m, esta trayectoria curva dura unos 25 o 30 segundos y durante ese lapso los astronautas pierden su peso, flotan libremente, exactamente como si se encontraran en el espacio exterior; la segunda parte del descenso se hace en trayectoria rectilínea con una inclinación de 45° hasta alcanzar la altura de 8000 m; ese recorrido dura unos 20 segundos y durante ese lapso los astronautas vuelven a sentir el incremento de su peso que alcanza casi el doble del normal.

La maniobra que acaba de describirse se repite hasta 40 veces en una sola jornada de entrenamiento de los astronautas. Si bien los vuelos parabólicos son la única forma de reproducir cabalmente la gravedad cero, tienen la desventaja de que los periodos de ingravidez son muy cortos y no permiten una evaluación integral de los cambios fisiológicos que se experimentan en los vuelos orbitales o en trayectorias interplanetarias. Por esta razón sólo puede obtenerse algunos datos clínicos, como

la presión arterial, la presión venosa o la presión intraocular; se pueden también realizar experimentos físicos como la difusión del calor, la solubilidad en los líquidos, la morfología de las flamas y la observación de otros fenómenos como el vuelo de las aves, el movimiento de los peces y el comportamiento de otras especies en gravedad cero. Las experiencias más importantes que se obtienen con los vuelos parabólicos es la familiarización de los astronautas con la ausencia de gravedad y la práctica por lapsos breves de acciones y procedimientos que se realizarán en las misiones proyectadas.

La centrífuga

La centrífuga es un dispositivo que se usa extensamente en la aviación militar y en las agencias espaciales; tiene como finalidad reproducir las fuerzas de aceleración que se experimentan durante las misiones de combate o en maniobras acrobáticas, y en el caso de las actividades espaciales para reproducir las fuerzas de aceleración que se experimentan cuando un vehículo espacial es puesto en órbita o en trayectoria interplanetaria, así como para reproducir la desaceleración que las astronaves experimentan al reingresar en la atmósfera en caída libre.

Una centrífuga para uso humano está constituida esencialmente por los siguientes componentes: un poste central vertical sobre el que gira horizontalmente un brazo metálico a cuyo extremo distal se fija una góndola que aloja en su interior a los sujetos en estudio; además, un sistema de control para operar la centrífuga y estudiar las reacciones fisiológicas de los individuos en estudio. Las centrífugas conocidas hasta ahora para estos fines son de tamaño diferente, el brazo de rotación que sostiene la góndola puede ir de 5 a 15 m de longitud, lo que genera fuerzas de aceleración (radial) de diversa magnitud, los más cortos generan fuerzas G de menor magnitud, los más largos hasta 10 fuerzas G. La intensidad de la aceleración depende de la velocidad que se imprima al brazo que sostiene la góndola, en todo caso, estos dispositivos pueden reproducir con mucha aproximación el perfil de la aceleración o desaceleración al que son sometidas las naves espaciales.

Las centrífugas para uso humano son utilizadas para conocer la capacidad de tolerancia a la aceleración que tienen los pilotos de combate y de acrobacia; también estas maniobras sirven para el entrenamiento y estudio individual de los astronautas, de acuerdo con las características de cada misión. Los astronautas y cosmonautas de los primeros vuelos al espacio estuvieron sometidos a grandes aceleraciones, en algunos momentos llegaron a soportar hasta ocho fuerzas G (ocho veces su peso normal) durante el lanzamiento y el reingreso a la atmósfera, pero actualmente los transbordadores espaciales de la NASA no llegan a producir aceleraciones o desaceleraciones más allá de tres fuerzas G.

Cámara de altitud

Las naves aéreas presurizadas y los vehículos, trajes y estaciones mantienen siempre una presión de aire o de oxígeno en su interior compatible con la fisiología humana, pero a veces esas naves o sistemas de apoyo vital sufren desperfectos, pueden despresurizarse y conducir a sus tripulantes a un estado de hipoxia que hay que evitar a toda costa, porque deteriora de manera importante las funciones intelectuales y físicas. La cámara de altitud es una caja metálica cuya atmósfera interior puede comprimirse o descomprimirse a voluntad para simular diferentes altitudes en la atmósfera y distintos perfiles de vuelo.

La cámara de altitud se utiliza extensamente en pilotos y astronautas para el estudio de la tolerancia a la hipoxia, la forma particular de reaccionar ante ella es parte del entrenamiento y familiarización con los diferentes grados de hipoxia, su reconocimiento y la forma de evitarla de manera oportuna.

La cámara de altitud también se utiliza para simular cambios de presión barométrica (pB), los cuales se resienten clínicamente en los senos paranasales y la caja del tímpano por la dificultad de entrada y salida del aire en estas cavidades, lo que se manifiesta por dolor de diferente magnitud al bajar o subir la pB. La descompresión rápida o explosiva de la cámara de altitud reproduce muy de cerca los fenómenos físicos y fisiológicos que experimentan los tripulantes de las naves aéreas durante ese tipo de cambios de presión atmosférica, especialmente el cuadro denominado "enfermedad descompresiva" o aeroembolismo. Como se ve, la cámara hipobárica es un instrumento más para simular uno de los factores más comunes e importantes en la actividad aeroespacial: los cambios de presión barométrica.

Presión negativa en la parte inferior del cuerpo

Una forma de simular la acción de la gravedad sobre el cuerpo humano en posición de pie es aplicar presión negativa en la parte inferior del cuerpo durante los experimentos de reposo en cama prolongado o en el transcurso de los vuelos espaciales; en estas dos circunstancias el aparato cardiovascular pierde su condicionamiento normal y el sujeto en estudio o el astronauta que regresa de una misión prolongada tiene dificultad para mantener la posición de pie, porque la hemodinámica se ha modificado y los mecanismos para mantener la presión arterial y el gasto cardíaco se han deteriorado de manera importante.

Los dispositivos que se utilizan para crear presión negativa en la porción inferior del cuerpo tienen diferentes diseños, pero el más conocido es el que utiliza la NASA, el cual consiste en una bolsa de plástico cilíndrica donde se mete la mitad inferior del cuerpo y se sella con un diafragma en la cintura del astronauta. La Agencia Es-

pacial Rusia utiliza una especie de pantalón que se sella en los tobillos y en la cintura, al cual se le llama traje chibis.

Si a un individuo en decúbito se le aplica 40 mmHg de presión negativa en la parte inferior del cuerpo, baja la presión sistólica y el gasto cardíaco, pero aumenta la frecuencia cardíaca, las resistencias periféricas y el nivel de adrenalina y noradrenalina en plasma.

El crear presión negativa de 30 o 40 mmHg produce el mismo efecto que la fuerza de gravedad terrestre sobre los líquidos orgánicos cuando un individuo toma la posición sedente o de pie, es decir, los líquidos del cuerpo tienden a acumularse en la parte inferior del cuerpo y si el aparato cardiovascular se encuentra "desacondicionado" por la permanencia en el espacio o el reposo en cama prolongado, la circulación cerebral se ve comprometida y el individuo tiene dificultad para mantener esa posición, incluso puede hasta perder el conocimiento. Durante el entrenamiento de los astronautas y, sobre todo, durante el vuelo espacial, este procedimiento es muy útil para valorar el grado de desadaptación del aparato cardiovascular y la forma en que va a reaccionar al regreso a tierra, pero también tiene su aplicación para reestimar los mecanismos que mantienen la hemodinámica y la presión arterial, antes de exponerse de nuevo al campo gravitacional terrestre.

La mujer en general tiene menor tolerancia ortostática después de los vuelos espaciales, a la aceleración +Gz y a la aplicación de presión negativa con estos dispositivos.

El confinamiento

Otro procedimiento para simular las condiciones de una misión espacial es crear en tierra escenarios análogos al interior de una nave o estación espacial. Aunque no es posible en estos experimentos hacer desaparecer la fuerza de gravedad, pueden, sin embargo, crearse escenas y condiciones de aislamiento similares a las que se dan durante los vuelos espaciales. Las experiencias hasta ahora adquiridas provienen de estudios realizados en espacios cerrados de laboratorios de algunas instituciones, de estaciones polares y de laboratorios submarinos diseñados especialmente para ese fin. La duración de estos experimentos ha sido de unas semanas hasta un año, y los resultados indican genéricamente que los problemas más comunes se localizan en el área psicológica, en el desacondicionamiento físico general y en el deterioro progresivo del aparato cardiovascular.

Cuando este trabajo se escribe, se prepara un experimento de confinamiento de 500 días de duración en el Instituto de Problemas Biomédicos de la Academia de Ciencias de Rusia, en el cual se trata de conocer la tolerancia humana a un aislamiento tan prolongado que equivale a un viaje de ida y vuelta al planeta Marte.

Exposición a condiciones ambientales extremas

Las prácticas de sobrevivencia en el mar, el desierto, las selvas y los polos son parte rutinaria del entrenamiento de astronautas y pilotos de combate. Existen algunas experiencias dramáticas de cambios extremos de temperatura dentro de las astronaves (Apolo 13, Skykab 2, Estación Mir); también las ha habido al regresar a la Tierra, cuando los tripulantes de misiones rusas se han visto expuestos a las condiciones del desierto en verano y de zonas árticas en invierno.

Valoración final

Se ha hecho costumbre clasificar en tres categorías el grupo de astronautas: pilotos (clase 1), especialistas de la misión (clase 2) y especialistas de carga útil (clase 3). Desde el punto de vista cardiovascular, las tres clases de astronautas son calificados con los mismos estándares; en cambio, en otras áreas de la valoración física, como la visión y la audición, los requerimientos son algo menores en la clase 2 y 3.

Los tripulantes de las primeras misiones espaciales fueron casi exclusivamente hombres y pilotos de prueba de las fuerzas armadas, pero a medida que los estudios científicos se incrementaron en el espacio, se fueron incorporando técnicos y científicos civiles, hombres y mujeres.

Los exámenes médicos de selección son practicados por los servicios médicos de las propias agencias espaciales y, generalmente, participan seis especialidades: medicina aeroespacial, cardiología, oftalmología, otorrinolaringología, neurología y psiquiatría. En la NASA el especialista en medicina aeroespacial revisa los resultados de las seis valoraciones parciales, elabora las conclusiones para cada caso y los expedientes son remitidos a un Consejo de Medicina Aeroespacial, el cual hace la correlación entre el estado de salud del aspirante y los requerimientos que la NASA tiene establecidos. Con sus conclusiones de calificado o no calificado turna a su vez los expedientes al Consejo de Selección de Astronautas, el cual emite la decisión definitiva. Por supuesto, no todos los candidatos cumplen con los requerimientos establecidos por la NASA; las causas más frecuentes de rechazo se ubican en las aéreas de oftalmología, neurología y cardiología. Es digno de mencionar el hecho de que el 100% de los astronautas seleccionados en el examen inicial han llegado sin problemas a cumplir el primer año de entrenamiento para ser definitivamente calificados.

En Rusia el examen médico de selección de cosmonautas se realiza en dos tiempos: primero se practica un examen físico general y pruebas de laboratorio y gabinete de rutina por la institución a la que el candidato pertenece; el resultado de este examen es revisado por expertos del Centro de Entrenamiento de Cosmonautas, del Hospital Central de Aviación Militar y del Instituto de Problemas Biomédicos. En un

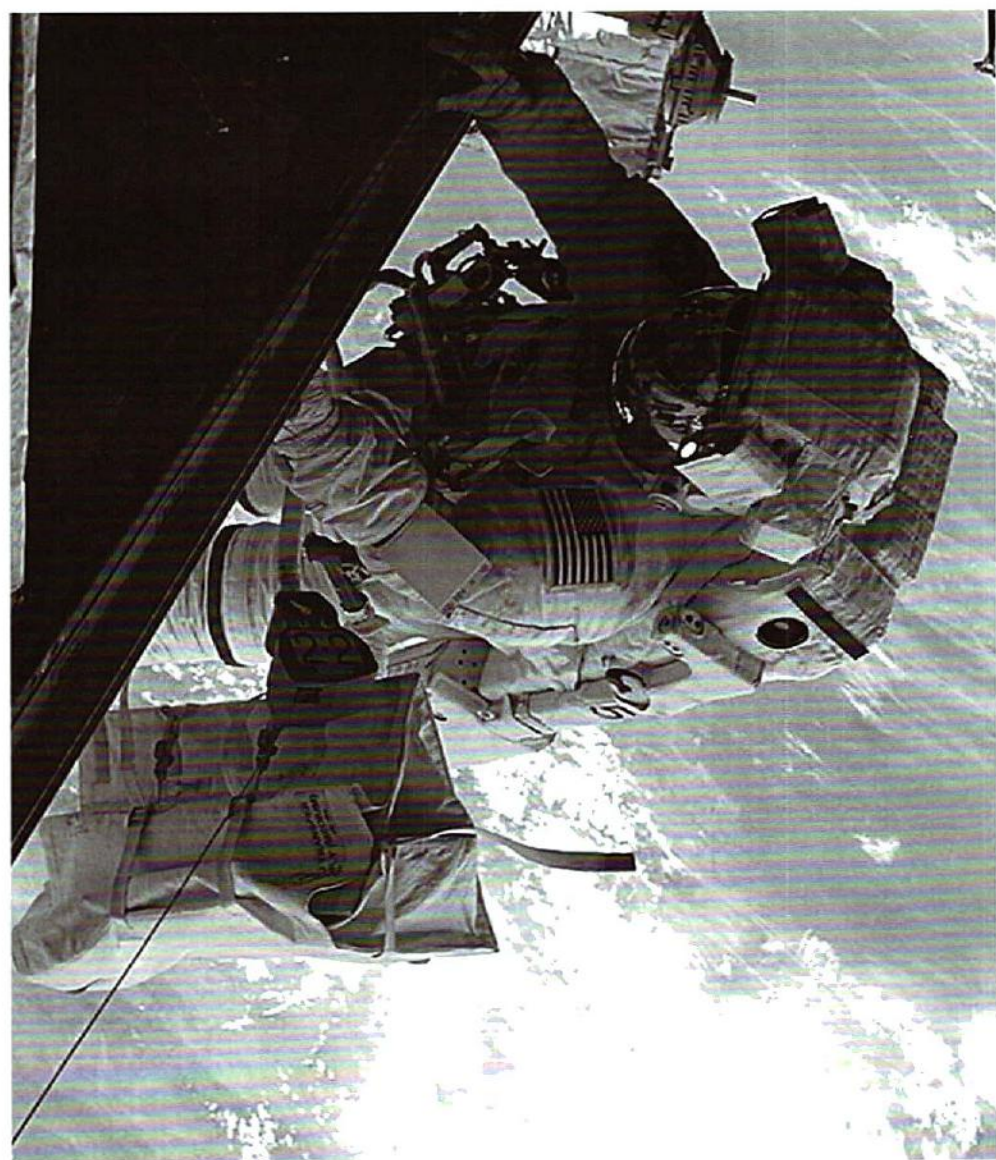
segundo tiempo, los candidatos que hayan pasado con éxito esta etapa son enviados al Hospital Central de Aviación Militar (los aspirantes militares) y al Instituto de Problemas Biomédicos (los aspirantes civiles). Finalmente, los cosmonautas seleccionados en esta segunda etapa son sometidos a otras pruebas de mayor sensibilidad para detectar problemas clínicos subyacentes. La calificación final viene después de que los aspirantes han demostrado tolerar con éxito las pruebas que simulan en tierra las condiciones operacionales que encontrarán en el espacio exterior. Dichas pruebas se practican en cámara de altitud, centrífuga humana, vuelos parabólicos en avión, simuladores de vuelo y otras.

Referencias

- Banks RD., Gray G., *Use of the Holter monitor during flying operations*. [Abstract.] *Aviat Space Environ Med*, 1992; 63:408.
- Brown CM., Hecht MJ., Neundorfer B., Hilz MJ., *Effects of lower body negative pressure on cardiac and vascular responses to carotid baroreflex stimulation*. *Physiol Res*, 2003; 52:637-45.
- Convertino VA., *Cardiovascular consequences of bed rest: effect on maximal oxygen uptake*. *Med Sci Sports Exerc*, 1997; 29:191-6.
- Convertino VA., Doerr DF., Eckberg DL., et al., *Head-down bed rest impairs vagal baroreflex responses and provokes orthostatic hypotension*. *J. Appl Physiol*, 1990; 68:1458-64.
- Convertino VA., *Lower body negative pressure as a tool for research in aerospace physiology and military medicine*. *J. Gravity Physiol*, 2001; 8:1-14.
- Convertino VA., Doerr DF., Mathes KL., et al., *Changes in volume, muscle compartment, and compliance of the lower extremities in man following 30 days of exposure to simulated microgravity*. *Aviat Space Environ Med*, 1989; 60:653-8.
- Guillingham KK., *G tolerance standards for aircrew training and selection*. *Aviat Space Environ Med*, 1987; 58:1024-6.
- Guillingham KK., *High-G training for fighter aircrew*. *Aviat Space Environ Med*, 1988; 59:12-9.
- Hamilton DR., Murray JD., Ball CG., *Cardiac Health for astronauts: coronary calcium scores and ccr criteria for selection and retention*. *Aviat Space Environ Med*, 2006; 77:377-387.
- Hamilton DR., Murray JD., Ball CG., et al., *Cardiac health for astronauts: current selection standards and their limitations*. *Aviat Space Environ Med*, 2005; 76:615-26.
- Hargens AR., Tipton CM., Gollnick PD., et al., *Fluid shifts and muscle function in humans during acute, simulated weightlessness*. *J. Appl Physiol*, 1983; 54:1003-9.
- Katkov VE., Kaurin LI., Chestukhin VV., Kirsch K., *Central circulation during exposure to seven-day microgravity (head-down tilt, immersion, space flight)*. *Physiologist*, 1987; 30:S36.
- McKenzie I., Gillingham KK., *Incidence of cardiac dysrhythmias occurring during centrifuge training*. *Aviat Space Environ Med*, 1993; 64:687-91.

- McTaggart WG., Cardús D., *Data acquisition system for the artificial gravity simulator (AGS)*. Physiologist, 1992; 35:S119.
- Meck JV., Dreyer SA., Warren LE., *Long-duration head-down bed rest: project overview, vital signs, and fluid balance*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80(5, Suppl.):A1-8.
- Montgomery LD., *Body volume changes during simulated microgravity I: technique and comparison of men and women during horizontal bed rest*. Aviat Space Environ Med, 1993; 64:893-8.
- Montgomery LD., *Body volume changes during simulated microgravity II: comparison of horizontal and Head-down bed rest*. Aviat Space Environ Med, 1993; 64:899-904.
- Mukai CN., Lathers CM., Charles JB., et al., *Acute hemodynamic responses to weightlessness during parabolic flight*. J. Clin Pharmacol., 1991;31:993-1000.
- Murthy G., Marchbanks R., Watenpaugh DE., et al., *Increased intracranial pressure in humans during simulated microgravity*. Physiologist, 1992; 35:S184-5.
- Nixon, JV., Murray RG., Bryant C., *Early cardiovascular adaptation to simulated zero gravity*. J. Appl Physiol, 1979; 46:541-8.
- Pavy-Le Traon A., Heer M., Narici MV., Rittweger J., Vernikos J., *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.
- Platts SH, Martin DS., Stenger MB., Perez SA., Ribeiro LC., Summers R., Meck JV., *Cardiovascular adaptations to long-duration head-down bed rest*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80(5, Suppl.):A29-36.
- Polese A., Sandler H., Montgomery LD, *Hemodynamic-responses to seated and supine lower-body negative-pressure-comparison with +Gz acceleration*. Aviat Space Environ Med, 1992; 63:467-75.
- Watanabe S., Nagaoka S., Usui S., et al., *Parabolic flight experiments on physiological data acquisition and processing technologies using small jet aircraft (MU300)*. J. Gravitational Physiol, 1994; 1:92-5.
- Wathenpaugh DE., Breit GA., Buckley TM., Balland RE., Murthy G., Hargens AR., *Human cutaneous vascular responses to whole-body tilting, Gz centrifugation, and LBNP*. J. Appl Physiol 2004;96:2153-60.
- Whinnery JE., *The electrocardiographic response to high +G_z centrifuge training*. Aviat Space Environ Med, 1990; 61:716-21.

Capítulo 12



Fisiología cardiovascular en el espacio

En el momento mismo en que la nave tripulada entra en órbita terrestre, el cuerpo de los astronautas y los objetos sueltos dentro de la cabina empiezan a flotar libremente y se inicia el estado de ingravidez o de "microgravedad", como se le conoce más comúnmente. Lo anterior obedece a que la fuerza centrífuga que impulsa la astronave a 28 000 km/h y en una dirección tangencial a la superficie terrestre es igual, pero de signo contrario, a la fuerza centrípeta o fuerza de atracción de la Tierra. Desde ese momento el aparato cardiovascular empieza a experimentar una serie de cambios fisiológicos y anatómicos muy importantes que son parte de un proceso general de adaptación del organismo humano a la ausencia de gravedad.

Antes de describir estos fenómenos conviene aclarar que por razones operacionales los astronautas deben permanecer dentro de la cabina en plataforma algún tiempo antes del lanzamiento, en una postura que les va a permitir tolerar satisfactoriamente la aceleración de escape, esto es, en decúbito dorsal, pero con las extremidades pélvicas flexionadas de tal manera que los muslos formen un ángulo recto con el eje del tronco y las piernas apoyadas en posición horizontal. Al adoptar esta postura se producen los siguientes cambios hemodinámicos: a) migración de líquido (sangre y líquido extravascular) desde las regiones inferiores hacia las superiores del cuerpo; b) incremento del retorno venoso; c) la circulación central se congestiona, especialmente a nivel de pulmones y el corazón; d) se eleva la presión venosa central; e) el volumen sistólico y el gasto cardiaco se incrementan y f) se observa taquicardia, la cual se atribuye al aumento de la precarga y al estrés mismo del momento.

Los cambios cardiovasculares que se operan durante el tiempo que se permanece en plataforma y en posición de decúbito dorsal son similares, pero de menor intensidad, a los que van a registrarse en las primeras horas del vuelo; por eso algunos investigadores estiman que lo que ocurre en ese lapso previo al vuelo representa una especie de periodo de "preaclimatación" o de preadaptación al ámbito espacial.

Para facilitar la comprensión de las modificaciones fisiológicas, anatómicas y clínicas que experimenta el sistema cardiovascular y respiratorio en microgravedad debemos tomar en consideración que este proceso se cumple en aproximada-

mente seis semanas y que ocurre en dos fases sucesivas: una inicial y acelerada que no va más allá de la primera semana de vuelo y en ella se registran cambios muy rápidos y de gran magnitud, y otra complementaria y lenta que se extiende hasta la sexta semana de la misión.

Primera fase

En ésta se registran los siguientes cambios mayores.

Redistribución de líquidos del cuerpo

Desde los primeros minutos del vuelo se inicia una importante migración de líquidos (sangre, líquido extravascular) desde las extremidades inferiores, la pelvis y el abdomen bajo, hacia el tórax, el cuello y la cabeza; entre las primeras seis y 10 horas del vuelo se ha desplazado alrededor del 12% del líquido de los miembros inferiores y hasta dos litros en los días subsecuentes; desde las primeras horas se aprecia un notable adelgazamiento de las piernas y de los muslos, las venas de estas regiones se colapsan o se vuelven menos aparentes. En cambio, la circulación central (pulmón y cavidades cardíacas) se congestionan; aparece edema facial y palpebral, enrojecimiento de la piel de la cara y la mucosa nasofaringea, hiperemia conjuntival; las venas de la cara y el cuello se dilatan importantemente, lo mismo ocurre con las venas de los antebrazos y el dorso de las manos; hay congestión sanguínea retiniana que se manifiesta por dilatación de su vasculatura; los astronautas manifiestan sensación de congestión sanguínea cefálica, cefalea, vértigo y desorientación espacial.

Los estudios de ecocardiografía bidimensional y Doppler practicados a bordo de las naves espaciales han documentado claramente, durante los primeros días, los siguientes datos: aumento de la precarga, tiempo de eyección del ventrículo izquierdo, del volumen latido y gasto cardíaco; aumenta el flujo arterial en el cuello pero disminuye en los miembros inferiores; el corazón aumenta su tamaño por dilatación de las cuatro cavidades; la vascularidad pulmonar se incrementa uniformemente en toda la extensión de los pulmones; el tórax aloja una cantidad adicional de sangre de unos 800 ml.

La frecuencia cardíaca siempre se eleva de manera importante durante los primeros minutos y horas del vuelo; este hecho se atribuye en parte al aumento del retorno venoso y consecuentemente al mayor volumen sanguíneo que el corazón debe manejar en la primera fase del vuelo; sin embargo, se estima que obedece más bien al estrés psicológico que impone la misión, porque se ha observado que cuando se trata de un solo tripulante durante la primera órbita, la frecuencia cardíaca se eleva de 50 al 100% y cuando son varios tripulantes el incremento es del 5 al 35%.

Modificación del régimen de presiones

Al cesar la acción de la gravedad sobre el cuerpo humano durante el vuelo espacial, la presión hidrostática desaparece, ya no se registran las diferencias regionales de presión arterial que se observan en tierra, en especial en posición de pie. En gravedad cero la presión arterial es la misma en toda la extensión del cuerpo humano, la presión venosa y la presión capilar son igualmente uniformes en todo el organismo; de la misma manera las presiones pulmonares (arterial, venosa, intrapleural) en teoría no deben presentar diferencias regionales.

La presión arterial sistémica varía mucho en la primera fase del vuelo, a veces se eleva ligeramente, en otros casos descende, o bien, permanece en los mismos niveles que se registraron antes del vuelo. En todo caso, estas variaciones no tienen significación clínica.

Es digno de mencionar aquí que en ausencia de gravedad, la presión arterial de los miembros inferiores es significativamente menor a la que se registra en tierra; esto se atribuye a la desaparición de la presión hidrostática, a la disminución del flujo sanguíneo arterial en estas extremidades y al abatimiento de las resistencias periféricas.

La presión venosa registrada directamente con catéter colocado en el interior de una vena del pliegue del codo fue hecha por primera vez por investigadores alemanes durante las misiones Spacelab D1 y D2 en 1985 a bordo de un trasbordador espacial de la NASA; se observó que la presión venosa periférica es muy inferior en microgravedad que la registrada inmediatamente antes del vuelo. Se había estimado en teoría, que la presión venosa central (PVC) estaría elevada de manera importante en virtud de que en microgravedad hay un aumento considerable del retorno venoso (en los primeros días de la misión); existe congestión de la circulación central y es muy aparente la dilatación de las venas de las regiones superiores del cuerpo; sin embargo, durante las misiones Space Life Science 1 (1990) y Space Life Science 2 (1993), investigadores de la Agencia Espacial Europea y de la NASA registraron la PVC colocando un catéter en la vena cava superior próximo a la aurícula derecha, y encontraron que la PVC no sólo no está elevada, sino que está permanentemente baja, próxima al cero. Antes del vuelo la PVC en decúbito es de 15 cm H₂O, sentado de 8.4 y en microgravedad de 2.5 cm H₂O.

En otras misiones se han hecho estudios oftalmológicos utilizando un tonómetro automático para registrar la presión intraocular, la cual se eleva rápidamente en órbita hasta más del 100%. Se infiere que siendo el ojo una especie, de estructura externa del cerebro, la presión intracraneal debe estar muy elevada durante la primera fase del vuelo; de manera que la cefalea, el vértigo, la náusea y el vómito observados en la mayor parte de los astronautas no obedece solamente a problemas laberínticos, sino a elevación importante de la presión intracraneal.

Modificación del volumen de los líquidos del cuerpo

En tierra, las dos formas más usuales de simular los efectos de la microgravedad son la posición supina con la cabeza a 6° abajo de la horizontal y flotar en el agua; en ambas situaciones se registra migración importante de líquido desde las regiones inferiores del cuerpo hacia el tórax, el cuello y la cabeza, lo cual produce, entre otras cosas, incremento de la presión venosa central y dilatación de las cavidades cardíacas; esto trae como consecuencia estimulación de los sensores de volumen de las cavidades cardíacas y los vasos próximos al corazón, lo que se traduce por incremento del péptido natriurético atrial, descenso de la hormona antidiurética y estimulación por vía refleja de la filtración glomerular, lo que se traduce por un mayor volumen urinario durante las primeras horas del procedimiento. Contra lo previsto hipotéticamente, en microgravedad (durante la cual en los primeros días se registra un importante incremento del retorno venoso y dilatación de las cavidades cardíaca), no existe aumento de la PVC ni aumento del volumen urinario; al contrario, ambas variables descienden. No existe todavía una explicación satisfactoria para esta aparente contradicción.

En el transcurso de la primera semana del vuelo los astronautas pierden de dos a 4 kilogramos de peso; esto se atribuye a una menor ingestión de alimentos debido a incomodidad gástrica que en la fase inicial de la misión experimenta la mayor parte de los astronautas, pero fundamentalmente se debe a la casi supresión del reflejo de la sed y a la ingesta mínima de líquidos.

De acuerdo con los resultados de los estudios realizados en seis astronautas de las misiones Space Life Science 1 y 2, el volumen plasmático hacia el término del primer día en microgravedad disminuyó un 17%; el volumen de líquido extracelular (que comprende el 38% del volumen total de agua en el cuerpo) descendió un 10% en ese lapso; la sangre, que tiende a acumularse en las regiones cefálicas, también disminuye su volumen total desde los primeros días de la misión, lo que lleva implícito la reducción de la masa total de eritrocitos y un descenso considerable de la eritropoyetina.

Por otra parte, el volumen sanguíneo dentro de la cavidad torácica aumenta alrededor de 800 ml; además, el líquido intersticial se incrementa en las regiones cefálicas (mediante estudios de ultrasonido se observa que la piel sobre la tibia disminuye su grosor en el espacio un 15%, en tanto que en la frente aumenta 7%).

El volumen urinario promedio en 24 horas fue persistentemente inferior al de antes de la misión, esto contrasta con la esperada diuresis abundante en la primera fase de los vuelos espaciales que se había supuesto anteriormente, como respuesta a la congestión de la circulación central. En diferentes misiones se ha documentado insistentemente la elevación de la hormona antidiurética y descenso del péptido natriurético atrial. El volumen de sangre y el flujo sanguíneo en los miembros pélvicos, así como su contenido de líquido extravascular descienden notablemente.

Con técnica de impedancia y Doppler se aprecia un incremento de la pulsatilidad del flujo cerebral arriba de 46% y aumento del volumen de líquido intracraneal. Otras observaciones muestran evidencia de disminución de las resistencias vasculares y de vasodilatación cerebral, lo que explica la sensación frecuente de congestión o agolpamiento de la sangre en la cabeza que aqueja a los astronautas en los primeros días.

Cambios electrolíticos y hormonales

Durante la primera semana en microgravedad, el sodio y el cloro en sangre aparecen ligeramente disminuidos en las pruebas realizadas en diferentes misiones. El potasio, en cambio, durante la primera semana muestra valores superiores a los de antes del vuelo. El calcio y el fósforo séricos y su excreción urinaria también experimentan un importante incremento desde la primera semana, lo que traduce un aumento de su movilización a partir de los huesos.

Las hormonas que juegan un papel muy importante en la regulación del volumen de líquidos y la concentración iónica sufren modificaciones en microgravedad. Por ejemplo, la hormona antidiurética (que promueve la retención de agua) aumenta desde las primeras horas y el péptido natriurético atrial (que promueve la excreción de agua y sal) disminuye de un 30 a un 40% en la fase inicial de la misión. La aldosterona (que favorece la retención de sodio y la excreción de potasio) generalmente presenta valores bajos en el plasma los primeros cinco o seis días, de ahí se eleva por algún tiempo para normalizarse al término de la segunda fase de adaptación. El cortisol (que propicia la retención de sodio y excreción de potasio) se eleva en el plasma durante la primera semana del vuelo, desciende después pero tiende a permanecer elevado durante toda la misión. La adrenalina (que se relaciona en particular con la ansiedad) y la noradrenalina (cuya elevación se relaciona más con el estrés físico) presentan valores discordantes en diferentes misiones, de suerte que sus variaciones no fueron lo suficientemente importantes para atribuirlos a un factor específico en la actividad espacial.

La experiencia hasta ahora obtenida no se considera suficiente para ofrecer una explicación satisfactoria a los cambios electrolíticos y hormonales que se operan en microgravedad.

Remodelación del tórax

Un hecho interesante que se observa desde la primera etapa del vuelo es que el tórax cambia su morfología, en efecto, se vuelve más amplio a expensas de un aumento del diámetro anteroposterior, más corto porque el diafragma se eleva unos 5 cm y los espacios intercostales se amplían; su configuración en el espacio recuerda al tórax

en "tonel" del enfisematoso, pero se diferencia de éste en que la densidad de la vascularidad pulmonar está aumentada y el diafragma está elevado. La supresión de la fuerza gravitacional en el espacio conduce a que la perfusión y la ventilación tengan una distribución uniforme en toda la extensión de los pulmones; ya no se observa como en tierra una mayor proporción de sangre en las bases y una mayor cantidad de aire en los vértices, ahora la perfusión y la ventilación se vuelven homogéneas.

La presencia de un mayor volumen de sangre dentro de la caja torácica y la elevación del diafragma modifican de alguna manera la mecánica respiratoria, porque la capacidad vital y el volumen circulante están ligeramente disminuidos en microgravedad; sin embargo, las pruebas funcionales respiratorias son normales, incluso muestran que el intercambio gaseoso a nivel de la membrana alveolocapilar mejora, lo que se explica por una expansión alveolar generalizada y una mejor distribución de la sangre capilar en los pulmones.

Los cambios funcionales y anatómicos que se han mencionado en párrafos anteriores corresponden a una primera fase de adaptación del sistema cardiovascular a la microgravedad. De ahí en adelante, algunas de estas modificaciones van disminuyendo, otras se detienen y algunas más retroceden hasta que la situación se estabiliza y se alcanza un aparente estado de homeostasis alrededor de la sexta semana del vuelo.

Segunda fase

En la segunda fase del proceso adaptativo cardiorrespiratorio al ámbito espacial destacan los siguientes datos de interés:

- a) La migración de líquidos de las regiones caudales hacia las regiones cefálicas continúa por algunos días, las piernas se vuelven aún más delgadas porque pierden líquidos y por atrofia muscular; el flujo arterial y el pulso disminuyen importantemente en las extremidades inferiores; sus venas superficiales se colapsan o se vuelven menos aparentes. La acumulación de líquidos en las partes superiores del cuerpo presenta cierto grado de disminución en esta segunda fase, pero persiste la congestión de la circulación central, la ingurgitación venosa en la cara y el cuello, el edema facial y en algunos casos la sensación de congestión cefálica.
- b) El régimen de presiones queda establecido permanentemente desde esta segunda fase, de tal manera que la presión arterial es uniforme en toda la extensión del cuerpo; de igual manera, la presión venosa central permanecerá baja y la presión intraocular se normaliza con valores similares a los que se registran en tierra.

- c) En cuanto al volumen de los líquidos, se observa que el retorno venoso desciende ostensiblemente, ahora existe una disminución del volumen diastólico final del ventrículo izquierdo, del volumen latido, del gasto cardíaco y del flujo carotídeo, y así permanecen por el resto de la misión. También disminuye de un 10 a un 15% el tamaño de las cavidades cardíacas, porque el volumen total de sangre decrece; proporcionalmente también disminuye la masa total de glóbulos rojos, lo cual origina lo que se conoce como "anemia espacial". Cuando se ha completado la segunda fase de adaptación cardiovascular al ámbito espacial, el volumen plasmático disminuye de un 10 a un 15% y en menor grado el líquido intersticial y el volumen total de agua del cuerpo. El volumen sanguíneo intratorácico disminuye algo en esta fase, pero sigue siendo alto durante toda la misión.
- d) La remodelación del tórax adquiere en esta fase su configuración definitiva, es decir, se vuelve más corto por elevación del diafragma, más amplio por aumento del diámetro anteroposterior y más anchos los espacios intercostales. Esta transformación anatómica del tórax se explica en parte porque las vísceras abdominales al perder su peso se desplazan hacia arriba y tienden a acomodarse debajo del diafragma, de suerte que el límite inferior del área hepática y el límite de las bases pulmonares se elevan unos 5 cm; esto ocasiona además que el corazón se horizontalice ligeramente y el ápex (por cierto, difícil de palpar en microgravedad) puede localizarse en el cuarto espacio intersticial izquierdo; además, los ruidos respiratorios se atenúan en las bases, probablemente por compresión de tejido pulmonar en esa zona.
- e) Por lo que respecta a los valores de electrolitos y hormonas en sangre, al término de la segunda fase de adaptación en los vuelos de larga duración se ha observado lo siguiente: el sodio y el cloro no experimentan modificaciones de consideración durante toda la misión, siempre se mantienen en límites normales o muy próximos a ello. El potasio, en cambio, en la mayor parte de los tripulantes tiende a mantenerse ligeramente por debajo del límite normal, lo que ha motivado que se adicione a sus dietas una mayor cantidad de potasio. El calcio sérico se mantiene persistentemente elevado durante toda la misión, lo que se explica por la movilización permanente que en este elemento se opera principalmente desde los huesos que en tierra soportan el peso del cuerpo.

Es escasa la información de que se dispone con relación al comportamiento de algunas hormonas en vuelos prolongados, pero algunas determinaciones aisladas muestran que la hormona antidiurética permanece elevada, así como la aldosterona y el cortisol. En alguna determinación de catecolaminas en sangre hecha en vuelo de va-

rios meses de duración se observó que los niveles de adrenalina y noradrenalina fueron casi el doble que antes del vuelo, pero debe aclararse que estas dos hormonas tienen más que ver con estrés emocional (adrenalina) y con el esfuerzo físico (noradrenalina) que con el factor de la microgravedad por sí mismo.

Investigadores de la Agencia Espacial Alemana han encontrado en cuatro astronautas que la hormona del crecimiento se eleva importantemente y que la hormona sexual masculina, la testosterona, disminuye durante el vuelo espacial.

Los signos vitales, como la frecuencia cardíaca, la presión arterial y la temperatura, varían poco durante el vuelo; sin embargo, es digno de mencionar el hecho de que durante el sueño la frecuencia cardíaca en algunos astronautas disminuye de manera importante (hasta 40 o menos latidos por minuto) y la arritmia respiratoria funcional normal se acentúa, lo cual se atribuye a un incremento del tono parasimpático.

Por los estudios realizados en los tripulantes de las misiones de mediana y larga duración ha quedado establecido que esta segunda fase del proceso de adaptación cardiovascular a la microgravedad termina alrededor de los 45 días de permanencia en el espacio; de ahí en adelante los cambios cardiovasculares son mínimos o imperceptibles. Los estudios realizados en tripulantes de las misiones rusas Salyut y Mir que han tenido una duración de seis a catorce meses han mostrado que la función cardíaca, el consumo de oxígeno por el miocardio, el espesor de las paredes de los ventrículos y, en general, la estructura anatómica del corazón y los vasos, no sufren ninguna alteración; la reducción del tamaño del corazón de un 10 a 15% se debe a que el sistema cardiovascular maneja en microgravedad menor volumen sanguíneo.

Si bien el sistema cardiocirculatorio no sufre un deterioro permanente en tripulantes que han permanecido un año o más en el espacio, debemos reconocer que cuanto mejor se adapte a la microgravedad mayormente se desadapta al campo gravitacional terrestre, de tal manera que al regreso se sufre la intolerancia ortostática y por algún tiempo los astronautas son incapaces de mantener la posición de pie y caminar. Por otra parte, el proceso de adaptación al espacio exterior produce cambios muy importantes en algunos parámetros clínicos cardiovasculares que los vuelve muy diferentes a los que reconocemos como normales en tierra. Esto se verá con más detalle en el capítulo siguiente.

Trastornos cardiovasculares

En cuanto a trastornos cardiovasculares específicos ocurridos durante los vuelos espaciales podemos mencionar algunos cambios del ritmo cardíaco de tipo banal, como son extrasístoles auriculares y ventriculares y bradicardia sinusal acentuada durante el sueño (atribuible esta última a vagotonía).

Excepcionalmente se han observado trastornos del ritmo cardíaco de mayor significación, por ejemplo, un episodio breve de taquicardia ventricular que presentó un astronauta de Apolo XV en la superficie de la Luna durante una jornada de ocho horas de actividad fuera de la nave atribuida a hipokalemia; y otro ocurrido a bordo de la estación MIR en un cosmonauta ruso, consistente en fibrilación auricular que no se pudo resolver con las maniobras habituales y fue necesario regresarlo a tierra para su tratamiento.

En todo caso, ninguno de estos eventos ha sido atribuido a la oc u otro factor ambiental. Tampoco ha sido probado que la exposición prolongada a la og haya hecho surgir problemas cardiológicos subyacentes.

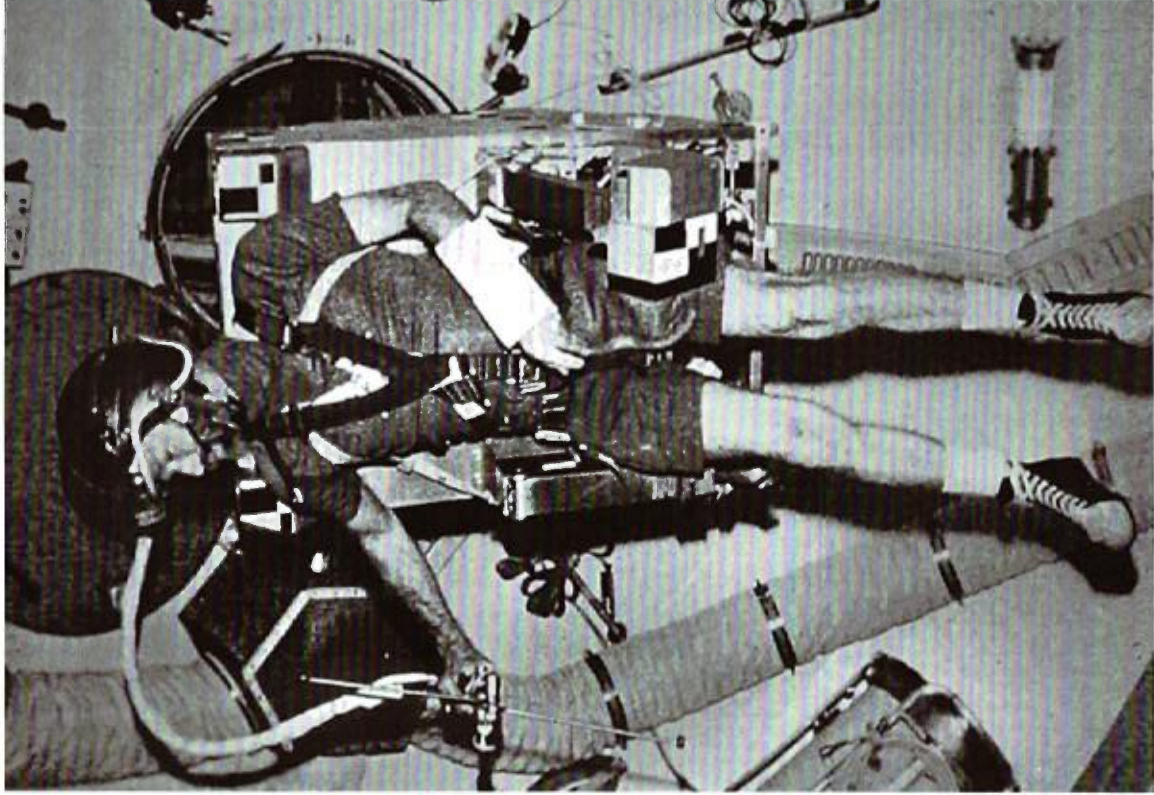
Referencias

- Alfrey CP., Udden MM., Leach-Huntoon C., Driscoll T., Picckett MH., Aaslid R., *Control of red blood cell mass in spaceflight*. J. Appl Physiol, 1996; 81:98-104.
- Atkov O., Bednenko VS., and Fomina GA., *Ultrasound techniques in space medicine*. Aviat Space Environ Med, 1987; suppl58:69-71
- Buckey JC., Gaffney FA., Lane LD., Levine BD., Watenpaugh DE., Wright SJ., Yancy CW Jr. and Blomqvist CG. *Central venous pressure in space*. J. Appl Physiol, 1996; 81:19-25.
- Aubert AE., Beckers F., Verheyden B., *Cardiovascular function and basics of physiology in microgravity*. Acta Cardiol, 2005; 60:129-51.
- Baisch FJ., *Body fluid distribution in man in space and effect of lower body negative pressure treatment*. Clin Investig, 1993; 71:690-9.
- Bungo M., W., Charles J. B., Riddle, J., Roesch, J., Wolf, D. A. and Sheddon, M. B., *Echocardiographic investitation of the hemodynamics of weightlessness*. J. Amer Coll Cardiol, 7(2):192A, 1986.
- Bungo M. W., Goldwater D. J., Propp, R. L. and Sandler, H., *Echocardiographic evaluataion of Space Shuttle crewmembers*. J. Appl Physiol. 62: 278-283, 1987.
- Bungo MW., Jhonson PJ., *Cardiovascular examinations and observations of deconditioning during space shuttle obital flight test program*. Aviat Space Environ Med, 1983; 54:1001-4.
- Charles JB., Lathers CM. Cardiovascular adaptation to spaceflight. J Clin Pharmacol 1991, 31:1010-23.
- Charles JB., Lathers CM., *Summary of lower body negative pressure experiments during space flight*. J. Clin Pharmacol, 1994;34:571-83.
- Churchill SE., Bungo MW., *Responses of the cardiovascular system to spaceflight*. In: Churchill SE, ed. Fundamentals of space life science vol. 1. Malabar: Krieger; 1997:41-64.
- Foldager N., Andersen TAE., Jessen FB., Ellegaard P., Stadeager C., Videbaek R., and Norsk P. *Central venous pressure during weightlessness in humans*. In: *Scientific results of the German Spacelab-Mission D-2*. Köln, Germany: DLR, 1995, p. 695-696.
- Fritsch-Yelle JM., Leuenberger UA., D'Aunno DS., Rossum AC., Brown TE., Wood ML., et al., *An episode of ventricular tachycardia during long-duration spaceflight*. Am J. Cardiol 1998; 81:1391-2.

- Gazenko OG., Shulzhenko EB., Turchaninova VF., Egorov AD., *Central and regional hemodynamics in prolonged space flights*. Acta Astronaut 1988; 17:173-9.
- Gazenko O. G., and Gurovsky N.N., (eds.) *Results of Medical Evaluations Performed on the Orbital Station Salyut-6/Soyuz*. Moscow, Nauka, 1986.
- Goldberger A. L., et al., *Heart rate dynamics during long-term space flight: report on Mir cosmonauts*. Circulation, 86(4): I-658, 1992.
- Hoffler G. W., Bergman, S. A., and Nicogossian, A. E., *In-flight lower limb volume measurement*. In: The Apollo-Soyuz Test Project Medical Report (NASA SP-411). Edited By Nicogossian, A. E. Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, pp. 63-68, 1977.
- Hoffler G. W., *Cardiovascular studies of U. S. space crews: An overview and perspective*. In: *Cardiovascular Flow Dynamics and Measurements*. Edited by Hwang, N. H. C., and Normann, N. A. Baltimore, MD, University Park Press, 1977.
- Henry W. L., Epstein S. E., Griffith J. M., Goldstein, R. E., and Redwood D. R., *Effect of prolonged space flight on cardiac function and dimensions*. In: *Biomedical Results from Skylab* (NASA SP-377). Edited by Johnston, R. S., and Dietlein, L. F., Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, pp. 366-371, 1977.
- Hoffler, G. W., Johnson, R. L., *Apollo Flight crew cardiovascular evaluations*. In: *Biomedical Results of Apollo* (NASA SP-368). Edited by Johnston, R. S., Government Printing Office, pp. 227-264, 1975.
- Iglesias R., *La Ruta hacia el hombre cósmico*, 2ª ed. México: Editorial Limusa, 2009.
- Johnson R. L., Driscoll, T. B., and LeBlanc, A. D., *Blood volume changes*. In: *Biomedical Results from Skylab* (NASA SP- 377). Edited by Johnston, R. S., and Dieting Office, pp. 284-312, 1977.
- Johnston P. C., Jr., *Fluid volume changes induced by space flight*. Acta Astronautica 6: 1335-1341, 1979.
- Johnston R.S., and Dietlein, L.F., (eds.) *Biomedical Results from Skylab* (NASA SP-377). Washington D.C., U.S. Government Printing Office, 1977.
- Johnston R.S., Dietlein L.F., and Berry, C.A. (eds) *Biomedical results of Apollo* (NASA SP-368). Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1975.
- Kirsch K. A., Heanel F., and Ricker, L., *Venous pressure in microgravity*. Naturwissenschaften. 73:447-449, 1986.
- Lathers CM., Charles JB., Elton KF, et al. *Acute hemodynamic responses to weightlessness in humans*. J Clin Pharmacol 1989;29:615-27.
- 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; 81:105-16.
- Leach CS., Inners LD., Charles JB., *Changes in total body water during spaceflight*. J. Clin Pharmacol 1993; 31:1001-6.
- Levine BD., Lane LD., Watenpauha DE., Gafnney FA., Cuckey JC., Blomqvist CG., *Maximal exercise performance after adaptation to microgravity*. J. Appl Physiol, 1996; 81:686-94.
- Levy MN., Talbot JM., *Cardiovascular deconditioning of spaceflight*. Physiologist, 1983; 26:297-303.
- Michels DB., West JB., *Distribution of pulmonary ventilation and perfusion during short periods of weightlessness*. J. Appl Physiol: Respir Environ Excer Physiol, 1978; 45:987-998.

- Moore TP., Thornton WE., *Space Shuttle inflight and postflight fluid shifts measured by leg volume changes*. Aviat Space Environ Med, 1987; 58:A91-6.
- Mulvagh S. L., Charles J. B., Riddle J. M., Rehbein T. L., and Bungo, M. W. *Echocardiographic evaluation at the cardiovascular effects of short-duration space-flight*. J. Clin. Pharmacol. 31: 1024-1026, 1991.
- Newman DG., Callister R., *The non-invasive assessment of stroke volume and cardiac output by impedance cardiography: a review*. Aviat Space Environ Med, 1999; 70:780-9.
- Perhonen MA., Franco F., Lane LD., Buckey JC., Blomqvist CG., Zerwekh JE., et al., *Cardiac atrophy after bed rest and spaceflight*. J. Appl Physiol 2001;91:645-53.
- Nicogossian A., Hoffler G. W., Johnson R. L., and Gowen R. J., *Determination of cardiac size following space missions of different durations: The second manned Skylab mission*. Aviat Space Environ. Med. 47(4):362-365, 1976.
- Prisk GK., Guy HJB., Elliott AR., et al., *Pulmonary diffusing capacity, capillary blood volume, and cardiac output during sustained microgravity*. J. Appl Physiol, 1993;75:15-26.
- Sawin C. F., Nicogossian A. E., Rummel J. A., and Michel E. L., *Pulmonary function evaluation during the Skylab and Apollo-Soyuz missions*. Aviat Space Environ Med, 47(2): 168-172, 1976.
- Summers RL., Martin DS., Meck JV., Coleman TG., *Mechanism of space flight induced changes in left ventricular mass*. Am J. Cardiol 2005; 95:1128-30.
- Thornton WE., Moore TP., Pool SL., *Fluid shifts in weightlessness*. Aviat Space Environ Med, 1987; 58:A86-90.
- Vaïda, Pierre, Christian Kays, Daniel Rivière, Pierre Téhoueyres, and Jean-Luc Lachaud. *Pulmonary diffusing capacity and pulmonary capillary blood volumen during parabolic flights*. J. Appl. Physiol, 82(4): 1091-1097, 1997.
- Verbanck S., Larsson H., Linnarsson D., Prisk GK., West JB., and Paiva M. *Pulmonary tissue volume, cardiac output, and diffusing capacity in sustained microgravity*. J. Appl Physiol 1997; 83:810-816.
- Watenpaugh DE., Breit GA., Ballard RE., Hargens AR., *Monitoring acute whole-body fluid redistribution by changes in leg and neck volumes*. Aviat Space Environ Med, 1997; 68:858-62.
- Watenpaugh DE., Hargens AR., *The cardiovascular system in microgravity*. In: Fregly MJ., Blatteis CMIII, eds. Handbook of Physiology: environmental physiology. New York: Oxford University Press, 1996:631-674.
- White RJ and Blomqvist CG., *Central venous pressure and cardiac function during spaceflight*. J Appl Physiol 1988; 85:738-746.
- Zhang LF., *Vascular adaptation to microgravity: what have we learned?* J. Appl Physiol 2001; 91:2413-30.

Capítulo 13



Examen clínico cardiovascular en el espacio

En este capítulo se reproduce el trabajo de revisión realizado por los doctores Ramiro Iglesias y Jorge Kuri en el Instituto Nacional de Cardiología "Ignacio Chávez" de la ciudad de México. Se ha decidido conservar el formato original con el que ha sido presentado en diferentes foros porque es suficientemente explícito y accesible para el médico no familiarizado con la medicina aeroespacial.

Introducción

El sistema cardiovascular (scv) es una de las áreas del cuerpo humano particularmente influenciada por la gravedad terrestre (1g); este sistema posee una serie de mecanismos de ajuste hemodinámico que asegura la adecuada perfusión sanguínea cerebral, cualquiera que sea la posición que el cuerpo adopte con respecto al vector de la aceleración de la gravedad. La mayor parte de los fisiólogos toman la posición de pie o sedente como referencia para el estudio de la fisiología cardiovascular debido a que es en esta postura en la que los seres humanos pasamos la mayor parte de la vida (dos terceras partes en promedio). Por efecto de la gravedad, algunas constantes clínicas cardiovasculares varían en las diferentes partes del cuerpo; por ejemplo, la presión arterial, la amplitud del pulso arterial y la presión venosa tienen valores más altos en las regiones caudales que en las cefálicas. La presión hidrostática (o presión gravitacional) está condicionada por la acción de la gravedad y es la responsable de que en un individuo en posición ortostática, la presión arterial media sea en la cabeza de 70 mmHg, al nivel del corazón de 100 mmHg y en los pies de 200 mmHg; que la presión venosa sea de menos 10 mmHg en el seno venoso longitudinal superior, de 0 mmHg al nivel del corazón y de 90 mmHg en los pies; que la presión arterial y venosa pulmonar tengan valores superiores en las bases que en los vértices. La acción de la gravedad es también un factor condicionante de que otras variables clínicas normales en tierra se modifiquen importantemente en ausencia de gravedad (0g).

Durante los vuelos espaciales, específicamente cuando las naves se encuentran en órbita terrestre, en trayectoria interplanetaria o en la órbita de otros cuerpos ce-

lestes, la fuerza gravitacional deja de actuar; se entra en un estado de ingravidez, los astronautas y los objetos flotan libremente dentro de la cabina. La og es, con mucho, el factor en el ámbito espacial que introduce el mayor número de cambios en el scv y en el resto del cuerpo humano; estas modificaciones son numerosas e importantes; son parte de un proceso de adaptación general a la ingravidez y aunque no representan patología alguna durante la estancia en el espacio exterior, es necesario conocerlas para evitar posibles errores de interpretación.

Este trabajo establece una correlación entre el conjunto de datos clínicos obtenidos en un examen cardiovascular normal en tierra y los mismos parámetros en ausencia de gravedad; se observará que las variables clínicas cardiovasculares normales de una misma persona son diferentes en una y otra situación. Se analiza el mecanismo que origina cada uno de estos cambios; se hacen algunas consideraciones sobre el significado clínico que estas modificaciones, normales en ingravidez, tendrían si se les valorara con criterio de "cardiología terrestre".

El proceso de adaptación del scv a la og presenta dos fases con marcadas diferencias hemodinámicas: la primera fase se inicia en el momento en que la nave entra en órbita y cubre 72 horas, o algo más; se caracteriza por incremento del retorno venosa (precarga), el volumen latido, el gasto cardíaco y las dimensiones de las cavidades cardíacas. La segunda fase se extiende hasta la sexta semana de la misión y se caracteriza por cambios progresivos y apenas perceptibles. Las variables normales del scv en og que aquí describimos pueden observarse plenamente desde la segunda semana del vuelo.

Consideramos que es oportuno reconocer y difundir en la clase médica estos aspectos cardiológicos peculiares, no sólo por su interés académico, sino por el valor clínico que adquirirán cuando en el futuro la telecardiología espacial sea una práctica común.

Métodos

Los autores han realizado una revisión general de la experiencia acumulada en la medicina espacial, particularmente lo relacionado con los cambios anatomofuncionales que experimenta el scv en og. Se han revisado también los resultados de los procedimientos que se utilizan en tierra para simular los efectos de la og, en particular de los tres siguientes: a) reposo en cama con la cabeza 6° abajo de la horizontal, durante días, semanas o meses; b) inmersión en agua durante horas o días; y c) vuelos parabólicos en avión para producir ingravidez durante 30 segundos.

Se ha hecho acopio de información clínica cardiovascular obtenida en diferentes misiones espaciales; de la descripción de estudios electrocardiográficos, ecocardiográficos y Doppler; de las imágenes de estudios radiológicos practicados antes y des-

pués de algunos vuelos. Con toda esa información, dispersa en diferentes publicaciones, integramos el conjunto de datos clínicos cardiovasculares normales en OG y los comparamos con los datos clínicos cardiovasculares normales en tierra. Finalmente, se menciona el significado que cada uno de los datos clínicos normales en OG tendrían si se les comparara con el examen clínico cardiovascular en 1 G.

Resultados

Primero se mencionan los cambios cardiovasculares que se observan en el examen físico (inspección, palpación, percusión y auscultación). Luego se presentan los datos obtenidos con equipo especializado (radiografía de tórax, electrocardiograma, ecocardiograma, Doppler, cateterismo cardiaco derecho y pruebas funcionales respiratorias).

Los cambios cardiovasculares más sobresalientes en un examen clínico son los siguientes: a) edema facial y palpebral; b) hiperemia conjuntival; c) rubicundez del rostro; d) congestión de la circulación retiniana (los primeros días del vuelo); e) dilatación de las venas de la frente, el cuello, los antebrazos y dorso de las manos; f) el ápex difícil de palpar se encuentra por encima del punto donde la línea medio claviclar cruza el espacio intercostal izquierdo; g) la frecuencia cardiaca tiende a ser baja, particularmente durante el sueño; h) la presión arterial es igual en los miembros superiores e inferiores; i) el tórax se vuelve cilíndrico, "en tonel"; j) el diafragma desplazado unos cinco o seis cm arriba de lo normal; k) el área hepática está desplazada hacia arriba; l) el pulso arterial disminuye de amplitud en los miembros pélvicos.

Estos cambios en la exploración cardiovascular en tierra sugerirían importante patología cardiopulmonar, pero en el espacio deben ser considerados normales y obedecen a un proceso de adaptación al estado de ingravidez.

Los estudios de laboratorio y gabinete practicados a bordo de naves espaciales ofrecen los siguientes datos de interés: a) el tamaño del corazón disminuye de un 10 a un 15%; b) el tórax se vuelve más ancho y más corto; c) la presión venosa central, contra lo que se había supuesto teóricamente, no está elevada (cifras obtenidas directamente por cateterismo derecho); d) el volumen latido y el gasto cardiaco disminuyen entre 15 y 20%; e) el volumen total de sangre disminuye de un 10 a un 15%; f) el hematocrito aumenta ligeramente; g) el electrocardiograma sugiere vagotonía; h) el estudio Doppler muestra disminución del flujo arterial en los miembros inferiores hasta de un 30%; i) la circulación central se encuentra incrementada (en promedio 800 ml más de sangre en la cavidad torácica); j) la perfusión y la ventilación son uniformes en toda la extensión de los pulmones; k) la presión arterial pulmonar tiene valor homogéneo en todas las re-

giones del pulmón, y l) la vascularidad pulmonar está aumentada y uniformemente distribuida.

En la tabla 1 se señalan las diferencias de los datos clínicos cardiovasculares normales en 0 G y en 1 G.

En la tabla 2 se presentan las diferencias de los datos clínicos cardiovasculares obtenidos mediante equipo especializado durante el vuelo espacial y en tierra.

Tabla 1. Diferencias en las variables clínicas cardiovasculares normales en vuelo espacial y en tierra

<i>Variables clínicas</i>	<i>En vuelo espacial</i>	<i>En tierra</i>
Edema facial y palpebral	Presente	Ausente
Dilatación de venas de la frente y el cuello	Presente	Ausente
Hiperemia conjuntival	Presente	Ausente
Rubicundez del rostro	Presente	Habitualmente ausente
Palpación de ápex	En el cuarto espacio intercostal izquierdo	En el quinto espacio intercostal izquierdo sobre la línea medio clavicular
Frecuencia cardíaca	A menudo muy disminuida durante el sueño	A veces disminuida durante el sueño
Presión arterial	Igual en miembros inferiores y superiores	Más alta en miembros inferiores que en los superiores
Configuración del tórax	Cilíndrico, corto, "en tonel"	El diámetro anteroposterior más corto que el transversal
Posición del diafragma	Desplazado 5 a 6 cm hacia arriba	Posición anatómica habitual
Ruido respiratorio	Disminuido en las bases	Normal
Área hepática	Desplazada hacia arriba	El límite inferior a la altura del borde costal derecho
Amplitud del pulso arterial en miembros inferiores	Disminuido	Normal
Venas de miembros inferiores	Inaparentes	Aparentes

Tabla 2. Diferencia en las variables clínicas cardiovasculares normales obtenidas a través de estudios de laboratorio y gabinete en vuelo espacial y en tierra

<i>Variable</i>	<i>En vuelo espacial</i>	<i>En tierra</i>
Presión venosa	Igual en todo el cuerpo	Baja o negativa en las regiones cefálicas mayor en las regiones caudales
ECG durante el sueño	Signos de vagotonía acentuada	Vagotonía ocasional
Tamaño del corazón	Disminuido	Normal
Presión venosa central	Normal	Normal
Volumen latido y gasto cardíaco	Disminuido	Normales
Volumen sanguíneo total	Disminuido	Normal
Volumen plasmático	Disminuido	Normal
Hematocrito	Aumento ligero	Normal
Flujo arterial en miembros inferiores	Disminuido	Normal
Circulación central	Congestionada	Normal
Ventilación pulmonar	Uniforme en todo el pulmón	Aumenta en vértices
Perfusión pulmonar	Uniforme en toda la extensión del pulmón	Aumentada en vértices, disminuida en las bases
Presión arterial pulmonar	Uniforme en toda la extensión del pulmón	Aumentada en las bases, disminuida en los vértices
Vascularidad pulmonar	Uniforme	Acentuada en las bases

Discusión

Los cambios fisiológicos y anatómicos que experimenta el scv en el espacio exterior son consecuencia de la supresión del efecto de la fuerza gravitacional terrestre. Uno de los hechos fundamentales que ocurren en el organismo humano en og es la desaparición de la presión hidrostática; esto trae aparejado que la presión arterial sistémica sea la misma en todas las regiones del organismo, que la presión venosa sea también uniforme y que la presión arterial pulmonar sea la misma en los vértices y las bases.

Otro hecho fisiológico de importancia capital es la redistribución de líquidos del cuerpo humano, es decir, la migración de un importante volumen de sangre y de líquido extravascular desde las porciones inferiores del cuerpo hacia las regiones cefálicas. Lo anterior explica el edema facial y palpebral, la hiperemia conjuntival y la rubicundez del rostro. Además, la apariencia de las venas superficiales se invierte, ahora son más visibles en la frente, la cara y el cuello, y las venas de las extremidades pélvicas se colapsan.

La plétora de la circulación central que se observa en OG estimula los sensores de volumen cardiopulmonares, lo que se traduce por una disminución de volumen plasmático y una reducción apreciable del volumen sanguíneo total; la disminución del tamaño del corazón se atribuye a que las cavidades cardíacas manejan un menor volumen sanguíneo.

En ingravidez, las vísceras abdominales ya no pesan, ya no cuelgan del diafragma, éste asciende unos centímetros. El tórax se vuelve más corto, incrementa su diámetro anteroposterior y tiende a volverse cilíndrico. El desplazamiento del diafragma hacia arriba y la desaparición del peso del corazón hacen que éste también ascienda y se horizontalice; por eso el ápex se localiza algo por encima del punto donde normalmente se palpa en el examen cardiológico en tierra.

Durante los vuelos espaciales se registra una disminución de más del 30% del flujo sanguíneo arterial de las extremidades pélvicas, disminución del volumen total de sangre, atrofia muscular y migración de líquidos a las regiones cefálicas, lo cual explica la disminución de la presión arterial y de la amplitud del pulso en estas extremidades.

No obstante que el tórax se acorta, que aloja una mayor cantidad de sangre en su interior y que las bases son parcialmente comprimidas por el ascenso del diafragma, el intercambio gaseoso se realiza en forma muy satisfactoria en OG, porque existe una ventilación y perfusión uniforme en todos los segmentos pulmonares.

A continuación se menciona el significado que las variables clínicas cardiovasculares normales en microgravedad, tendrían si se los observara en un examen cardiovascular en tierra.

Edema facial y palpebral

Su presencia sugiere síndrome nefrótico, hipoproteinemia, edema angioneurótico, mixedema, síndrome de Cushing y compresión u obstrucción de vena cava superior.

Dilatación de las venas de la cara y el cuello

Son numerosos los padecimientos que pueden causar plétora venosa cefálica y del cuello: insuficiencia cardíaca derecha, pericarditis constrictiva, derrame pericárdico,

insuficiencia o estenosis de la válvula tricúspide, hipertrofia severa de ventrículo derecho, hipertensión arterial pulmonar importante, atresia tricuspídea, mixoma en aurícula derecha, infarto del ventrículo derecho, obstrucción de la vena cava superior e hipervolemia de cavidades derechas (en algunas cardiopatías congénitas).

Hiperemia conjuntival

Esta manifestación clínica generalmente es secundaria a infección bacteriana o viral, a irritación química o física y a reacción alérgica.

Rubicundez del rostro

Puede ser normal en algunas personas, pero comúnmente obedece a quemadura solar, fiebre, temperatura ambiente elevada, irritación química o alérgica y rubor emocional.

Desplazamiento del ápex hacia arriba

Esta situación puede observarse cuando el corazón es rechazado hacia arriba por desplazamiento del diafragma secundario a parálisis frénica, ascitis a tensión, embarazo en el tercer trimestre, obesidad extrema, neumoperitoneo y distensión abdominal por problemas digestivos diversos.

Bradicardia durante el sueño

Una situación así puede sugerir la existencia de enfermedad del seno o del nodo, bloqueo AV completo o simplemente bradicardia sinusal.

Presión arterial igual en todo el cuerpo

En tierra, en individuos sanos, la presión arterial siempre es mayor en miembros pélvicos; la uniformidad de la presión arterial que se observa en el espacio a expensas de su disminución en los miembros inferiores, sugeriría obstrucción parcial de las arterias ilíacas o femorales.

Tórax cilíndrico

En tierra un tórax de aspecto cilíndrico con espacios intercostales más amplios y diafragma abatido corresponde a un individuo enfisematoso. En el espacio el tórax se vuelve cilíndrico y los espacios intercostales más amplios, lo que sugeriría un tórax de enfisematoso; sin embargo, el diafragma no está abatido, sino elevado.

Ascenso del diafragma

El diafragma marca el límite inferior de los pulmones, cualquiera que sea la fase de la respiración. Si mediante la percusión se determina previamente ese límite, se verá que en OG se desplaza unos cinco o seis cm hacia arriba, y una zona de matidez en esa región podría hacer pensar en un derrame pleural o en otra patología pleuropulmonar.

Ruidos respiratorios disminuidos en las bases

Esta observación clínica se ha hecho durante los vuelos espaciales y se atribuye a la compresión parcial de los pulmones en sus bases debido a la elevación del diafragma; sin embargo, no existe ninguna alteración en la ventilación. En cambio, en tierra sugeriría hipoventilación de diversas causas.

Área hepática desplazada hacia arriba

En OG obedece a la elevación del diafragma; en tierra podría corresponder a paresia diafragmática derecha, a la existencia de neumoperitoneo, absceso hepático u otra patología que produjera tal desplazamiento.

Disminución de la amplitud del pulso arterial en miembros inferiores

En OG se atribuye a la disminución de flujo arterial en estas extremidades. En tierra esto correspondería a obstrucción parcial de arterias ilíacas o femorales.

Conclusiones

Los datos clínicos cardiovasculares normales en tierra (1G) no son los mismos que en el espacio exterior, en OG. Durante los vuelos espaciales, y debido a un proceso de adaptación del scv a la OG, el examen físico del sistema corazón-pulmón-vasos ofrece datos muy distintos a los que obtenemos en tierra. Cada uno de esos datos, normales en OG, pero valorados con criterio de "cardiología terrestre", serían indicativos de patología cardiovascular y pulmonar severa.

El conocimiento de estos hechos tiene no sólo interés académico, tiene un valor clínico real, especialmente cuando el uso de la telecardiología espacial sea una práctica común.

Por último, debemos señalar que los cambios adaptativos del scv que se operan en OG, no representan alteraciones permanentes, al menos hasta donde el conocimiento actual nos lo indica. Al regreso a tierra ocurre un proceso inverso, ahora es la readaptación a 1 G, hecho que toma días o semanas, de acuerdo a la duración de la misión espacial.

Referencias

- Atkov O., Bednenko VS., and Fomina GA., *Ultrasound techniques in space medicine*. Aviat Space Environ Med, 1987; suppl 58:69-71.
- Blomqvist G., *Regulation of the systemic circulation at microgravity and the readaptation to 1G*. Regulat Med Sci Sports Exerc, 1996; 28(Suppl.):S9-S13.
- Buckley JC., Gaffney FA., Lane LD., et al., *Central venous pressure in space*. NEJ Med, 1993; 328:1853-4.
- Bungo, M., W., and Jhonson P. C., Jr. *Cardiovascular examinations and Observations of de-conditioning during the Space Shuttle Orbital Flight Test Program*, Aviat Space Environ Med, 54(11):1001-1004, 1983.
- Bungo M, W., Charles J. B., Riddle, J., Roesch, J., Wolf, D. A., and Sheddon, M. B., *Echocardiographic investigation of the hemodynamics of weightlessness*. J. Amer Coll Cardiol 7(2):192A, 1986.
- Bungo MW., Goldwater DJ., Popp RL., Sandler H., Echocardiographic evaluation of Space Shuttle crewmembers. J. Appl Physiol 1987; 62:278-283.
- Charles JB., Bungo MW., Fortner OW., *Cardiopulmonary function*. In: Nicogossian AE, Huntoon CL., Pool SL, eds. Space Physiology and Medicine, 3 rd ed. Philadelphia: Lea and Febiger, 1994: Chapter 14.
- Charles JB., Lathers CM., *Cardiovascular adaptation to spaceflight*. J. Clin Pharmacol 1991; 31:1010-1013.
- Churchill SE., Bungo MW., *Response of the cardiovascular system to spaceflight*. In: Churchill SE., ed. Fundamentals of Space Life Sciences, vol. I. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1997: Chapter 4.
- Cintron MN., Lane HW., Leach CS., *Metabolic consequences of fluid shifts induced by microgravity*. Physiologist 1990; 33: S16-19.
- Fritsch JM., Charles JB., Bennet BS., Jones MM., Eckberg DL., *Short-duration spaceflight impairs human carotid baroreceptors cardiac reflex responses*. J. Appl Physiol 1992; 73(2):664-671.
- Fritsch JM., Charles JB., Jones MM., Wood ML., *Microgravity decreases heart rate and arterial pressure in humans*. J. Appl Physiol 1996; 80: 910-4.
- Gazenko OG., Schulzhenko EB., Turchaninova VF., Egorov AD., *Central and regional hemodynamics in prolonged spaceflight*. Acta Astronautica. 1988; 17:173-79.
- Gazenko O. G., and Gurovskiy N.N., (eds.) *Results of Medical Evaluations Performed on the Orbital Station Salyut-6/Soyuz*. Moscow, Nauka, 1986.

- Goldstein MA., Edwards RJ., and Schroeder JP., *Cardiac morphology after conditions of microgravity during COSMOS 2044*. J. Appl Physiol Suppl 1992; suppl73:94-100.
- Grigoriev AI., Yegorov AD., *The effects of prolonged spaceflights on the human body*. In: *Advances in Space Biology and Medicine*, vol. I. Edited By Bonete SL., Greenwich, CT., JAI Press, pp. 1-35, 1991.
- Gundel A., Drescher J., Spatenko YA., Polyakov VV., *Changes in basal heart rate in spaceflight up to 438 days*. Aviat Space Environ Med, 2002; 73:17-23.
- Harris BA., Billica RD., Sheryl LB, et al., *Physical examination during spaceflight*. mayo Clin Proc, 1997; 72:301-308.
- Henry, W. L., Epstein, S. E., Griffith J. M., Goldstein, R. E., and Redwood, D. R., *Effect of prolonged space flight on cardiac function and dimensions*. In: *Biomedical Results from Skylab* (NASA SP-377). Edited by Jhonston, R. S., and Dietlein, L. F., Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, pp. 366-371, 1977.
- Henry WL., Epstein SE., Griffith JM., Goldstein RE., and Redwood DR., *Effect of prolonged space flight on cardiac functions and dimensions*. In: *Biomedical Results from Skylab*. Greenbelt, MD: NASA, 1977, p. 366-371.
- Hoffler G. W., Bergman, S. A., and Nicogossian, A. E. *In-flight lower limb volume measurement*. In: *The Apollo-Soyuz Test Project Medical Report* (NASA SP-411). Edited By Nicogossian, A. E. Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, pp. 63-68, 1977.
- Hoffler GW., Johnson RL: *Apollo flight crew cardiovascular evaluation*. In: *Blomedical Results of Apollo* (NASA SP-368). Edited by Johnston RS., Dietlein LF, Berry CA. Washington DC., US Government Printing Office, pp. 227-264, 1975.
- Hoffler G. W., Johnson R. L., *Apollo Flight crewcardiovascular evaluations*. In: *Biomedical Results of Apollo* (NASA SP-368). Edited by Johnston, R. S., Government Printing Office, pp. 227-264, 1975.
- Holland AW., *Physiologic adaptation of man in space*. Aviat Space Environ Med, 1987; 58(9): A 11- A 135.
- Johnston R.S., and Dietlein, L.F., (eds.) *Biomedical Results from Skylab* (NASA SP-377). Washington D.C., U.S. Government Printing Office, 1977.
- Johnston R.S., Dietlein, L.F., and Berry, C.A. (eds) *Biomedical results of Apollo* (NASA SP-368). Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1975.
- Kirsch K. A., Heanel, F., and Ricker, L., *Venous pressure in microgravity*. *Naturwissenschaften*. 73:447-449, 1986.
- Leach CS., Grigoriev AI., Notochin YV., *Fluid and electrolyts metabolism on 2-52 week spaceflight. Rewiev of findings*. In: *Fluid and Electrolyt Regulation in Spaceflight*. San Diego: Univelt, Incorporated, Chapter 2.
- Mulvagh SL., Charles JB., Riddle JM., et al. *Echocardiographic evaluation of the cardiovascular effects on short-duration spaceflight*. J. Clin Pharmacol 1991; 31:1024-1026.
- Nicogossian A., Hoffler, G. W., Johnson, R. L., and Gowen, R. J., *Determination of cardiac size following space missions of different durations: The second manned Skylab mission*. Aviat. Space Environ. Med, 47(4):362-365, 1976.
- Nicogossian AE., Hoffler GW., Johnson RL., Gowen RJ., *Determination of cardiac size from chest roentgenograms following Skylab missions*. In: *Biomedical Results from Skylab*

- (NASA-SP-377). Edited by Jonhston RS, Dietlein LF. Washington DC, US Government Printing Office, pp. 400-405, 1977.
- Nicogossian AE., Sawin CF., Huntoon CL., *Overall physiologic response to spaceflight. In: Nicogossian AE, Huntoon CL., Pool SL., eds. Space Physiology and Medicine, 3ª ed., Philadelphia: Lea and Febiger, 1994: chapter 11.*
- Perhonen MA., Franco F., Lane LD., Buckey JC., Blomqvist CG., Zerwekh JE., et al., *Cardiac atrophy after bed rest and spaceflight.* J. Appl Physiol 2001;91:645-53.
- Sawin C. F., Nicogossian A. E., Rummel, J. A., and Michel, E. L., *Pulmonary function evaluation during the Skylab and Apollo-Soyuz missions.* Aviat Space Environ Med, 47(2): 168-172, 1976.
- Summer RL., Platts SH., Martin DS., Coleman TG., *Systems analysis of the mechanisms of cardiac diastolic function changes after microgravity exposure.* Acta Astronautica 2008; 63:722-6.
- Summers RL., Martin DS., Meck JV., Coleman TG., *Mechanism of Spaceflight-induced changes in left ventricular mass.* Am J. Cardiol 2005; 95:1128-30.
- Thorton WE., Hoffler GW., Rummel JA., *Anthropometric changes and fluid shifts. In: Biomedical Results from Skylab (NASA SP-377).* Edited by Jonhston RS., and Dietlein LF. Washington DC, US Government Printing Office, pp. 330-338, 1997.
- Verbanck S., Larsson H., Linnarsson D., Prisk GK., West JB., and Paiva M., *Pulmonary tissue volume, cardiac output, and diffusing capacity in sustained microgravity.* J Appl Physiol 1997; 83:810-816.
- Watenpugh WE., Hargens AR., *The cardiovascular system in microgravity. In: Fregly MJ, Blatteis CM, eds. Handbook of Physiology. The gravitational environment, I: microgravity, Chapter 29.* New York: Oxford University Press, 1996; 631-674.
- Waters WW., Ziegler MG., Meck JV., *Post-spaceflight orthostatic hypotension occurs mostly in women and is predicted by low vascular resistance.* J. Appl Physiol 2002; 92:586-94.

Capítulo 14



El aparato cardiovascular después de los vuelos espaciales

Se ha mencionado en notas anteriores que el aparato cardiovascular (al igual que otros aparatos y sistemas) se adapta satisfactoriamente a la ausencia de gravedad, pero al mismo tiempo se desadapta al campo gravitacional terrestre; de tal manera que al regresar hay problemas, los mismos que experimenta un individuo que ha permanecido por tiempo prolongado en cama y de pronto se incorpora a la posición de pie. Por eso es preciso que los astronautas esperen un tiempo determinado para que el sistema cardiocirculatorio vuelva a adaptarse a la gravedad terrestre.

Síndrome de Intolerancia Ortostática

El conjunto de síntomas, signos y ajustes hemodinámicas que experimentan los astronautas al regresar a tierra después de un viaje al espacio es conocido como Síndrome de Intolerancia Ortostática.

Manifestaciones clínicas

- *Sintomatología.* Al tocar la superficie terrestre lo primero que experimenta el astronauta es la sensación de que su cuerpo ha aumentado considerablemente su peso, siente extrema debilidad física y gran dificultad para incorporarse a la posición de pie, más difícil todavía le resulta caminar. Siente palpitaciones, trastornos visuales y sensación de desvanecimiento, puede incluso perder el conocimiento. Este cuadro reproduce muy de cerca lo que le ocurre a un enfermo que se reincorpora a la posición de pie después de haber permanecido en cama días o semanas y haber flotado en el agua horas o días.
- *Signos clínicos.* Los datos clínicos cardiovasculares más ostensibles son: taquicardia, disminución de la presión arterial, dificultad para palpar los pulsos arteriales en las regiones superiores del cuerpo, presíncope y síncope.

Fisiopatología

Son varios los factores que concurren para generar este síndrome de intolerancia ortostática al regreso. Podemos citar los siguientes:

- a) Desplazamiento de un 20% de la sangre hacia las regiones por abajo del diafragma.
- b) Disminución del volumen total de sangre (anemia espacial) de 15 a 20%.
- c) La función de los barorreceptores está deteriorada.
- d) Disminución en sangre de la noradrenalina.
- e) Disminución de la respuesta vasoconstrictora en miembros inferiores.
- f) Atrofia muscular y aumento de la capacitancia en miembros pélvicos.
- g) Todo lo anterior propicia que al regreso a tierra, el astronauta experimente disminución del retorno venoso, del gasto cardíaco y de la perfusión cerebral, a pesar del incremento de la frecuencia cardíaca.

Factores condicionantes

- *La sensibilidad individual.* Se ha observado que hay astronautas que se recuperan más rápidamente que otros, no obstante haber estado sometidos exactamente a las mismas condiciones.
- *La duración del vuelo.* El periodo de recuperación, en general, es proporcional a la duración de la misión, es decir, en los vuelos cuya duración ha sido de unos cuantos días, el periodo de readaptación no va más allá de una semana; en cambio, los viajeros que han permanecido durante meses en el espacio exterior han tenido necesidad de esperar mucho más tiempo para la completa readaptación del aparato cardiovascular.
- *La intensidad del ejercicio físico realizado.* La experiencia obtenida hasta ahora permite afirmar categóricamente que el ejercicio físico es el procedimiento más útil para abatir la desadaptación del sistema cardiocirculatorio al ámbito terrestre y que cuanto más ejercicio se realice a bordo de las astronaves, mayor será la protección al regresar a tierra.
- *Falta de aplicación de presión negativa en la parte inferior del cuerpo.* Se ha notado que los astronautas que no siguen regularmente esta medida de protección durante el vuelo, particularmente en aquellos que en las últimas cuatro horas de la misión no se les aplica 30 mmHg de presión negativa en la parte inferior del cuerpo y no toman abundante agua y sal, el síndrome de intolerancia ortostática es más severo.

Pruebas para valorar la intolerancia ortostática

Después del aterrizaje de las tripulaciones espaciales se acostumbra practicar algunas pruebas tendientes a hacer una estimación del grado de desadaptación que el aparato cardiovascular ha sufrido durante la estancia en el espacio exterior; las más usuales son las siguientes.

- *Posición de pie.* En cuanto las tripulaciones están disponibles para iniciar la evaluación médica integral, después del aterrizaje, se practica esta prueba que consiste fundamentalmente en lo siguiente: cinco minutos en posición supina, 10 minutos en posición de pie con la espalda pegada a la pared y los talones separados de la misma unos 15 cm, se registra la presión arterial cada minuto y se toma una derivación del electrocardiograma continuamente durante la prueba. En todas las tripulaciones se ha observado invariablemente que la frecuencia cardíaca aumenta considerablemente en esta postura. En algunos individuos se registra descenso de la presión arterial; en otros puede haber presíncope o síncope (en cuyo caso la prueba se termina). En algunos sujetos se ha medido la circunferencia de la pantorrilla, observándose significativo aumento de la circunferencia de esta zona, lo que indica, obviamente, un desplazamiento rápido e importante de líquido hacia las regiones inferiores.
- *Mesa de posiciones.* En algunos casos en lugar de adoptar la posición de pie, se utiliza la mesa de posiciones con la que se lleva al sujeto a una inclinación de 70° con respecto a la horizontal y se procede de la misma manera que con la prueba anterior.
- *Aplicación de presión negativa en la parte inferior del cuerpo.* Se ha mencionado anteriormente que esta prueba reproduce muy de cerca la acción de la gravedad terrestre cuando una persona se encuentra de pie, de tal manera que después del vuelo el astronauta debe estar en posición supina durante la aplicación de este procedimiento. En trabajos realizados en tripulaciones de los transbordadores espaciales de la NASA se ha observado que los astronautas que practicaron las medidas de protección contra el desacondicionamiento cardiovascular durante la misión no presentaron síncope ni presíncope durante la aplicación de la prueba de presión negativa en la parte inferior del cuerpo después del aterrizaje; en cambio, en aquellos que no siguieron estos procedimientos de protección, el 33% sufrió síncope o presíncope con la aplicación de presión negativa en la parte inferior del cuerpo.

Es digno de subrayar el hecho de que aquellos tripulantes que durante las cuatro horas previas al aterrizaje han estado sometidos a presión ne-

gativa de 30 mmHg en la parte inferior del cuerpo y, adicionalmente, una o dos horas antes del descenso han ingerido un litro de agua o jugo y ocho pastillas de un gramo de sal, tienen un mejor control de la presión arterial, una frecuencia cardiaca menor y también menos posibilidades de síncope al descender.

En la NASA el uso de la bolsa de presión negativa antes, durante y después del vuelo sigue habitualmente el siguiente procedimiento: durante un lapso de cinco minutos el sujeto permanece con la mitad inferior del cuerpo dentro de la bolsa de presión negativa en completo reposo, luego se procede a aplicar presión negativa de 8 mmHg durante el primer minuto, 16 mmHg el segundo minuto, 30 mmHg los siguientes tres minutos, 40 mmHg durante cinco minutos más y 50 mmHg de presión negativa los últimos cinco minutos de la prueba. Si el astronauta presenta sensación de pérdida del conocimiento o un episodio de síncope, la prueba se suspende.

Conviene aclarar que inmediatamente después del aterrizaje, en posición reclinada y horizontal, la presión sistólica, la diastólica y la presión de pulso tienen valores similares a los que se registran antes del vuelo; es hasta que el astronauta recibe el vector de aceleración de la gravedad en el eje longitudinal del cuerpo (cuando adopta la posición de pie o se lleva la mesa de posiciones a 70° con respecto a la horizontal), que se eleva la frecuencia cardiaca, desciende la presión sistólica y la presión del pulso.

- *Ejercicio físico.* Al igual que los tres procedimientos anteriores, el ejercicio en bicicleta ergométrica o en banda sinfín es utilizado también para hacer una estimación del grado de desacondicionamiento cardiovascular durante y después del vuelo. Con algunas excepciones, después del vuelo está disminuida la capacidad de ejercicio, el consumo de oxígeno, el volumen diastólico final del ventrículo izquierdo, el volumen por latido, el gasto cardiaco, la presión sistólica; en cambio, la frecuencia cardiaca está más elevada para una carga de ejercicio similar a la de antes del vuelo. La eficiencia mecánica del corazón (cantidad de oxígeno requerido para realizar una carga determinada de trabajo) no presenta cambios de consideración después del vuelo; tampoco está alterado el grosor de las paredes ventriculares.

Los estudios de evaluación cardiovascular practicados en los días y semanas subsiguientes al aterrizaje demuestran que aun en los vuelos de varios meses de duración, la estabilidad cardiocirculatoria se logra en no más de tres semanas; sin embargo, después de vuelos de unos días de duración, el periodo de readaptación no va más allá de una semana. En todo caso, este periodo está en razón inversa a la cantidad de ejercicio realizada durante la misión.

Otros estudios

- De rutina, después de la misión se realizan radiografías de tórax, las cuales, comparadas con las que se tomaron previamente al lanzamiento, muestran reiteradamente que el tamaño del corazón disminuye un 10 a 15%.
- Otro estudio de rutina es el ecocardiograma, el cual confirma la disminución de las cavidades cardíacas, pero la contractilidad miocárdica y el grosor de las paredes ventriculares se conservan sin cambios durante y después del vuelo, no hay, pues, atrofia miocárdica. Como se ha expresado en notas anteriores, la disminución del tamaño del corazón y del gasto cardíaco que se observan durante el vuelo y las 24 o 48 horas posteriores al aterrizaje, se atribuyen fundamentalmente a una disminución importante del volumen plasmático, es decir, al menor volumen de sangre que el corazón maneja inmediatamente después del vuelo.

Sin embargo, algunos autores sugieren que los vuelos de larga duración imponen deterioro de la función cardíaca, porque en estudios ecocardiográficos realizados inmediatamente después del aterrizaje muestran disminución de la fracción de expulsión, la fracción de acortamiento, el volumen sistólico, el gasto cardíaco y el tamaño del corazón.

- Los estudios electrocardiográficos practicados a los astronautas durante el periodo de recuperación en tierra son numerosos y se realizan indistintamente en reposo, durante las pruebas de esfuerzo, en ortostatismo, al aplicar presión negativa en la parte inferior del cuerpo, etcétera. En raras ocasiones se han identificado anormalidades en el electrocardiograma; cuando ocurren, se trata de extrasístoles auriculares y ventriculares o cambios inespecíficos de la onda T.

Medidas para contrarrestar los efectos de la ingravidez

Hemos dicho anteriormente que los cambios anatómicos y funcionales que produce la ausencia de gravedad en el organismo humano obedecen a un proceso de adaptación a un medio que le es ajeno; son cambios que no representan patología alguna y seguramente convenientes en tal situación, pero a medida que el cuerpo humano se adapta a las condiciones del espacio, en esa medida se desadapta al campo gravitacional de la Tierra. Por eso los astronautas al regresar se sienten físicamente muy débiles, no pueden mantenerse de pie, tienen dificultades para caminar y algunas veces hasta llegan a perder el conocimiento por disminución importante de la presión arterial y de la perfusión sanguínea cerebral. Para tratar de atenuar estas molestias se acostumbra poner en práctica las siguientes medidas preventivas durante el vuelo espacial.

- *Ejercicio físico.* Hay dos formas muy usuales para estimular los músculos de las extremidades inferiores: la bicicleta ergométrica con una resistencia apropiada en los pedales y la banda sinfín con resortes laterales, que aplicados a los hombros del astronauta le dan un “peso” similar al que tiene en tierra. También se usan cuerdas elásticas para ejercitar los músculos de las extremidades superiores y del tronco. En las misiones prolongadas se recomienda un ejercicio que va de dos a cuatro horas diarias repartidas en dos sesiones; debe utilizarse por lo menos el 13% de la capacidad física del astronauta para lograr una razonable estimulación muscular y evitar parcialmente su atrofia.
- *Uso del traje pingüino.* Este traje es un “overol de trabajo” con bandas elásticas desde los hombros hasta las plantas de los pies; esto sirve para hacer tracción constante hacia abajo desde los hombros y hacia arriba desde los talones, y así poner en tensión los músculos antigravitacionales del tronco y de las extremidades pélvicas. Este traje lo han usado los cosmonautas rusos durante ocho horas de trabajo y en cierta medida sustituye el efecto de la gravedad sobre las masas musculares que soportan el peso del cuerpo en posición de pie en tierra.
- *Presión negativa en la parte inferior del cuerpo.* Con este propósito se utiliza un cilindro metálico o de plástico, donde se introduce la mitad inferior del cuerpo y se sella mediante un diafragma en la cintura del astronauta. Se aplica presión negativa progresivamente en ese cilindro hasta alcanzar 30, 40, 50 mmHg; esto provoca desplazamiento de los líquidos de las regiones superiores del cuerpo hacia las inferiores; es el proceso inverso al que se opera cuando los astronautas quedan expuestos a la ausencia de gravedad, reproduce exactamente lo que ocurre cuando los astronautas regresan a la Tierra y vuelven a estar sujetos a la acción de la gravedad terrestre, los líquidos tienden a acumularse en las regiones inferiores del cuerpo. Este procedimiento se utiliza durante las misiones espaciales para reconocer el grado de desacomodamiento cardiovascular y también para estimular a los barorreceptores y “recordarles” lo que les espera al regresar a la Tierra.
- *Collarín neumático.* Un procedimiento más sencillo para estimular específicamente los barorreceptores situados en los senos carotídeos es el uso de un collarín neumático que al inflarse y hacer presión alrededor del cuello produce disminución del flujo sanguíneo y de la presión arterial, provocando por vía refleja, descarga de catecolaminas, vasoconstricción, taquicardia y aumento de la presión arterial. Por el contrario, cuando dentro del collarín neumático se crea presión negativa hay dilatación arterial y aumento del flujo sanguíneo, lo cual los barorreceptores interpretan como hipertensión arterial y la respuesta es ahora de vasodilatación periférica y bradicardia. Los dos

procedimientos anteriores se aplican una o más veces por semana, pero se vuelve diario en los días previos al descenso.

- *Ingestión de agua y sal.* Hemos mencionado que en el espacio se produce un estado de hipovolemia y una disminución de la masa total de eritrocitos; al regreso a tierra hay un incremento del lecho vascular (aumento de la *compliance*), los astronautas sufren por eso hipotensión arterial e hipoperfusión cerebral. Para atenuar estos efectos, los astronautas acostumbran tomar un litro de agua y ocho pastillas de un grano de sal dos o tres horas antes del descenso, lo que tiene por objeto aumentar el volumen plasmático.
- *Aplicación del traje anti-G.* Este es un pantalón neumático que aplica presión positiva alrededor de los miembros inferiores inmediatamente después del aterrizaje; la presión aplicada a los miembros pélvicos protege contra el desplazamiento brusco de los líquidos hacia abajo y ayuda a mantener la presión arterial y la perfusión sanguínea cerebral.

Referencias

- Buckey JC., Lane LD., Levine BD., Watenpaugh DE., Wright SJ., Moore WE., et al., *Orthostatic intolerance after spaceflight*. J. Appl Physiol, 1996; 81:7-18.
- Bungo MW., Charles JB., Johnson PC Jr., *Cardiovascular deconditioning during space flight and the use of saline as a countermeasure to orthostatic intolerance*. Aviat Space Environ Med, 1985; 56:985-90.
- Claydon VE., Hainsworth R., *Salt supplementation improves orthostatic cerebral and peripheral vascular control in patients with syncope*. Hypertension, 2004; 43:809-13.
- Claydon VE., Schroeder C., Norcliffe LJ., Jordan J., Hainsworth R., *Water drinking improves orthostatic tolerance in patients with posturally related syncope*. Clin Sci, 2006; 110:343-52.
- Convertino V. A., Doerr D. F., Eckberg D. L., Fritsch J. M., and Vernikos-Danellis, J. Head-down bed rest impairs vagal baroreflex responses and provokes orthostatic hypotension. J. Appl Physiol. 68:1458-1464, 1990.
- Fortney S. M., *Development of lower body negative pressure as a countermeasure for orthostatic intolerance* J. Clin. Pharmacol. 31:888-892, 1991.
- Frisch-Yelle JM., Winston PA., Bondar RL., Brown TE., *Subnormal norepinephrine release relates to presyncope in astronauts after spaceflight*. J. Appl Physiol, 1996; 81:2134-41.
- Fritsch JM., Charles JB., Bennet BS., Jones MM., Eckberg DL., *Short duration spaceflight impair human carotid baroreceptor – cardiac reflex responses*. J. Appl Physiol, 1992; 73:664-71.
- Goldstein MA., Edwards RJ., and Schroeder JP., *Cardiac morphology after conditions of microgravity during COSMOS 2044*. J Appl Physiol Suppl 1992;suppl73:94-100.
- Charles JB, Lathers CM., *summary of lower body negative pressure experiments during space flight*. J. Clin Pharmacol, 1994; 34:571-83.

- Kotovskaya AR., Vil-Viliams IF., Lukjanuk VY., *Human Physiological responses to the G-load accompanying the orbiting and descent of Soyuz spacecraft.* Hum Physiol, 2003; 29:677-84.
- Kozlovskaya JB., Grigoriev AI., Stepantsov VI., *Countermeasure of the negative effects of weightlessness on physical systems in long-term space flights.* Acta Astronaut, 1995; 36:661-8.
- Levine BD., Lane LD., Watenpaugh DE., Gafney FA., Buckey JC., Blomqvist CG., *Maximal exercise performance after adaptation to microgravity.* J. Appl Physiol, 1996; 81:686-94.
- Levy MN., Talbot JM., *Cardiovascular deconditioning of spaceflight.* Physiologist, 1983; 26:297-303.
- Schroeder C., Bush VE., Norcliffe LJ., Luft FC., Tank J., Jordan J., Hainsworth R., *Water drinking acutely improves orthostatic tolerance in healthy subjects.* Circulation, 2002; 106:2806-11.
- Martin DS., South DA., Wood ML., Bungo MW, Meck JV., *Echocardiographic changes after short and long duration spaceflight.* Aviat Space Environ Med, 2002; 73:532-6.
- Meck JV., Reyes CJ., Perez SA., Goldberger AL., Ziegler MG., *Marked exacerbation of orthostatic intolerance after long vs short duration spaceflight in veteran astronauts.* Psychosom Med, 2001; 63:865-73.
- Meck JV., Waters WW., Ziegler MG., deBlock HF., Mills PJ., Robertson D., et al., *Mechanisms of postspaceflight orthostatic hypotension: low alpha1-adrenergic receptor responses before flight and central autonomic dysregulation postflight.* Am J. Physiol, 2004; 286:486-95.
- Perez SA., Charles JB., Fortner GW., Hurst V., Meck JV., *Cardiovascular effects of anti-G suit and cooling garment during space shuttle re-entry and landing.* Aviat Space Environ Med, 2003; 74:753-7.
- Perhonen MA., Franco F., Lane LD., Buckey JC., Blomqvist CG., Zerwekh JE., et al., *Cardiac atrophy after bed rest and spaceflight.* J. Appl Physiol 2001; 91:645-53.
- Platts Sh., Tuxhorn Ja., Ribeiro Lc., Stenger Mb., Lee Smc., Meck JV., *Compression garments as countermeasures to orthostatic intolerance.* Aviat Space Environ Med 2009; 80:437-42.
- Rummel J. A., Michel E. I., and Berry, C. A., *Physiological responses to exercise after space flight- Apollo 7 to Apollo 11.* Aerospace Med, 44: 235-238, 1973.

Capítulo 15



Contribuciones de la tecnología espacial a la cardiología

Para resolver problemas técnicos y operacionales específicos en la exploración cósmica y para proteger la salud y la vida de los astronautas, la industria espacial ha tenido que crear y poner en práctica equipos novedosos que cumplen esas funciones. Una buena parte de esos avances tienen aplicación práctica en la medicina en general y la cardiología en particular. Vamos a mencionar a continuación algunos ejemplos en los que la cardiología se ha beneficiado de la tecnología espacial.

Telecardiología

Una de las contribuciones más importantes de la tecnología espacial a las ciencias de la salud ha sido la telemedicina o medicina a distancia. La necesidad de atender la salud de los astronautas durante las misiones espaciales ha creado una nueva tecnología capaz de transmitir datos clínicos desde las naves en el espacio exterior a los centros de control en tierra, y recibir desde éstos las indicaciones pertinentes. Si bien la telemetría médica es anterior a la era espacial, es en esta etapa cuando tiene su pleno desarrollo.

Los primeros datos clínicos y los que hasta ahora se usan con mayor frecuencia para monitorear el estado de salud de los astronautas son de tipo cardiológico: frecuencia cardíaca, presión arterial, electrocardiograma y frecuencia respiratoria (neumogama). En los últimos años se han agregado, en algunos casos, imágenes de ecocardiografía y presión venosa central.

El hecho de que se utilicen predominantemente parámetros cardiológicos para monitorear clínicamente a los viajeros espaciales se debe a tres razones fundamentales: a) técnicamente es más fácil obtener, registrar y transmitir los signos clínicos cardiovasculares; b) estos datos ofrecen en su conjunto una buena información sobre las condiciones fisiológicas de los astronautas; c) el aparato cardiovascular es el que con mayor intensidad se afecta por las condiciones del vuelo como aceleración de escape, ausencia de gravedad, actividad fuera de la nave, desaceleración de reingreso a la atmósfera y el someterse de nuevo a la acción del campo gravitacional terrestre.

Desde la Tierra es posible hacer un examen cardiovascular muy completo. El interrogatorio se realiza "frente a frente" (el médico y el paciente) a través de un doble canal de televisión; la inspección también se hace directamente; los fenómenos auscultatorios (cardíacos y respiratorios) se transmiten con el uso de un telestetoscopio; la palpación y percusión se realizan con el apoyo de un ayudante a bordo de la nave espacial; el cardiólogo desde tierra puede escuchar y observar las cifras de presión arterial; el examen de fondo de ojo se realiza a través de una cámara y un oftalmoscopio especial; igualmente desde el centro de control pueden analizarse los trazos electrocardiográficos, las imágenes ecocardiográficas y los exámenes de laboratorio (hasta ahora las naves y estaciones espaciales no cuentan con equipo de rayos X).

Esta particular forma de practicar la cardiología se denomina telecardiología. Actualmente se aplican estos procedimientos desde unidades móviles, terrestres o aéreas, que recorren en forma programada comunidades dispersas en la sierra, la selva o el desierto y cuyo centro de control se encuentra habitualmente en las grandes ciudades. También es aplicable este enfoque de la atención médica en los grandes reclusorios, hospitales psiquiátricos, pequeñas islas continentales, plataformas marítimas y grandes barcos y aviones de pasajeros.

Telecirugía robótica

Ejemplos portentosos de la robótica espacial han sido las sondas Lunahov y Venera de Rusia, las cuales desde la Tierra fueron dirigidas para explorar la superficie de la Luna y del planeta Venus, respectivamente; las sondas de la NASA Vikingo 1 y 2, la Pathfinder, Spirit, Opportunity, Phoenix y otras que han realizado numerosos estudios en la superficie del planeta Marte; las naves Viajero 1 y 2 y Pionero 10 y 11 que se encuentran ya fuera del Sistema Solar y que en su momento enviaron una extensa información sobre los planetas exteriores y sus lunas; el brazo robótico canadiense que ejecuta complejas acciones en la construcción de la Estación Espacial Internacional, etcétera.

Estos maravillosos ingenios cumplen sus funciones con toda precisión, manejados desde un centro de control distante, pero virtualmente equivale a manipularlos directamente. Basados en esta tecnología, diversos centros cardiológicos están realizando a distancia (utilizando un robot y telecomunicaciones vía satélite o fibra óptica) operaciones de cardiología intervencionista y de cirugía cardíaca. En los últimos años la telecirugía robótica cardíaca ha tenido un gran desarrollo en diferentes centros hospitalarios del mundo. Las ventajas de este procedimiento (derivado de la tecnología médica espacial) son, entre otras, las siguientes: a) disminución del trauma quirúrgico, b) menor pérdida sanguínea, c) acortamiento del tiempo de anestesia, d) menos dolor postoperatorio, e) recuperación rápida, f) mejor cicatrización de las

heridas, g) menos complicaciones postoperatorias, h) rápida integración a las actividades normales, i) en general, mejores resultados clínicos.

Imagenología médica avanzada

Los satélites de observación terrestre de la NASA (Landsat) poseen tecnología avanzada de percepción remota con alto grado de resolución. La empresa Philips en su área de imagenología cardíaca digital ha incorporado a sus equipos esta tecnología, con lo cual se ha logrado un importante incremento en la nitidez de las imágenes, un ahorro considerable de tiempo y una mayor seguridad en la ejecución de las angioplastias y otras intervenciones.

Materiales para corazón artificial

En el diseño de aviones más rápidos y seguros, la NASA utiliza tecnología de cómputo para observar el flujo del aire sobre las estructuras de estas naves a muy altas velocidades. La misma tecnología está siendo aplicada para observar el flujo de la sangre en el interior del corazón. La NASA igualmente estudia y fabrica materiales flexibles y de muy alta resistencia para resolver problemas específicos de tipo técnico u operacional. Esta tecnología sirve de sustento para proyectos de fabricación de válvulas, bombas y corazones artificiales.

Sistema portátil para urgencias cardiológicas

La NASA ha desarrollado un sistema portátil capaz de registrar y transmitir al mismo tiempo una derivación del electrocardiograma, presión arterial, frecuencia cardíaca, frecuencia respiratoria y tensión parcial de oxígeno en sangre. Este equipo portátil posee además un desfibrilador cardíaco automático y una doble vía de comunicación radial. Su aplicación tiene lugar en la atención de urgencias cardiológicas en las ciudades fuera de los centros hospitalarios; por supuesto, también en las circunstancias que se han mencionado en el último párrafo del punto número uno.

Marcapaso cardíaco reprogramable

Los centros de control de vuelos espaciales usan un sistema bidireccional de reprogramación para los satélites en órbita y sondas en trayectoria interplanetaria. La

empresa Siemens, con apoyo en esta tecnología avanzada de programación satelital, produjo en 1979 el marcapaso Sincronic y su respectivo analizador, el cual permite al cardiólogo monitorear la interacción del aparato con el corazón y, sin necesidad de abrir la piel, modificar la frecuencia cardíaca, la intensidad del estímulo, la carga de la batería y reconocer si hay resistencia o está roto un cable.

Desfibrilador automático implantable

Bajo la dirección del doctor Michael Mirowski y financiamiento de la NASA, el Departamento de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins de Baltimore, Maryland, se probó clínicamente una versión miniaturizada de un desfibrilador automático implantable al que denominaron AID. Este pequeño desfibrilador que se implanta debajo de la piel en el tórax o el abdomen, monitorea la actividad eléctrica del corazón, reconoce las arritmias cardíacas graves (específicamente la taquicardia y fibrilación ventricular), produce oportunamente una descarga eléctrica que corrige estos gravísimos trastornos del ritmo cardíaco.

Este equipo cuenta con una microcomputadora, una fuente de energía y dos electrodos sensores de la actividad cardíaca; una vez instalado no requiere de personal entrenado ni equipo adicional.

Un nuevo modelo del AID posee cuatro sensores en vez de dos y es capaz de corregir otras arritmias malignas.

Bomba implantable de infusión continua

Cuando las naves Vikingo 1 y 2 se posaron sobre la superficie de Marte a mediados de la década de los setenta se hicieron tres experimentos para tratar de identificar vida en ese planeta; uno de ellos consistía en inyectar microgotas de nutriente sobre una muestra de suelo marciano para observar si esa sustancia era absorbida por algún microorganismo. La inyección se hizo con una pequeña bomba a través de una microválvula que permite el paso de una cantidad precisa del nutriente.

De este experimento se derivó la fabricación de una bomba de infusión continua de medicamentos, implantable, realizada por el Departamento de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins con la colaboración del Centro Espacial Goddard de la NASA en Maryland. En la actualidad esta pequeña bomba se utiliza extensamente para la aplicación de insulina en diabéticos tipo I. Una modalidad externa por vía subcutánea o intravenosa puede administrar en forma programada y precisa medicamentos de uso cardiológico en servicios de terapia intensiva cardiovascular.

Batería atómica

Debido a las prolongadas noches de la Luna (14 días terrestres), los instrumentos de estudio dejados en su superficie por los astronautas del programa Apolo necesitaron de energía atómica (Plutonio 238) para remplazar la falta de energía solar. Las pequeñas cápsulas de Plutonio 238 tienen una vida útil de hasta 80 años y pueden ser aplicadas a marcapasos en niños con bloqueo AV completo congénito o adquirido.

Angioplastia láser

El Laboratorio de Propulsión a Chorro (*Jet Propulsion Laboratory*) de la NASA en Pasadena, California, utiliza el sistema láser, entre otras cosas, para medir el contenido de los gases en la atmósfera terrestre; los diferentes tipos de láser producen altas temperaturas, pero las investigaciones de este laboratorio han llegado a obtener un "láser frío", el cual está siendo utilizado para destruir placas de colesterol en los vasos sin dañar las paredes de las arterias. Este tipo de láser (Dyner 200) patentado por la NASA se introduce en la punta de un catéter que se coloca frente a la placa de colesterol, la vaporiza sin dañar la pared del vaso y restablece la circulación de la arteria afectada.

El éxito con este procedimiento es del 85% y el resultado es más seguro que el de la angioplastia convencional.

El collarín neumático

Uno de los efectos de la ingravidez durante las misiones espaciales es el deterioro de la función de los barorreceptores, porque cualquiera que sea la posición del cuerpo, la presión arterial es siempre la misma en todos los territorios; el factor que estimula los barorreceptores (cambios posicionales de la presión arterial) no existe en gravedad cero y la función de éstos se pierde.

Cuando los astronautas regresan y reciben de nuevo el efecto de la gravedad terrestre no pueden mantener el ortostatismo porque la presión arterial desciende importantemente, la perfusión sanguínea cerebral se deteriora, lo que se manifiesta por trastornos visuales, lipotimias y síncope.

Para evitar el deterioro de la función de los barorreceptores durante el vuelo espacial se usa periódicamente un collarín neumático que crea alternativamente presión positiva y presión negativa alrededor del cuello. Cuando se aplica presión positiva los barorreceptores interpretan esto como una disminución del flujo sanguí-

neo y responden con vasoconstricción periférica y taquicardia. Cuando se aplica presión negativa los vasos se distienden y esto es interpretado por los barorreceptores como plétora sanguínea e hipertensión arterial, respondiendo con vasodilatación y bradicardia.

Actualmente el collarín neumático se utiliza como instrumento de investigación en aquellos sujetos en los que el control reflejo de la presión arterial tiene un comportamiento anormal.

Electrodo de uso prolongado

Durante los vuelos espaciales, a veces se requieren registros electrocardiográficos de varias horas o días de duración; la pasta electrolítica que se usa habitualmente para el contacto del electrodo con la piel, no es útil en estos casos, porque irrita la piel y al secarse la pasta produce artefactos y registros alterados. La NASA, en colaboración con la Universidad Tecnológica de Texas, produjo un electrodo de acero inoxidable recubierto de una fina capa bioeléctrica que no irrita la piel, hace un adecuado contacto aunque la piel esté húmeda y grasosa, y previene los artefactos. Ahora tiene aplicaciones en relojes de pulso, bicicletas ergométricas y otros instrumentos en el deporte, el trabajo, la rehabilitación cardíaca, etcétera, cuando se requiere conocer la respuesta del corazón a una carga física determinada.

El traje anti-G

Es un pantalón de doble capa que forma una cavidad virtual en la cual se introduce aire para crear presión positiva alrededor de los miembros pélvicos y el abdomen bajo. La aplicación de presión positiva en la parte inferior del cuerpo es útil para contrarrestar los efectos de la aceleración $+G_z$, es decir, cuando el vector de la aceleración actúa en el eje longitudinal del cuerpo, de la cabeza a los pies. Se utiliza el traje anti-G cuando los aviones de combate o acrobáticos deben recorrer un círculo (una *loop*) con la cabina del avión hacia el interior, o cuando los astronautas reciben el efecto de la desaceleración en la fase de reingreso a la atmósfera, y también cuando al tocar tierra se ponen de pie y vuelven a recibir el efecto de la gravedad terrestre, en el eje longitudinal del cuerpo. En esos momentos críticos la sangre tiende a acumularse en las regiones inferiores del cuerpo, la presión arterial desciende y la perfusión sanguínea cerebral se compromete, provocando trastornos de la visión, lipotimias y hasta pérdida del conocimiento.

El uso del traje anti-G tiene su indicación en aquellos sujetos con hipotensión arterial constitucional, o cuando por razones diversas se ha permanecido en cama por

tiempo prolongado y en el momento de iniciar la deambulaci3n los barorreceptores no responden adecuadamente para hacer los ajustes hemodinámicas y de presi3n arterial.

Oxigenaci3n hiperbárica

Ésta es una contribuci3n conjunta de la medicina submarina y la medicina aeronáutica. Nace de la necesidad de corregir los cuadros de aeroembolismo o enfermedad descompresiva que son consecuencia de un ascenso rápido a la superficie de buzos profesionales o deportivos desde profundidades que van más allá de los 20 metros y descompresi3n de cabina de aviones arriba de los 6000 metros de altura.

En el capítulo cuatro se describe el mecanismo, los efectos y el manejo de la entidad denominada enfermedad descompresiva. Este cuadro esencialmente se corrige sometiendo al paciente a dos o tres atmósferas de presi3n en cámaras especialmente diseñadas denominadas cámaras hiperbáricas.

En la práctica médica se ha adoptado este procedimiento para llevar una cantidad suficiente de oxígeno disuelto en el suero sanguíneo a regiones del cuerpo con déficit de circulaci3n, o a todo el organismo cuando los glóbulos rojos, por alg3n tipo de envenenamiento o anemia aguda, no pueden llevar en su interior el oxígeno necesario a los tejidos.

El paciente es introducido a la cámara hiperbárica, generalmente a tres atmósferas de presi3n, respirando oxígeno al 100%.

En esta forma el oxígeno se disuelve en el suero y lo hace llegar a las diferentes regiones del cuerpo, cuando los glóbulos rojos sean incapaces de transportar este elemento para cubrir los requerimientos del organismo.

Sin pretender entrar en detalle sobre los aspectos técnicos de la medicina hiperbárica, mencionaremos a continuaci3n algunas indicaciones precisas: a) gangrena gaseosa, b) obstrucci3nes arteriales, c) envenenamiento por monóxido de carbono, d) estado de shock, e) osteomielitis, f) enfermedad descompresiva, g) lepra, h) infarto agudo del miocardio (controversial), i) pie diabético complicado, j) infecciones por gérmenes anaeróbicos resistentes a los antibióticos, etcétera.

Hemos seálado en este trabajo sólo algunos ejemplos en los cuales la tecnología médica aeroespacial ha aportado avances a la cardiología moderna. Sin duda, el estudio del aparato cardiovascular en el ámbito aeroespacial seguirá aportando a la cardiología nuevos conceptos y recursos técnicos para la mejor atenci3n de los pacientes.

Referencias

- Bratton RL., Cody C., *Telemedicine applications in primary care: a geriatric patient pilot project.*, Mayo Clin Proc, 2000; 75:365-8.

- Cardoso R., Huttner E., Hoppe A. et al., *A successful telemedicine experience in the Brazilian Amazon region*. Acta Informatica Médica 2007; 15:211-5.
- Edworthy SM., *Telemedicine in developing countries*. BMJ 2001;323(7312):524-5.
- Gandas A., Montgomery K., Mckenas D., Altrudi R., Silva Y., *In-flight continuous vital signs telemetry via the Internet*. Aviat Space Environ Med 2000; 71:68-71.
- NASA Office of Space Science and Applications, *Life science report 1987*. Washington DC; NASA, 1985.
- NASA Office of Space Science and Applications. *Life sciences accomplishments*. Washington DC; NASA, 1985.
- NASA-Life and Biomedical Sciences Application Division. *Life sciences accomplishments '94*. Washington DC; NASA, 1994.
- NASA-Scientific and Technical Information Division, *Technology 2000*. Washington DC: NASA Conference Publication 3109, vol. 2. 1991.
- NASA-Scientific and Technical information-Division. *Technology 2000*. Washington DC: NASA Conference Publication 3109, vol. 1. 1991.
- Page LW., Page T., *Zero-G Technology*. Washington DC: NASA SP-140, 1977.
- Russomano T., Cardoso R., Duval V., et al., *Space Technologies used to improve health care in remote areas*. Aviat Space Environ Med, 2009; 80(1): 62-63.

Índice onomástico

Armstrong, Harry, v
Atkov, Oleg, xiv
Bert, Paul, ii
Chávez Sánchez, Ignacio, 5
Gaffney, Andrew, xiii, xiv
Iglesias, Ramiro, 168
Kuri, Jorge, 168
Mach, Ernst, 70
Marescaux, Jaques, xvi
Mirowski, Michael, 193
Monge, Carlos, 51
Norboo, T., ii
Peñaloza, Dante, i, ii
Ritter, O., 118, 120, 122
Sheddom, Rhea, xiii
Strughold, 5, 17, 33, 118, 120, 122
Wood, Earl, vi
Yegorov, 135

Índice temático

- Aceleración, 70-72
 - negativa, 71
 - positiva, 71
 - tipos de:
 - angular, 71
 - lineal, 71
 - radial, 71
 - vector de la (variedades), 71
 - aceleración de la gravedad, 72
 - aceleración X, 71
 - aceleración Y, 71
 - aceleración Z, 71
- Acetazolamida, 48
- Actividad aeroespacial, 28, 60
- Actividades aeronáuticas, 14, 19
 - factores, 19
 - aceleración, 22
 - aviación civil, 22
 - aviación militar, 22
 - cambios de presión barométrica (pB), 19
 - barosinusitis (aerosinusitis), 20
 - barotitis (aerotitis), 20
 - iluminación, 23
 - la humedad, 23
 - vapor de agua, 23
 - la temperatura, 22
 - aviones subsónicos, 22, 24
 - aviones supersónicos, 22, 24
 - presencia de ozono, 24
 - estratosfera, 24
 - ozono, 24, 25
 - radiación cósmica, 19, 24
 - líneas del campo magnético, 24
 - núcleos de elementos, 24
 - núcleos de helio, 24
 - núcleos de hidrógeno, 24
 - partículas subatómicas, 24
 - rayos cósmicos, 18, 19, 24
- ruido, 20
 - ambiente de, 21
 - efectos del, 21
 - nivel de, 21
- vibraciones, 21
 - vehículos aéreos, 21
- Administración Federal de Aviación de Estados Unidos, 98
- Aire, 29, 30,
- Altitud, 44, 45
 - bronquitis de la, 47
 - gran, 49, 50
- Angioplastia láser, 194
- Anoxia, 28
- Aparato cardiovascular, 35, 156
- Área hepática desplazada hacia arriba, 175
- Ascenso del diagrama, 175
- Asociación de Medicina Aeroespacial de Estados Unidos, 99
- Astronautas, 146, 147, 152, 156
- Atmósferas planetarias, 123
 - la Luna, 124
 - los planetas exteriores, 126
 - lunas de los planetas exteriores, 126
 - Marte, 124
 - Mercurio, 123
 - Venus, 124
- Atmósfera terrestre, 20, 24, 25, 33, 36, 44, 49, 61
 - ausencia de, 114
 - capas de, 14-17,
 - estratosfera, 16, 24
 - ionosfera, 16-17
 - mesosfera, 16

- troposfera, 15
- Ausencia de gravedad, 115
- Batería atómica, 194
- Biosfera, 15
- Bomba implantable de infusión continua, 193
- Bradicardia durante el sueño, 174
- Cabina de aeronave, 19
- Cambios electrolíticos, 160
- Cambios hemodinámicos, 109
- Campos gravitacionales, 122
- Campos magnéticos, 121
- Cardiología espacial, 114
- Cardiopatía isquémica, 83, 96
- Cerebro, 33
- Ciclo día/noche, 120
- Consejo de Selección de Astronautas, 152
- Cinturones de Van Allen, 116
- Control de la respiración, 31
- Control químico de la respiración, 32
- Desfibrilador automático implantable, 193
- Dexametasona, 48
- Dilatación de las venas de cara y el cuello, 173
- Disminución de la amplitud del pulso arterial en miembros inferiores, 175
- Edema facial y palpebral, 173
- Efectos de la aceleración +Gx (sobre el sistema cardiopulmonar), 72
- Efectos de la aceleración +Gz, 74
 - factores de los, 76
 - variables cardiovasculares de:
 - alteraciones hormonales, 76
 - cambios electrocardiográficos, 75
 - circulación coronaria, 74
 - circulación en la cabeza y el cuello, 74
 - circulación en la parte inferior del cuerpo, 75
 - efectos sobre el sistema nervioso central, 76
 - frecuencia cardíaca, 74
 - función pulmonar, 75
 - gasto cardíaco, 74
 - protección contra la, 76
- Efectos de la gravedad en clinostatismo, 109
- Efectos de la gravedad en ortostatismo, 105
 - presión arterial pulmonar en, 107
 - presión capilar en, 107
- Efectos en el aparato respiratorio, 35
- Efectos psicomotores, 36
- Efectos sobre el sistema nervioso central, 33
- Efectos sobre la visión, 33
- El collarín neumático, 194
- El traje anti-G, 195
- Electrocardiograma, 53
- Electrodo de uso prolongado, 195
- Enfermedad aguda de la montaña (EAM), 45
 - bronquitis de la altitud, 47
 - cardiomegalia, 53
 - edema agudo pulmonar, 45, 46
 - edema cerebral, 46
- Enfermedad crónica de la montaña (ECM), 51
 - hipoventilación, 51
- Enfermedad de Monge, 52. Véase Enfermedad crónica de la montaña
- Enfermedad descompresiva (ED), 60
 - cuadro clínico:
 - manifestaciones articulares, 64
 - manifestaciones cardiocirculatorias, 64
 - manifestaciones cutáneas, 64
 - manifestaciones neurológicas y oculares, 64
 - manifestaciones pulmonares, 64
 - factores predisponentes:
 - buceo previo al vuelo, 63
 - deshidratación, 63
 - duración de la exposición, 63
 - exposición previa a la altitud, 63
 - la altitud alcanzada, 63
 - temperatura ambiente, 63
- Enfermedades cardiovasculares, 82-84,
 - cardiopatías congénitas acianógenas, 50
 - enfermedad coronaria, 50
 - hipertensión arterial esencial, 50
- Equivalentes espaciales, 17
 - límite de protección contra la luz ultravioleta, 18
 - límite de protección contra los rayos cósmicos, 18
 - límite de protección (parcial) contra los meteoroides, 19
 - límite superior de navegación aérea (línea de von Karman), 18
 - línea aerotermodinámica, 19

ÍNDICE TEMÁTICO

- línea de anoxia, 17
- línea de ebullición de los líquidos (línea de Armstrong), 17
- línea de silencio y oscuridad del espacio, 18
- Estaciones espaciales, 137:
 - Estación Espacial Internacional, 139
 - estación Salyut, 137
- Examen físico, 145
 - exámenes de gabinete, 146
 - pruebas de laboratorio, 146
- Exposición a condiciones ambientales extremas, 152
- Gravitosfera, 15
- Guía médica para el viaje en avión, 99
- Hidrosfera, 15
- Hiperemia conjuntival, 175
- Hipertensión arterial, 82
- Hipoxemia, 28
- Hipoxia, 23, 28, 33, 34, 36, 46, 47, 95,
 - ambiental, 44, 45, 49
 - medida profiláctica para la, 36
 - morte por, 36
 - severa, 52
 - tipos de, 28
 - anémica, 28
 - hemoglobina, 28, 49, 50
 - hipobárica, 28, 29, 32, 33, 38, 45
 - presión parcial, 28
 - histotóxica, 29
 - isquémica, 28
 - perfusión sanguínea, 28
 - por estancamiento, 28
 - tratamiento de la, 38
- Imagenología médica avanzada, 192
- La temperatura (en el espacio), 117, 118, 127
 - luz infrarroja, 117
- Lesiones estructurales, 84
- Ley de Boyle, 61
- Ley de difusión de los gases, 61
- Ley de Henry, 61
- Litosfera, 15
- Luminosidad, 119
- Magnetosfera, 15
- Manifestaciones cardiovasculares, 35
- Marcapaso cardíaco reprogramable, 192
- Material disperso, 123
 - polvo cósmico, 123
- Materiales para corazón artificial, 192
- Medicina aeroespacial, 28, 71
- Modificación del régimen de presiones, 158
- Modificación del volumen de los líquidos del cuerpo, 159
- Naves espaciales, 131
 - naves norteamericanas:
 - laboratorio Skylab, 133
 - naves apolo, 132
 - naves géminis, 131
 - naves mercurio, 131
 - transbordadores espaciales, 134
 - naves rusas, 134:
 - naves Soyuz, 136
 - naves Voskhod, 135
 - naves Vostok, 135
 - niveles de velocidad de, 70
- Nifedipina, 48
- Noosfera, 44
- Organización de Aviación Civil Internacional, 88
- Organización Mundial de la Salud, 83
- Oxigenación hiperbárica, 196
- Oxígeno, 14, 15, 24, 28, 29, 33, 38, 44, 47-49
- Pilotos aviadores, 146
- Presión arterial igual en todo el cuerpo, 174
- Presión atmosférica, 15
- Presión arterial pulmonar, 45-46, 53
- Presión barométrica (pB), 30, 32, 37, 60,
- Presión equivalente, 36
- Presión intratorácica, 38
- Presión parcial, 29, 32, 50,
- Pruebas especiales, 146
 - cámara de altitud, 150
 - el confinamiento, 151
 - exposición a condiciones ambientales extremas, 152
 - inmersión en agua, 147
 - la centrífuga, 149
 - presión negativa en la parte inferior del cuerpo, 150
 - reposo en cama, 147
 - vuelos parabólicos, 148
- Radiación cósmica, 115, 130
 - tipos de:

CARDIOLOGÍA AEROESPACIAL

- radiación corpuscular, 116, 117
- radiación cósmica solar, 116
- Radiación electromagnética, 117
- Redistribución de líquidos del cuerpo, 157
- Remodelación del tórax, 160
- Respiración, 31, 32, 48
 - aparato respiratorio, 35
 - centro neumotáxico, 32
 - grupo respiratorio dorsal, 31
 - grupo respiratorio ventral, 32
 - insuficiencia respiratoria, 44
 - quimiorreceptores, 32, 49, 52
- Retina, 33
- Riesgo cardiovascular (factores), 83
- Ritmo circadiano, 120
- Rubicundez del ápex hacia arriba, 174
- RX de tórax, 53
- Síndrome de Cushing, 173
- Síndrome de Intolerancia Ortostática, 180
 - factores condicionantes:
 - falta de aplicación de presión negativa en la parte inferior del cuerpo, 181
 - la duración del vuelo, 181
 - la intensidad del ejercicio físico realizado, 181
 - la sensibilidad individual, 181
 - fisiopatología, 181
 - manifestaciones clínicas:
 - signos clínicos, 180
 - sintomatología, 180
 - medidas para contrarrestar los efectos de la ingravidez:
 - aplicación del traje anti-G, 186
 - collarín neumático, 185
 - ejercicio físico, 185
 - ingestión de agua y sal, 186
 - presión negativa en la parte inferior del cuerpo, 185
 - uso del traje pingüino, 185
 - pruebas para valorar la intolerancia ortostática, 182
 - aplicación de presión negativa en la parte inferior del cuerpo, 182
 - ejercicio físico, 183
 - mesa de posiciones, 182
 - posición de pie, 182
- Síndrome de Woff Parkinson White, 144
- Sistema cardiovascular (SCV), 168
- Sistema portátil para urgencias cardiológicas, 192
- Sistema Solar, 123
- Sistemas ecológicos sellados, 130
- Telecardiología, 190
- Telecirugía robótica, 191
- Tórax cilíndrico, 174
- Trajes espaciales, 140
- Trastornos cardiovasculares, 163
- Trastornos de la conducción, 87
 - haz de Hiss, 87
- Trastornos del automatismo, 88
- Triglicéridos, 51
- Troposfera, 14, 15,
- Valoración cardiovascular, 144
 - historia clínica, 144
- Valoración final, 152
- Velocidad (en aeronáutica), 70
 - tipos de:
 - hipersónica, 70
 - subsónica, 70
 - supersónica, 70



LA EDICIÓN, COMPOSICIÓN, DISEÑO E IMPRESIÓN DE ESTA OBRA FUERON REALIZADOS
BAJO LA SUPERVISIÓN DE GRUPO NORIEGA EDITORES
BALDERAS 95, COL. CENTRO, MÉXICO, D.F. C.P. 06040
1288000030DICIEMBRE2011926DP9233IE