

Artículo de revisión

Efectos fisiológicos en un ambiente de microgravedad

Raúl Carrillo Esper^{a,b}, Juan Alberto Díaz Ponce Medrano^c, Carlos Alberto Peña Pérez^d, Oscar Iván Flores Rivera^e, Adriana Ortiz Trujillo^f, Osvaldo Cortés Antonio^g, Joel Cruz de Jesús^h, Luis Miguel Méndez Saucedoⁱ



^aCatedrático de la Escuela Médico Naval. México, DF.

^bFundador de la Sociedad de Medicina del Espacio y Microgravedad. México, DF.

^cDirector de la Escuela Médico Naval. México, DF.

^dProfesor Adjunto en la Escuela Médico Naval. México, DF.

^eCadetes Estudiantes de Medicina. Escuela Médico Naval. México, DF.

Correo electrónico: firox83@hotmail.com

Recibido: 10-abril-2015. Aceptado: 23-abril-2015.



Foto: NASA

Resumen

En el siglo veinte, el estudio del universo y el desarrollo de los vuelos espaciales fueron posibles gracias al avance tecnológico de naves de propulsión por diferentes tipos de cohetes. Muchos sistemas biológicos se afectan en los vuelos espaciales y se ha demostrado que en un ambiente de microgravedad se altera de manera significativa la función musculoesquelética, neurosensitiva, endócrina, renal, respiratoria y cardiovascular, además del riesgo de lesión debido a la exposición a diferentes tipos de radiación, eventos que comprometen la salud y rendimiento de los astronautas. Por lo anterior es fundamental mantener la salud y acondicionamiento físico de los astronautas durante el vuelo espacial para facilitar y acelerar su recuperación al llegar a la tierra.

Palabras clave: Espacio, microgravedad, vuelos espaciales.

Physiological effects in an environment of microgravity

Abstract

Until the twentieth century, study about the universe and speculation about the nature of spaceflight were no closely related to the technical developments that led to rocket propulsion. Many biological systems are adversely affected by space flight and it has been shown that exposure to microgravity can alter the musculoskeletal, neurosensory, endocrine, renal, respiratory and cardiovascular systems and the risk of injury due to radiation exposure resulting in deconditioning that may compromise astronauts health and performance. Maintaining health and fitness during space missions is critical for preserving performance during mission specific tasks and to optimize terrestrial recovery.

Key words: Space, microgravity, space flight.

INTRODUCCIÓN

En 1665, el eminente científico inglés Sir Isaac Newton enunció la Ley de la Gravitación Universal y las Leyes del Movimiento, las cuales sentaron las bases científicas que permitieron entender el movimiento planetario y espacial¹. De acuerdo a lo expresado por estas leyes se sabe que la aceleración de un objeto únicamente influenciado por la gravedad de la superficie terrestre es de 1 G. Esta aceleración equivale a 9.8 metros por segundo cuadrado (m/s^2). Por consiguiente, hablar de microgravedad es hacer referencia a un ambiente en el cual los efectos locales de la gravedad



Foto: otorgada por los autores

Figura 1. En los vuelos parabólicos, durante los breves 20 segundos de microgravedad simulada, varios experimentos han sido llevados a cabo como una alternativa a realizar estos experimentos en el espacio. Fuente: <http://www.cerebrovortex.com>

se hallan reducidos, no se elimina la fuerza de la gravedad en sí misma, contrario a lo que sucede en condiciones de “ingravedez” o “gravedad cero”. Un ambiente de microgravedad es aquel que imparte una aceleración de pequeña magnitud a un objeto en comparación a la ejercida por la Tierra (**figura 1**).

Estas aceleraciones toman valores que fluctúan en un rango de una centésima a una millonésima parte de la aceleración gravitacional presente en la superficie terrestre. La microgravedad se consigue cuando la única fuerza existente es la de la gravedad, es decir, cuando el cuerpo se encuentra en el fenómeno denominado “caída libre”²⁻⁴.

Orbitando a unos 330 km de la Tierra, la gravedad que se experimenta es un 12,5% menor que la hallada en la superficie del planeta⁴. Y lo que en un inicio se traduce en una sensación de relajación al liberarse de su peso terrestre, se continúa con una pérdida de masa muscular y ósea; además de otros cambios en la fisiología normal que tiene consecuencias directas sobre la homeostasis corporal⁵.

Las misiones espaciales representan un riesgo inherente y constante. Es deber de la profesión médica estimar y explicar claramente los riesgos, para que de esta manera todas las instituciones involucradas en las misiones espaciales puedan valorar, basadas en la evidencia científica, de manera integral los riesgos que cada misión representa y sea posible ponderarlos con los beneficios que proporcionarían. De acuerdo al Comité de Miembros de la Asociación de Medicina del Espacio y de la Sociedad de Cirujanos de Vuelo de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), el más grande reto será la selección y entrenamiento del personal médico a bordo, en las medidas para contrarrestar los fenómenos adversos y en el cuidado médico a distancia⁶.

El objetivo de este trabajo es informar a la comunidad médica todos los cambios a los que está susceptible el ser humano en ambientes de microgravedad, con el fin de estar preparados ante la revolución espacial.



Foto: NASA

EFFECTOS NEUROLÓGICOS

La microgravedad representa un ambiente de estrés para los seres humanos adaptados a un ambiente de gravedad en la Tierra. La exposición a un ambiente de microgravedad altera la distribución de los líquidos corporales y el grado de distensión de las venas craneales, y estos cambios en consecuencia son capaces de provocar remodelamiento estructural y alterar la autorregulación cerebral. La disminución en la capacidad de autorregulación del cerebro ha sido documentada mediante la técnica de reposo en cama con la posición de la cabeza abajo (a 6°, *head-down bed rest* [HDBR]), y ha sido propuesta como uno de los mecanismos responsables de la intolerancia ortostática post vuelo espacial⁷.

La ausencia de mecanismos de bombeo y la presencia de válvulas venosas unidireccionales en la cabeza, cuello y tórax superior requieren de asistencia gravitacional para drenar la sangre. En el espacio, un ligero incremento de presiones sobre los senos

venosos y duros como consecuencia de la estasis, obstruye la resorción del líquido cerebroespinal a través de las vellosidades aracnoideas, elevando la presión de este líquido. Además, existe una disminución del drenaje linfático lo que resulta en edema epicraneal. La elevación uniforme de la presión intracraneal ocasiona distorsión anatómica, pero esta se halla limitada a las áreas en las cuales el Sistema Nervioso Central no está completamente protegido por la bóveda craneana, tales como el foramen magno o la zona distal al canal óptico, donde se originan los gradientes de presión. En el compartimento orbital, esto se manifestara como una expansión de la capa dural, aplastamiento del globo posterior, y papiledema o “protrusión papilar”^{8,9}.

En relación a la interacción entre los sistemas vestibular, somatosensorial y visual, el conocimiento actual nos demuestra que bajo la influencia de un ambiente de microgravedad, la información aferente proveniente de los otolitos está significativamente

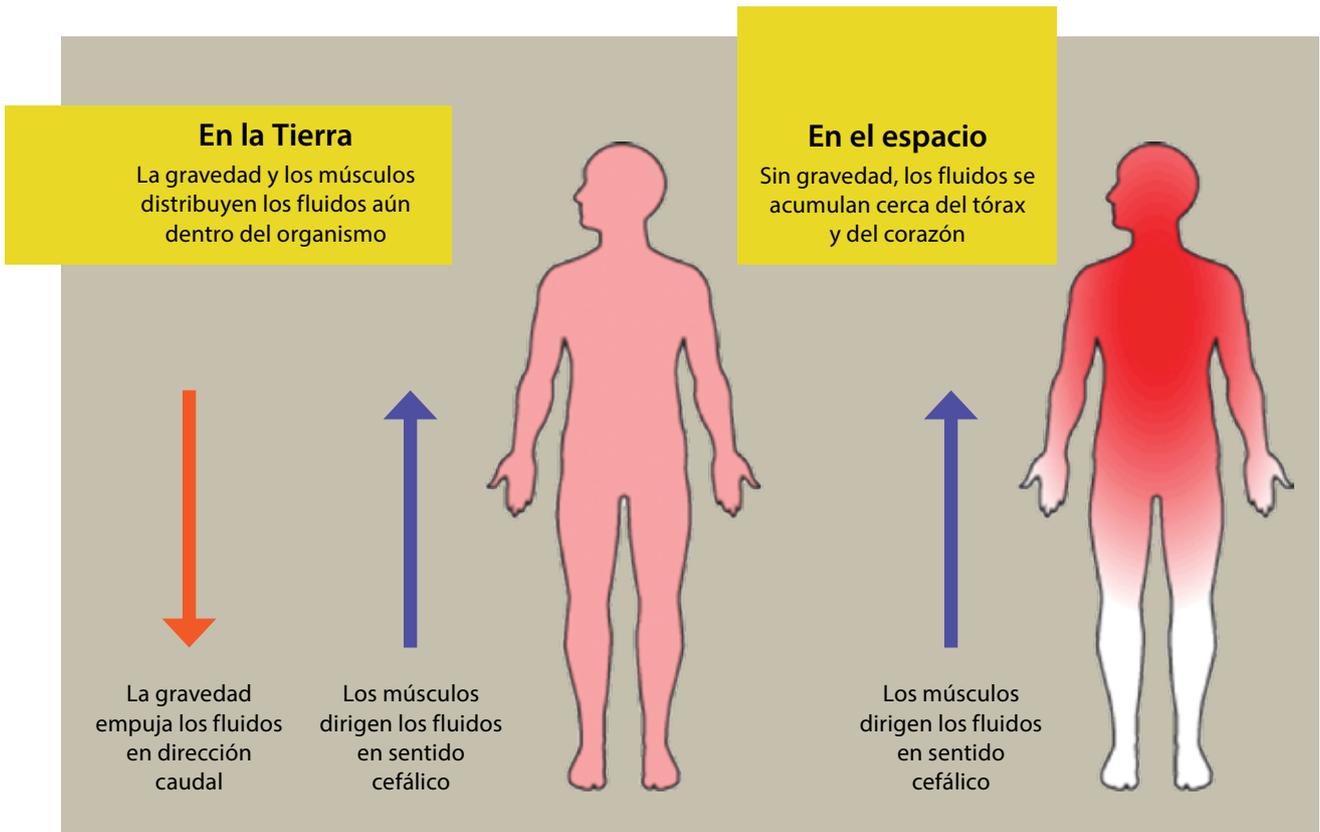


Figura 2. Representación de cambios hemodinámicos en microgravedad.

alterada debido a la eliminación de las señales relacionadas con la gravedad. Esto se traduce en que los otolitos dejen de proveer información relacionada con la dirección de la cabeza o el cuerpo respecto a la velocidad vertical conservándose sensibles únicamente a las aceleraciones lineales del cuerpo^{10,11}. Esta alteración conlleva a importantes consecuencias, las cuales requieren de complejos procesos adaptativos y que pueden afectar el bienestar y actuación de los astronautas durante su proceso de adaptación al ambiente del espacio. La primera consecuencia contempla la afectación de la coordinación entre la postura del cuerpo y el movimiento. La ausencia de gravedad no solo altera la información aferente sensorial, también se ven afectadas las condiciones mecánicas bajo las cuales el control de la postura y movimientos son dirigidos. Los astronautas necesitan aprender cómo movilizarse sin usar sus piernas en un ambiente tridimensional cuyas fuerzas de fricción son insignificantes.

Normalmente, estas habilidades para desplazarse fácilmente se desarrollan dentro de las primeras 4 semanas en el espacio. Así mismo, la alteración de señales vestibulares en el espacio involucran la distorsión de los reflejos visooculares, que se expresan por irregularidades en los movimientos de los ojos y en la estabilidad de la mirada fija, así como la pérdida de la congruencia usual observada entre las señales visuales, vestibulares y propioceptivas. La consecuencia más severa de esta serie de alteraciones, es el desarrollo de la enfermedad del movimiento en el espacio (EME), la cual se instaura dentro de los primeros minutos hasta 1-2 horas posteriores al inicio de exposición a la microgravedad. Usualmente dura de 1 a 7 días¹². Mediante observaciones realizadas por Lackner y Dizio, se halló que los movimientos rápidos de la cabeza y el cuerpo evocan o exacerbaban los síntomas de EME¹³.

Existe en la actualidad evidencia limitada, pero en continuo desarrollo, de que el ambiente que pre-

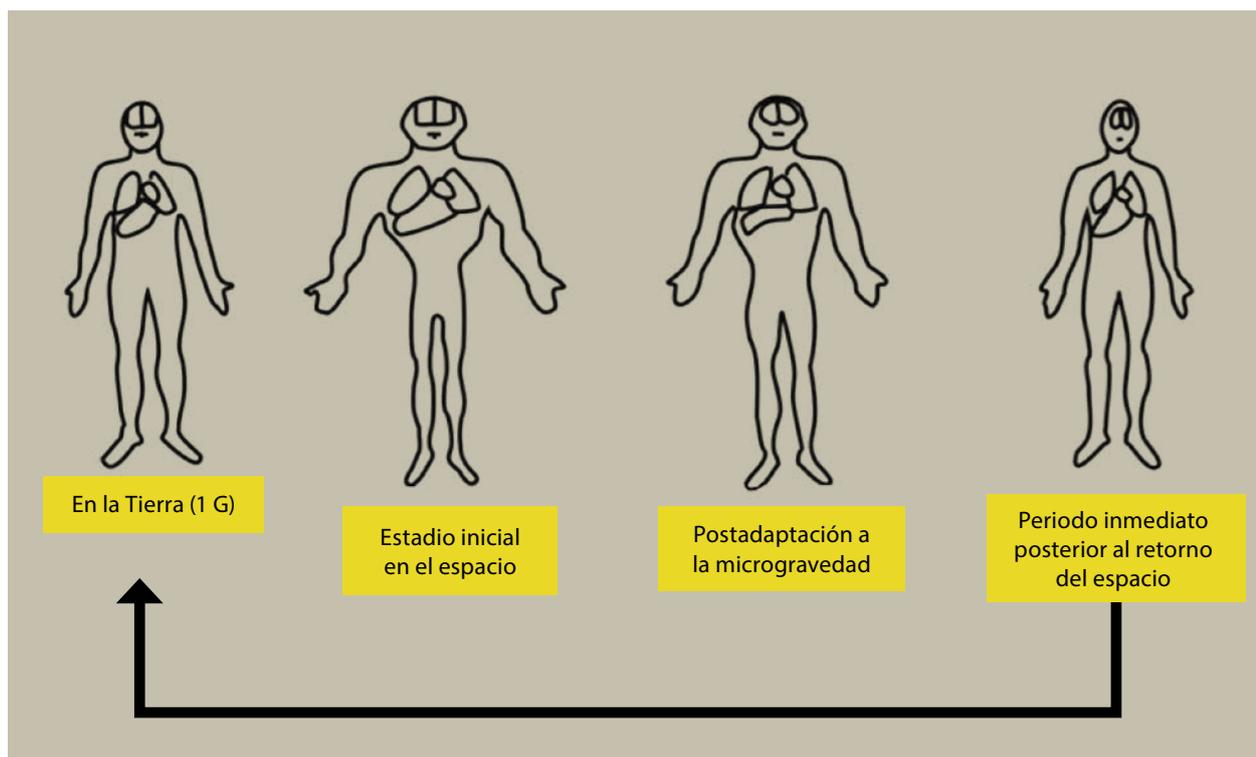


Figura 3. Representación esquemática de los cambios fisiológicos en microgravedad.

valece en el espacio, puede afectar el desempeño cognitivo y de los neurotransmisores cerebrales en los astronautas. Con base en estos conocimientos, se diseñó un experimento en la Universidad de Padua, Italia, en el cual se estudiaron los efectos de un ambiente simulado de microgravedad en 22 sujetos varones (con edad promedio de 22 años) con características similares a las que distinguen a un astronauta.

Fueron divididos en dos grupos, un grupo en reposo con la cabeza abajo (HDBR) y el control de pacientes sentados. Los resultados apuntan a una ausencia de plasticidad en el reflejo de sobresalto inducido por microgravedad y una deficiencia en el aprendizaje, la cual podría afectar el éxito de las misiones espaciales de larga duración¹⁴. Los hallazgos sugieren que la microgravedad puede afectar los neurotransmisores, los procesos cognitivos y la capacidad de aprendizaje como consecuencia de los vastos cambios psicológicos, hormonales y cardiovasculares típicamente observados en estas condiciones.

EFFECTOS CARDIOVASCULARES

El sistema cardiovascular tiene la capacidad de adaptarse a condiciones de microgravedad. Los mecanismos de adaptación que lleva a cabo este sistema se determinan de acuerdo a la etapa o fase del vuelo, la altura, etc. La alteración más importante y significativa es la redistribución de fluidos hacia el territorio encefálico, lo cual condiciona sobrecarga cardíaca e incremento de la presión intravascular (**figura 2**).

A continuación, mencionaremos las alteraciones cardiovasculares con mayor relevancia. Existe una disminución de la masa cardíaca y un incremento de la presión arterial diastólica, situación que inicia en la fase de lanzamiento y perdura durante todo el vuelo, y se ha observado que los valores normales no se recuperan hasta tres semanas después del vuelo¹⁵.

El volumen latido se incrementa en las primeras 24 horas de vuelo, posteriormente empieza a disminuir. Dentro de las alteraciones del sistema de conducción cardíaca en el electrocardiograma se observa un incremento del complejo QRS; consecuente al flujo vascular en sentido cefálico, y un in-

cremento del intervalo PR durante el vuelo, debido a un aumento del tono vagal. Durante el vuelo se registran diferentes grados de arritmias cardíacas, que generalmente son leves. Hasta el momento, no existe registro documentado de arritmias letales en ambientes de microgravedad¹⁶ (**figura 3**).

Durante un ambiente de microgravedad, a nivel cardiopulmonar existe un incremento de las presiones en las cavidades cardíacas, situación que el sistema circulatorio compensa gracias a la dilución del plasma. Esto sucede gracias a diversos mecanismos como la filtración trascapilar, el incremento del volumen intravascular y una reducción del 10 al 15% del volumen intersticial. Dicha situación provoca intolerancia ortostática en los tripulantes espaciales a su regreso a la tierra¹⁷.

Parece claro que la distensión cardíaca se produce durante los primeros 1-2 días de vuelo espacial en relación con la posición supina en 1 G y especialmente a 1 G vertical. También es probable que los barorreceptores arteriales estén relativamente estimulados durante este tiempo y que la presión intracraneal se incremente de forma anormal. Durante algunos experimentos en vuelos espaciales se descubrió que existe un aumento del 9% en la concentración de proteínas plasmáticas en el día de vuelo 1, y una reducción del 17% en el volumen de plasma de 22 h de vuelo, lo que se concluye que conforme pasan los días se invierten los niveles de volumen plasmático¹⁸.

EFFECTOS INMUNOLÓGICOS

Los cambios en el sistema inmune se encuentran documentados en las observaciones descritas durante misiones comprendidas de 1960 a 1970. La mitad de los astronautas en el *Apollo*, reportaron infecciones virales o bacterianas durante el transcurso del viaje o ya próximos a volver a la tierra¹⁹. De la misma manera, muestras de sangre tomadas a 9 astronautas, posterior al vuelo proveniente de la estación espacial Skylab, mostraron que la activación linfocítica mediada por mitógenos se encontraba significativamente reducida en comparación con las muestras prevuelo e inclusive comparadas con las muestras control²⁰.

Observaciones realizadas en astronautas basadas

El sistema cardiovascular tiene la capacidad de adaptarse a condiciones de microgravedad. Los mecanismos de adaptación que lleva a cabo este sistema se determinan de acuerdo a la etapa o fase del vuelo, la altura, etc. La alteración más importante y significativa es la redistribución de fluidos hacia el territorio encefálico, lo cual condiciona sobrecarga cardíaca e incremento de la presión intravascular.

Parece claro que la distensión cardíaca se produce durante los primeros 1-2 días de vuelo espacial en relación con la posición supina en 1 G y especialmente a 1 G vertical condiciones. También es probable que los barorreceptores arteriales estén relativamente estimulados durante este tiempo y que la presión intracraneal se incremente de forma anormal.

en su condición inmune después al despegue, muestran numerosos cambios, tales como: distribución alterada de la circulación leucocitaria, producción anómala de citocinas, disminución en la actividad de los linfocitos *natural killer* (NK), función deprimida de los granulocitos, activación abolida de los linfocitos T, niveles alterados de inmunoglobulinas, inmunidad viral específica alterada y respuestas neuroendocrinas alteradas. Un hecho común durante los vuelos espaciales, es el incremento de los niveles de glucocorticoides y catecolaminas en la circulación, lo que podría mediar los cambios en el sistema inmune²¹.

La habilidad de los astronautas para desarrollar y mantener apropiadas respuestas del sistema inmune celular y humoral en microgravedad en los vuelos espaciales es un punto crítico dentro de su misión, especialmente en vuelos prolongados. Existe evidencia experimental que demuestra que los tejidos o células desafiadas por antígenos de memoria o por

activadores policlonales en un modelo de microgravedad, pierden toda su habilidad para producir anticuerpos y citocinas, así como para aumentar su actividad metabólica. En contraste, si las células fuesen desafiadas antes de ser expuestas al ambiente de microgravedad, ellas mantendrían su respuesta²². Lo que demuestra que la activación inmune de células del tejido linfóide se encuentra severamente afectada tanto en modelos de microgravedad como en la microgravedad misma.

Otra de las células afectadas en el sistema inmune en un ambiente de microgravedad, son las células NK, estos son linfocitos citotóxicos que pueden lisar células infectadas por virus u oncogénicamente transformadas y promover la liberación de citocinas sin la necesidad de una previa inmunización. Son una importante conexión entre los sistemas inmunes innatos y adaptativos y juegan un rol pivote en los mecanismos antiinflamatorios, vigilancia de tumoraciones y la regulación de desórdenes autoinmunes. El efecto de la microgravedad en la actividad y función de las células NK durante los vuelos espaciales es un problema particularmente interesante. Investigaciones han demostrado disminución en la actividad y en la producción de interferón inducida por las células NK, 7 días posteriores al viaje²³.

EFFECTOS ÓSEOS

La microgravedad induce una disminución de la densidad ósea. En el ambiente de microgravedad presente en el espacio, los astronautas dejan de estar cargados estáticamente por la gravedad. Debido a que el remodelamiento óseo depende del nivel de tensión dentro del hueso, esta ausencia de carga tiene implicaciones significativas²⁴. Otros factores que contribuyen a la pérdida ósea en el espacio, son los bajos niveles de iluminación, los cuales resultan en una disminución de la vitamina D3, así como el aumento en los niveles de dióxido de carbono en el ambiente²⁵.

La desmineralización ósea inicia de manera inmediata a los cambios en la atmósfera del espacio. En el transcurso de los primeros días de una misión, se produce un aumento de 60% a 70% del calcio urinario y fecal, lo cual incrementa conforme se desarrolla la misión²⁶.

Esto se refleja de manera directa ya que se observa una disminución de la densidad ósea en rangos de 1 a 2% por mes en aquellos huesos que soportan peso, como lo son las vértebras lumbares, pelvis, cuello femoral, trocánter, la tibia y el calcáneo. En estas regiones, la pérdida de densidad ósea después de 6 meses de estancia en una estación espacial es aproximadamente del 8 al 12%²⁷. La pérdida de hueso trabecular podría alcanzar dimensiones tales que los osteoblastos se tornen incapaces de reconstruir la arquitectura del hueso después del retorno a la Tierra²⁷. Una vez en la atmósfera terrestre, el proceso de recuperación es típicamente largo, incluso mayor al tiempo invertido en el espacio, siendo este de varios años²⁸.

Existe una preocupación actual acerca de que los astronautas puedan padecer osteoporosis a edades más tempranas y a que el riesgo de sufrir fracturas se vea incrementado, además de la predisposición a la litiasis renal por el incremento en la excreción del calcio²⁸.

EFFECTOS MUSCULARES

Existen tres grandes tipos de músculos en nuestros cuerpos, todos ejercen sus funciones a través de la contracción y relajación coordinada de las unidades individuales que conforman un músculo determinado. La capacidad funcional del músculo esquelético, por ejemplo, el cual constituye cerca del 40% del volumen corporal, depende del tipo de fibra que predomina en él, así como de su inervación motora. La plasticidad de las fibras musculares les permiten adaptarse tanto a condiciones de baja carga o microgravedad, como a aquellas propias de un ambiente de sobrecarga o ejercicio²⁹.

Las investigaciones realizadas mediante vuelos de corta duración, muestran que los músculos extensores desarrollan una atrofia más grave que la que experimentan los músculos flexores. La atrofia muscular grave puede ocurrir dentro de pocos días en los músculos extensores, así como también es más grave en los grupos de fibras de contracción lenta, en comparación con los de contracción rápida. Los músculos que desempeñan una función antigravitatoria, entre los que destacan el cuádriceps, los músculos de la cadera, espalda y los extensores

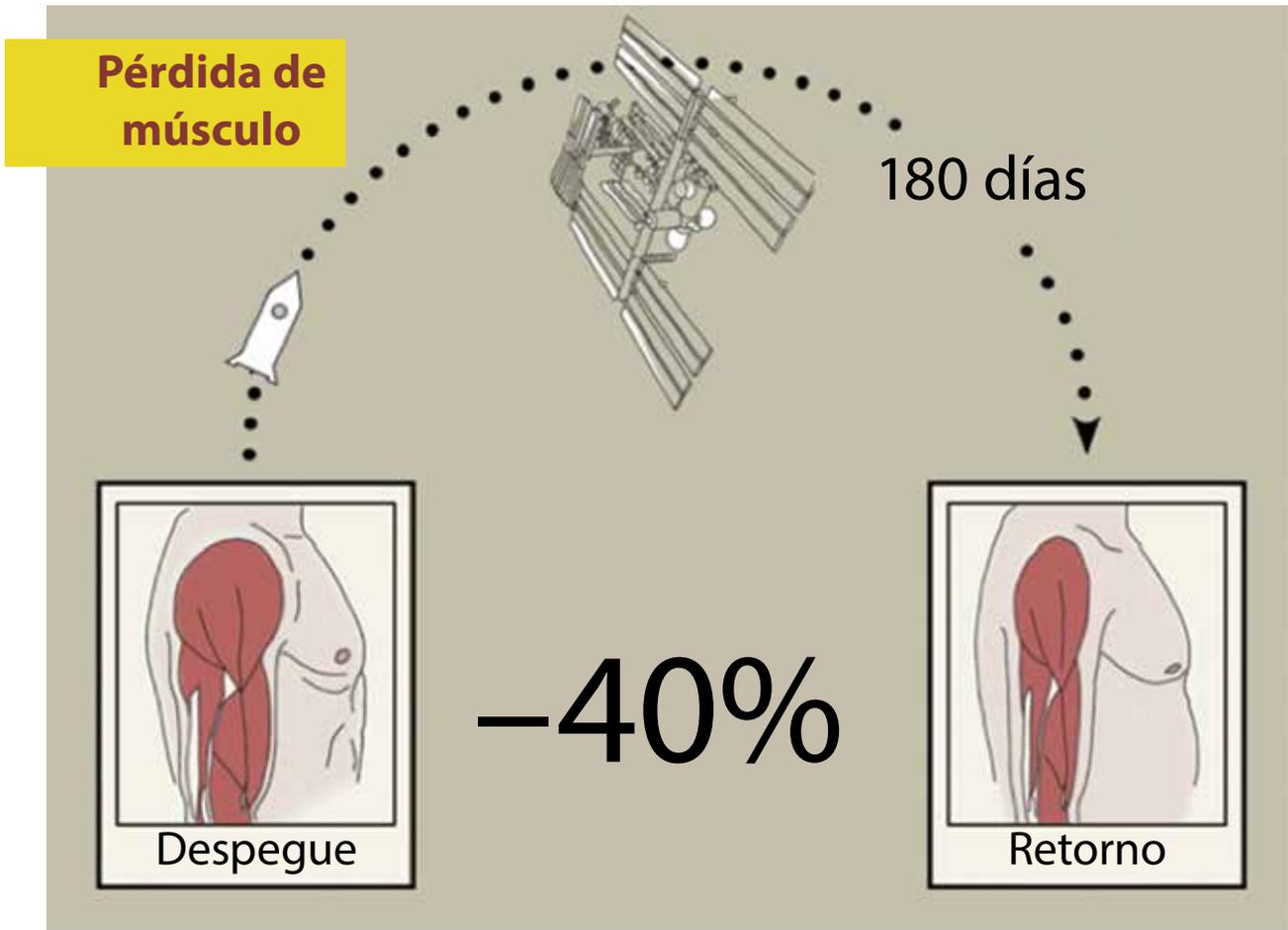


Figura 4. Disminución de la masa muscular en microgravedad.

del cuello se atrofian de manera rápida durante los vuelos espaciales. En contraste, los músculos de los brazos y manos en raras ocasiones se ven afectados³⁰.

Dos fases bien diferenciadas en el deterioro muscular han sido descritas: 1) La primera fase muestra una disminución de un 20 a 30% en la fuerza muscular durante las primeras semanas de vuelo en comparación con los niveles registrados previos al mismo. 2) La segunda fase inicia 3 a 4 semanas posteriores al inicio del vuelo, y la magnitud del deterioro muscular se encuentra altamente relacionada al nivel de ejercicio físico a bordo (**figura 4**)³¹. Posterior a su retorno a la Tierra, los músculos de los astronautas que han perdido su condición previa, son nuevamente influenciados por las fuerzas gravitacionales. Es en este contexto en el que se han

reportado dolor muscular, tensión de los músculos isquiotibiales y, en algunos casos, síntomas de fascitis plantar³².

MICROGRAVEDAD SIMULADA

En la actualidad, el poder simular la microgravedad para estudiar los fenómenos fisiológicos en el ser humano, es ya una realidad. Con el paso de los años ha mejorado el desarrollo de estas estrategias con el fin de mejorar la preparación de los astronautas y predecir las alteraciones fisiológicas a las que se someterán, y con esto evitar en medida de lo posible complicaciones o, en su debido caso, estrategias para prevenirlas. A continuación, mencionamos algunos de los sistemas que existen para simular la microgravedad.

SIN SALIR DE LA ATMÓSFERA

Torre de caída libre del INTA

La torre de caída del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) es un tubo vertical de 21 metros de altura en cuyo interior pueden depositarse cargas que experimentan condiciones de microgravedad de entre 10⁻³ G-10⁻⁵ G durante un tiempo de 2.1 segundos. Estos dos rangos de microgravedad se obtienen instalando el experimento en el interior de una de las dos cápsulas de experimentación disponible (cápsula simple y cápsula doble). En la cápsula simple, el experimento se fija en el interior de la cápsula, con lo cual el volumen disponible es mayor y el nivel de microgravedad es de 10⁻³ G. Para el seguimiento del experimento se dispone de cámaras de video y sistemas de adquisición de datos. En el interior de la torre, la caída es al aire libre, ya que carece de sistema de vacío.

Torre de caída de Bremen

Centro de Tecnología Espacial Aplicada y de Microgravitación (ZARM). La torre de caída al vacío, de 146 metros de altura y única en Europa, Laboratorio espacial en el que se realizan experimentos en condiciones de ingravidez. Una caída en una cápsula de prueba, desde la punta hasta el zócalo, sólo dura 4,6 segundos, lo suficiente para llevar a cabo experimentos e investigaciones que sólo serían factibles en el espacio.

Vuelos parabólicos con aeronaves

En el mundo existen tres agencias que realizan este tipo de vuelo: la NASA, la Agencia Europea y, en Rusia, el Yuri Gagarin Training Center (CGTC). El avión despega desde el aeropuerto y asciende hasta una altitud de aproximadamente 6000 m. La maniobra parabólica empieza elevando el avión a 45 grados a toda potencia. Tras 20 segundos, a una altitud de 7600 metros, el *airbus* decelera los motores hasta casi detenerlos, pasando así a un estado de caída libre, comenzando el periodo de 20 o 30 segundos de gravedad cero a bordo. El avión sube un poco más antes de que el morro haya trazado la parábola completa y empiece a caer. Posteriormente, se encienden de nuevo los motores a plena potencia y el avión vuelve a la posición de vuelo horizontal,

Después del despegue, los astronautas muestran cambios como: distribución alterada de la circulación leucocitaria, producción anómala de citocinas, disminución en la actividad de los linfocitos *natural killer*, función deprimida de los granulocitos, activación abolida de los linfocitos T, niveles alterados de inmunoglobulinas, inmunidad viral específica alterada y respuestas neuroendocrinas alteradas. Durante los vuelos es común el incremento de los niveles de glucocorticoides y catecolaminas en la circulación, lo que podría mediar los cambios en el sistema inmune.

de vuelta a los 6000 metros y listo para la próxima parábola. El inicio de la parábola y la terminación de la misma somete a las personas y a los equipos de abordaje a casi 2 G, en la parte superior de la trayectoria parabólica es donde se logra la microgravedad durante unos 20 a 30 segundos y es del orden de 0,1 G (**figura 5**).

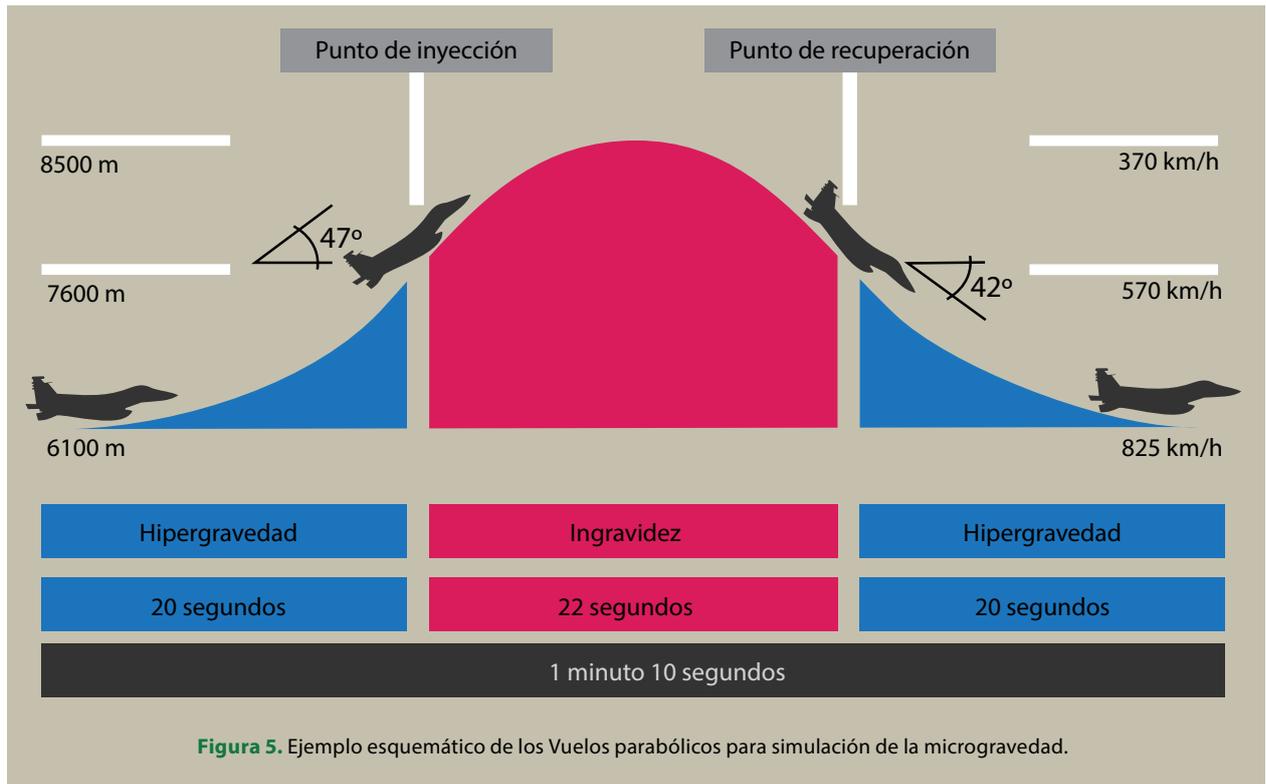
Tanques de flotación neutral

Actividad extravehicular (EVA). El agua es el medio que mejor imita la microgravedad del espacio. Los tanques de flotación neutral, grandes piscinas de agua que se usan para entrenar al astronauta, cuando el astronauta sale de una nave en órbita con su traje espacial para realizar una tarea. Se suelen colocar dentro de estas piscinas maquetas a escala natural de las naves, para familiarizar al astronauta con las maniobras necesarias para realizar una tarea con el traje espacial.

FUERA DE LA ATMÓSFERA

Cohetes de sondeo

Los cohetes de sondeo proporcionan una forma de obtener una microgravedad de buen nivel durante más de 10 minutos. La nave espacial es lanzada (por un cohete cuyo motor actúa por algunos minutos) en una trayectoria que se curva sobre la Tierra. Al



alcanzar cierta velocidad y una altitud de 1000 km, la trayectoria de caída de la nave será paralela a la curvatura de la Tierra, consiguiendo la condición o ambiente de microgravedad.

CONCLUSIONES

El ambiente hallado en los vuelos espaciales se caracteriza por temperaturas extremas, microgravedad, radiación cósmica galáctica y solar, ausencia de presión atmosférica, y micrometeoritos de alta velocidad.

Como consecuencia de la exposición a este ambiente particular, tienen origen una serie de alteraciones específicas en la fisiología de los astronautas que requieren la atención de médicos y científicos en un contexto interdisciplinario. La microgravedad ejerce el efecto más amplio y largo del ambiente hallado en los vuelos espaciales sobre la fisiología humana; todos los sistemas orgánicos sufren alteraciones en cierto grado. Estos mecanismos de reacción pueden ser apropiados durante el desarrollo de un vuelo en condiciones de microgravedad, pero son inapropiados al momento del retorno al

ambiente terrestre. El proceso de adaptación a estas condiciones involucra diversos cambios complejos en el cuerpo humano tanto en exposiciones por periodos cortos, como prolongados. Estos cambios pueden derivar en problemas de salud previos a la exposición al ambiente del espacio, durante e incluso posterior a esta exposición. Los programas Gemini, Apolo, Skylab, la Estación Espacial Internacional, así como el Programa Commercial Crew, todos ellos desarrollados por la Administración Internacional de la Aeronáutica y del Espacio, han aportado conocimientos puntuales respecto a los efectos de la microgravedad sobre la fisiología humana; sin embargo, hasta este momento no existe evidencia científica que permita explicar en su totalidad y de forma universal la interacción ser humano-espacio, y los efectos que de ella resultan. La ciencia continúa en el desarrollo de distintas líneas de investigación que den como resultado una comprensión satisfactoria y completa de este fenómeno, lo cual tendrá impacto directo en el diseño y desarrollo de misiones espaciales seguras para cada uno de sus integrantes. ●

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Legner K. *Humans in Space & Space Biology*. Vienna: United Nations Office for Outer Space Affairs; 2003. pp 79-82.
2. Rogers MJ, Vogt GL, Wargo MJ. *The Mathematics of Microgravity*. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 1997.
3. Rogers MJ, Vogt GL, Wargo MJ. *Microgravity, A Teacher's Guide With Activities in Science, Mathematics, and Technology*. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 1997.
4. García EJ. Un ambiente hostil: La conquista del espacio exigirá al hombre adaptarse a un medio que no es el suyo. *Rev Información y Actualidad Astronómica*. 2008;25.
5. Williams D, Kuipers A, Mukai C, Thirsk R. Acclimation during space flight: effects on human physiology. *Can Med Assoc J*. 2009;180(13):1317-23.
6. Ad Hoc Committee of Members of The Space Medicine Association and the Society of NASA Flight Surgeons. Human Health and Performance for Long-Duration Spaceflight. *Aviat Space Environ Med*. 2008;79:629-35.
7. Levine BD, Iwasaki K, Zhang R, Zuckerman JH, Pawelczyk JA, Diedrich A, et al. Human cerebral autoregulation before, during and after spaceflight. *J Physiol*. 2007; 579(3):799-810.
8. Mader TH, Gibson CR, Pass AF, et al. Optic disc edema, globe flattening, choroidal folds, and hyperopic shifts observed in astronauts after long-duration spaceflight. *Ophthalmology*. 2011;118(10):2058-69.
9. Kim DH, Parsa CF. Space flight and disc edema. *Ophthalmology*. 2012;119(11):2420-1.
10. Yates BJ, Kerman IA. Post-spaceflight orthostatic intolerance: possible relationship to microgravity-induced plasticity in the vestibular system. *Brain Research Rev*. 1998; 28:73-82.
11. West JB. Physiology of a Microgravity Environment, Historical Perspectives: Physiology in microgravity. *J Appl Physiol*. 2000;89:379-84.
12. Mergner T, Rosemeier T. Interaction of vestibular, somatosensory and visual signals for postural control and motion perception under terrestrial and microgravity conditions – a conceptual model. *Brain Research Rev*. 1998;28:118-35.
13. Dizio P, Lackner JR. Influence of gravito-inertial force level on vestibular and visual velocity storage in yaw and pitch. *Vision Research*. 1992;32:111-20.
14. Messerotti BS, Bianchin M, Angrilli A. Effects of simulated microgravity on brain plasticity: A startle reflex habituation study. *Physiol & Behavior*. 2011;104:503-6.
15. Watenpaugh DE, Hargens AR. *The Cardiovascular System in Microgravity*. Handbook of Physiology, Environmental Physiology 2011.
16. Antonutto G, Di Prampero PE. Cardiovascular deconditioning in microgravity: some possible countermeasures. *Eur J Appl Physiol*. 2003;90:283-91.
17. Premkumar K, Lee P. *Gravitational Effects on the Cardiovascular System*. Manual for Instructors: Gravitational Effects on the Cardiovascular System. 2009;2-21.
18. Aubert AE, Beckers F, Verheyden B. Cardiovascular function and basics of physiology in microgravity. *Acta Cardiol*. 2005;60(2):129-51.
19. Borchers AT, Keen CL, Gershwin ME. Microgravity and immune responsiveness: implications for space travel. *Nutrition*. 2002;18(10):889-98.
20. Hauschild S, Tauber S, Lauber B, Thiel CS, Layer LE, Ulrich O. T cell regulation in microgravity – The current knowledge from in vitro experiments conducted in space, parabolic flights and ground-based facilities. *Acta Astronautica*. 2014;104:365-77.
21. Sonnenfeld G, Shearer WT. Immune function during space flight. *Nutrition*. 2002;18(10):899-903.
22. Fitzgerald W, Chen S, Walz C, Zimmerberg J, Margolis L, Grivel J. Immune suppression of human lymphoid tissues and cells rotating suspension culture and onboard the International Space Station, In vitro Cell. *Dev Biol Anim*. 2009;45:622-32.
23. Li Q, Mei Q, Huan T, Xie L, Che S, Yang H. Effects of simulated microgravity on primary human NK cells. *Astrobiol*. 2013;13(8):703-14.
24. Buckley JC. Bone loss: managing calcium and bone loss in space. In: Barratt MR, Pool SL, editors. *Space physiology*. New York (NY): Oxford University Press; 2006. pp 5-21.
25. Shackelford LC. Musculoskeletal response to space flight. En: *Principles of clinical medicine for space flight*. New York (NY): Springer Science and Business Media; 2008. p. 293-306.
26. Clement G. Musculo-skeletal system in space. In: *Fundamentals of space medicine*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers; 2003. p. 173-204.
27. Lang T, LeBlanc A, Evans H, et al. Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight. *J Bone Miner Res*. 2006;19:1006-12.
28. Cann C. Response of the skeletal system to spaceflight. In: Churchill SE, editor. *Fundamentals of space lifesciences*. Vol. 1. Malabar (FL): Krieger publishing company. 1997. p. 83-103.
29. Cancedda R. The skeletal system. In: Fitton B, Battrick B, editors. *A world without gravity: research in space for health and industrial processes*. Paris (France): European Space Agency; 2001. p. 83-92.
30. Clement G. Musculo-skeletal system in space. En: *Fundamentals of space medicine*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers; 2003. p. 173-204.
31. Shackelford LC. Musculoskeletal response to space flight. In: Barratt MR, Pool SL, editors. *Principles of clinical medicine for space flight*. New York (NY): Springer Science and Business Media; 2008. p. 293-306.
32. Buckley JC Jr. Muscle loss: approach to maintaining strength. In: *Space physiology*. New York (NY): Oxford University Press; 2006. p. 77-100.
33. Pletser V. Preparing for future: European students conducting microgravity investigations during parabolic flights. *Journal Microgravity News*. 1995;8:95.