



El hombre en el espacio

The man in space

■ Santiago Prieto*

Resumen

Los viajes espaciales poseen un sinfín de aspectos matemáticos, físicos, químicos, técnicos y médicos que ponen a prueba las capacidades del hombre. En estas páginas se hace un mínimo apunte de cómo se resuelven los desafíos que plantea la vida en el espacio.

Palabras clave

Viajes espaciales. Efectos del espacio en el cuerpo. Supervivencia en el espacio. Medicina del espacio. Higiene de los astronautas.

Abstract

The interplanetary flights mean an infinity of mathematical, physical, chemical, technical and medical aspects that test man's abilities. In this pages a brief report, about the problems that life in space may pose and how they are solved, is made.

Key words

Interplanetary flights. Effects of space on the body. Survival in space. Astronautical hygiene. Space Medicine.

Vivimos en un Universo gobernado por leyes racionales que podemos descubrir y entender. Miremos hacia arriba, a las estrellas, y no abajo hacia nuestros pies. Tratad de darle sentido a lo que veis y preguntaos qué hace que exista el Universo. Sed curiosos.

Stephen Hawking. Ceremonia de apertura de los Juegos Paralímpicos. Estadio de Stratford, Londres, 29 de agosto de 2012.

* El autor es médico.

Breve historia aerospacial

Los físicos suelen considerar que la interpretación científica del Universo nació cuando Copérnico (1473-1543) expuso su idea heliocéntrica en el primer libro de su *De revolutionibus orbium coelestium* (1543); se desarrolló con Kepler (1571-1630) y sus leyes del movimiento de los planetas detalladas en *Mysterium Cosmographicum* (1595), y se consolidó cuando Newton (1642-1727) expuso su Ley de Gravitación Universal en la magna *Philosophiae Naturalis. Principia Mathematica* (1685). La física de Newton estuvo vigente durante más de dos siglos, pero «cambió» cuando Einstein (1879-1955) publicó su *Teoría de la Relatividad Especial* (1905) y el espacio y el tiempo dejaron de ser categorías independientes. Y, al formular la *Teoría de la Relatividad General* (1915) demostró que el espacio es curvo y que la gravitación es una manifestación de esa curvatura. En gran medida, la cosmonáutica parte de esas bases.

Los fundamentos teóricos de la cosmonáutica fueron sentados por Tsiolkovski (1857-1935) en *La exploración del espacio mediante motores a reacción* (1903); las

76

Feature Index

Abbr	Page	Editorial	Page
Announcements	4	Sports	32
Calendar	25	Society	3
Crossword	28	Wardrobe	26
Journal	11	Radio-TV	28

25 PAGES TODAY

The Huntsville Times

CHICAGO DAILY NEWS SERVICE HUNTSVILLE, ALABAMA, WEDNESDAY, APR. 12, 1961 ASSOCIATED PRESS — WIREPHOTO 51c PER WEEK

Where Progress...

Covers The Valley!

Man Enters Space

'So Close, Yet So Far,' Sighs Cape

U.S. Had Hoped For Own Launch

CAPE CANAVERAL, Fla. (AP) — The Redstone rocket which the United States had hoped would boost the first man into space stands on a launching pad here. The Soviet Union beat its firing date by at least two weeks.

"So close, yet so far," commented a technician who is helping groom the Redstone to send one of America's astronauts on a short sub-orbital flight, hopefully late this month or early in May.

"If we hadn't had those troubles last fall and on the ship and Little Joe shots this year, we might have made it," the technician said.

"But you have to give the Russians credit."

Hobbs Admits 1944

Soviet Officer Orbits Globe In 5-Ton Ship

Maximum Height Reached Reported As 188 Miles

MOSCOW (AP)—A Soviet astronaut has orbited the globe for more than an hour and returned safely to receive the plaudits of scientists and political leaders alike. Soviet announcement of the feat brought praise from President Kennedy and U.S. space experts left bobbed in the contest to put the first man into successful space flight.

By the Soviet account, Maj. Yuri Alekseyevich Gagarin, rode a five-ton spaceship once around the earth in an orbit taking an hour and 48 minutes. He was in the air a total of an hour and 48 minutes.

The whole sequence of events and the announcements relating to it raised a number of questions. The Soviet announcement said the flight took place today between 9:07 and 10:50.

VON BRAUN'S REACTION:

'To Keep Up, U.S.A. Must Run Like Hell'

FIGURA 1.—El 12 de abril de 1961 comenzó la era de los vuelos espaciales, inaugurados por el cosmonauta Yuri Gagarin (1934-1968), el primero en orbitar la Tierra durante 108 minutos en la cápsula *Vostock I* (cortesía de la NASA)

ideas concretas sobre cohetes espaciales surgieron cuando Goddard (1882-1945) publicó *Método para alcanzar alturas extremas* (1919), antes de fabricar y lanzar el primer cohete en 1926; a su vez, Oberth (1894-1989) apuntó las teorías de los vuelos más allá de la atmósfera en *El camino hacia los viajes espaciales* (1929) y los estudios sobre cohetes balísticos bélicos comenzaron en 1932 con los trabajos de Dornberger (1895-1980) y von Braun (1912-1977), paso previo a los devastadores V-2 lanzados en la Segunda Guerra Mundial sobre Londres. Y, en octubre de 1957, se produjo el gran salto cualitativo con el *Sputnik 1*, primer satélite artificial de la Tierra, que, tras orbitar nuestro planeta durante tres meses, se desintegró al reentrar en la atmósfera.

Hoy ya ha pasado algo más de medio siglo desde que en 1958 se fundara la *National Aeronautics and Space Administration*, NASA, y que Yuri Gagarin (1934-1968), a bordo de la *Vostok 1*, fuera el pionero de los viajes espaciales al pasar 100 minutos alrededor de la Tierra en 1961; también quedó atrás el proyecto *Mercury* con las cinco horas en el espacio de John Glenn, a bordo de la *Friendship 7*, en 1962. Vemos lejanos los programas *Géminis* (1965-66) y *Apolo* (1968-72) y el primer paseo humano sobre la Luna (Armstrong y Aldrin, con Collins en el módulo de mando) en julio de 1969. Apenas recordamos las primeras tragedias: *a)* del *Apolo 1*, en 1967, en un ensayo del despegue, por el fuego originado en la cápsula en la que se encontraban Grissom, White y Caffee, *b)* del *Soyuz 1*, ese mismo año, al estrellarse su cápsula con Vladimir Komarov a bordo al fallar los paracaídas, y *c)* del *Soyuz 11*, en 1971, cuando Volkov, Dobrovolski y Patsayev sufrieron una fuga de aire y la descompresión de la cápsula al reentrar en la atmósfera.

Recordamos el avance que significaron las estaciones *Skylab* (1973-79) y *Mir* (1986-2001), en la que el médico y cosmonauta Valery Poliakov trabajó durante 437 días entre 1994 y 1995, con una estancia en el espacio aún no superada. Como no olvidamos las imágenes de los desastres de los transbordadores *Challenger* (al despegar, el 28 de enero de 1981) y *Columbia* (al reentrar en la atmósfera, el 1 de febrero de 2003) con la pérdida instantánea de sus tripulaciones. Y cómo olvidar el *Spacelab* (1981-98), el *Shuttle* (1981-2011), o la Estación Espacial Internacional (ISS) ensamblada como un gran mecano entre 1998 y 2011 a 400 kilómetros sobre la Tierra, con una espléndida labor científica desarrollada y larga vida por delante.

El 6 de agosto de 2012, el *Mars Science Laboratory*, o *Curiosity*, se ha posado sobre Marte tras un viaje de ocho meses y diez días y doscientos millones de kilómetros recorridos. Los vuelos tripulados a ese planeta, o incluso «más allá», no sólo caben hoy en nuestra imaginación, también empiezan a ser verosímiles... con el detalle de que, por ejemplo, una misión a Marte durará alrededor de tres años (contando con un año y medio de estancia allí).

Pero, salir de nuestra vital y caótica atmósfera implica someterse a una gran aceleración para escapar de la atracción de la Tierra... y entrar en un medio hostil como es el espacio: un medio sin gravedad, agua ni aire, surcado por radiaciones nocivas para nuestra fisiología.

Pronto se vio que, junto a los riesgos inherentes al despegue, el vuelo y la re-entrada en la atmósfera, ese camino no iba a ser sencillo médicamente. Así, por ejemplo, ya en 1968 los tres tripulantes del *Apolo 7* sufrieron infecciones respiratorias víricas durante los diez días de su viaje. Como también muy pronto, y esencialmente como consecuencia de la microgravedad (μG), se observaron en los astronautas alteraciones del equilibrio, cefalea, anomalías en el sueño, pérdida de peso, redistribución de los fluidos corporales, atrofia muscular, desmineralización del esqueleto, cálculos renales y alteraciones en la inmunidad; y, además, intolerancia a la bipedestación al retornar a la Tierra.

Dejando a un lado los infinitos y apasionantes aspectos físicos, matemáticos y técnicos de la astronáutica, que exceden el objeto de estas páginas, es obvio que el éxito de una misión depende de la salud de su tripulación. Por lo tanto, además de resolverse problemas básicos como el abastecimiento de agua, aire y alimentos en el espacio, ante los problemas médicos ya definidos ha debido nacer una nueva especialidad: la Medicina Espacial.



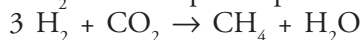
FIGURA 2.—El médico y cosmonauta Valery Polyakov (cortesía de www.spacefacts.de).

Aire, agua y alimentación en el espacio

En la cabina de una nave o una estación en órbita es preciso no sólo proporcionar oxígeno a la tripulación y retirar el anhídrido carbónico producido por la respiración, también deben eliminarse las pequeñas cantidades de gases de amoníaco y acetona que emitimos las personas (y los animales de experimentación) y los vapores de agentes químicos (acetaldehído, monóxido de carbono, dicloroetano, formaldehído, nitrometano, tricloroetileno...) producidos por las máquinas o los experimentos realizados a bordo, que pueden acumularse en un recinto limitado y reaccionar entre sí.

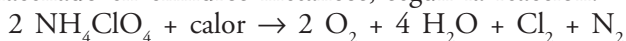
1.—*Oxígeno*. La fuente primordial de oxígeno en la *ISS* es la electrólisis del agua, «rompiendo» su molécula en hidrógeno y oxígeno gaseosos ($2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 2 \text{H}_2$)

y almacenando el O_2 a presión en depósitos apropiados. A su vez, el hidrógeno originado se combina con CO_2 en otro aparato para rendir agua y metano según:



El metano es expulsado al exterior y el agua se reutiliza o se somete a electrólisis para producir oxígeno.

Junto a ese método, también se produce oxígeno por el calentamiento de perclorato de amonio almacenado en cilindros metálicos, según la reacción:



2.—*Anhídrido carbónico.* El CO_2 se elimina mediante dos sistemas: *a)* el clásico, aún de reserva en la *ISS*, en el que se hace pasar el aire viciado a través de cilindros con hidróxido de litio ($LiOH$) que reacciona con el CO_2 para formar carbonato de litio ($LiOH + CO_2 \rightarrow CO_3HLi$); y *b)* el más eficiente, basado en la adsorción de CO_2 por zeolitas. Éstas son silicatos de aluminio con una estructura rica en poros y canales, lo que les confiere una gran superficie de contacto interior. El aire



FIGURA 3.—*Elektron* es un generador desarrollado en Rusia que, mediante electrólisis, produce oxígeno. Está ubicado en el módulo de servicio *Zvezda* («estrella» en ruso) de la Estación Espacial Internacional. En la foto pueden verse, junto al generador, a los cosmonautas rusos Andrey Borisenko (izquierda), comandante de la Expedición 28, Alexander Samokutyaev (centro) y Sergei Volkov, ambos ingenieros de vuelo (cortesía de la NASA, photo ID: ISS028-E-014908).

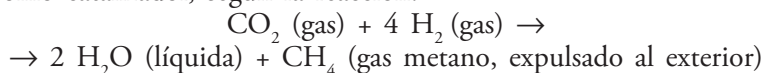
contaminado se hace pasar a través de esos silicatos. Concretamente, en la ISS se utiliza un sistema de dos depósitos conectados entre sí en el que el aire se conduce sucesivamente a través de zeolitas de diferente diámetro de poro (13x y 5x). La primera retiene moléculas de agua y el aire desecado que sale de ella se hace pasar a través de la 5x, que retiene CO₂, emergiendo así del sistema aire purificado. Y, para no perder el agua retenida en la 13x, las zeolitas se regeneran mediante calentamiento, formándose vapor de agua, que es condensada y reciclada, y el CO₂ liberado de la 5x es expulsado al exterior.

3.—*Agua y energía.* Aunque las estaciones espaciales llevan tanques con agua y los métodos de producción de O₂ y eliminación de CO₂ producen cantidades significativas de ella, siempre es un bien limitado. No sólo porque poner un kilo de cualquier elemento en el espacio significa decenas de kilos de propulsor y cuesta unos 18.000 euros, sino porque el volumen siempre será limitado. Por lo tanto, junto a su uso racional, ha sido preciso desarrollar sistemas para reciclarla y aprovecharla al máximo.

Así, cara y manos se limpian con toallas húmedas y los dientes se lavan con un dentífrico que se mastica y deglute. Los 30 litros de una ducha terrestre se reducen a cuatro en el espacio. En µG el agua no cae de un grifo, sino que va absorbida en una esponja y forma una película fina sobre la piel. Una vez lavado el cuerpo, esa película de agua jabonosa es absorbida mediante vacío que permite reciclar el agua. Igualmente, la micción se realiza en un embudo conectado a un sistema de vacío que conduce la orina a un recipiente... para reutilizar el agua.

El denominado *Water Recovery Sistem*, operativo desde 2008, sigue tres etapas: *a)* paso de los líquidos a través de un primer filtro para retirar las partículas sólidas y detritus; *b)* el fluido resultante se hace pasar sucesivamente por varias láminas con poros del orden de 0,2 nanómetros de diámetro, que retienen impurezas orgánicas e inorgánicas, y *c)* catálisis a alta temperatura para eliminar compuestos orgánicos volátiles, microorganismos y otros posibles contaminantes. (Los detritus se depositan en recipientes al efecto para ser devueltos a la Tierra). De esta manera, en la ISS se ahorran al año 7.000 litros de agua. Sin embargo, aunque muy eficiente, este sistema no puede aprovechar y reciclarla toda, por lo que debe ser complementado con otro.

El método fundamental para producir agua en la ISS es el *sistema Sabatier*, basado en la combinación de hidrógeno (resultado de la producción de oxígeno) con CO₂ en recipientes de acero inoxidable a alta presión y 300°C de temperatura, con rutenio como catalizador, según la reacción:



La electricidad necesaria para todos estos procesos es proporcionada por paneles solares mientras la nave se halla a una distancia a la que recibe energía del Sol.

No obstante, es probable que en misiones lejanas la energía eléctrica proceda de isótopos radiactivos. Así, todos los aparatos que hoy porta la *Curiosity* funcionan

con la energía producida por un «generador termoelectrico de radioisótopos». Estos generadores se basan en el llamado *efecto Seebeck*, por el que el calor generado por la desintegración de un isótopo radiactivo se transforma en energía eléctrica.

De esos isótopos, el más adecuado es el plutonio 238 (^{238}Pu) por: *a*) su alta densidad energética; *b*) su largo período de semidesintegración (87,7 años); *c*) emitir casi sólo radiación α , de alta energía y baja penetración, y apenas radiación γ , y *d*) necesitar un blindaje de plomo de apenas 2,5 cm de grosor. Estos generadores, (ya utilizados en las naves *Viking 1* y *2*, que llegaron a posarse en Marte en los años 70, y en la nave *Cassini* portadora de la sonda *Huygens*, desde enero de 2005 en Titán, una de las lunas de Saturno) son adecuados cuando se precisan centenares de vatios de potencia durante mucho tiempo y las células fotovoltaicas no funcionan. Por ejemplo, mientras el *Phoenix Mars Lander* y el *Spirit* emplearon paneles solares en Marte (y quedaron inoperantes por las tormentas de polvo que durante semanas barren su superficie), la *Curiosity* (899 kilos) utiliza como fuente de energía un generador termoelectrico de 45 kilos de peso, de los que 4,5 corresponden a dióxido de ^{238}Pu , capaz de producir suficiente energía eléctrica de manera continua durante al menos 14 años.

4.—*Alimentación*. En los primeros viajes espaciales tripulados, la alimentación era incómoda de utilizar y poco apetitosa, por lo que los astronautas no comían lo necesario y las tripulaciones de las *Apolo* y *Géminis* perdieron peso durante sus misiones. Eso cambió en el *Skylab* (1973-1974), con refrigerador, congelador y horno, en el que ya fue posible elegir entre 72 platos diferentes. Y, ante la duración cada vez mayor de los viajes, tanto la NASA, a través del *Advanced Food Technology Project*, y Rusia, con el organismo equivalente, han desarrollado sistemas de conservación de los alimentos para que mantengan su aspecto, textura, sabor y calidad nutricional durante más de tres años y, además, a temperatura ambiente.

Los alimentos se deterioran como consecuencia de cuatro fenómenos generales: enzimáticos, microbianos, físicos y químicos. Por ello, según el tipo, se conservan mediante: *a*) termoestabilización (destrucción de microorganismos y enzimas por calor), método aplicado a sopas envasadas en sobres esterilizados, condimentos (mahonesa y salsa de tomate), frutos secos y dulces; *b*) irradiación (esterilización por rayos γ producidos por ^{60}Co) aplicada a verduras, frutas, carnes y pescados, y ya utilizada en el proyecto *Apolo*; *c*) desecación (para rehidratación antes de tomarlos), útil para leche, huevos, arroz, legumbres, judías verdes, cereales y maíz, y *d*) congelación (helados, café, té, refrescos).

Tras esterilizarlos, los alimentos se empaquetan al vacío en láminas selladas que se guardan en bolsas finas y flexibles de plástico y aluminio, igualmente asépticas. Este sistema permite una buena conservación a temperatura ambiente hasta cinco años. Posee la ventaja añadida de que los envases son poco voluminosos y, una vez utilizados, se compactan y guardan en depósitos al efecto.

Finalmente, y aunque pudiera parecer ficción, ya se está estudiando la idea de cose-



FIGURA 4.—Bandeja con comida y cubertería usada en la Estación Espacial Internacional. Nótese los imanes, el velcro y el elástico empleados para compensar la falta de gravedad (cortesía de la NASA, photo ID: JSC2003-E-63872).

char alimentos en el espacio. Si, como hemos visto, se dispone de agua y energía a bordo, también es posible reproducir la fotosíntesis en cámaras de siembra y cultivar hidropónicamente unos vegetales que, además de captar CO_2 , permitan variar los menús y aportar vitaminas frescas a la dieta.

Como resumen, puede decirse que las tripulaciones de futuras misiones a millones de kilómetros de la Tierra, estarán bien alimentadas.

Problemas médicos en el espacio

La Medicina Espacial tropieza con el inconveniente del número limitado de astronautas (las tripulaciones se componen de tres a siete miembros) en los que estudiar la repercusión del entorno sobre las células, tejidos, órganos, aparatos y sistemas que componen el cuerpo humano; y, además, debe contar con que aquéllos están tan ocupados que no disponen de mucho tiempo para servir de «cobayas». Pero, a pesar de ello, y merced también a estudios realizados en ingravidez en la Tierra

y en el espacio, esta especialidad ya posee un caudal suficiente de conocimientos como para poder prevenir o resolver muchos de tales inconvenientes.

1.—*Sistema vestibular*. El primer sistema que se enfrenta a la μG , y el más sensible a ella, es el vestibular (localizado en el oído interno). Recordemos que el equilibrio estático detecta la fuerza de la gravedad y que, tanto el reconocimiento de nuestra posición como la coordinación de movimientos, comprenden mecanismos neurológicos en los que aquélla juega un papel esencial. De ahí que su ausencia (en μG , ¿qué es «arriba» y qué es «abajo»?) se acompañe de alteraciones en el equilibrio, cefalea, náuseas y vómitos. A pesar de la estricta selección de los candidatos y del entrenamiento al que son sometidos, más de la mitad sufren esos síntomas de la «cinetosis espacial», una enfermedad que cede a las cuatro o cinco semanas de vuelo y que responde al tratamiento con escopolamina y prometazina.

2.—*Presión hidrostática y sistema cardiovascular*. Nuestro cuerpo se compone, aproximadamente, de un 60% de agua. En función de las fuerzas de la gravedad, posición o aceleración, el agua ejerce diferentes presiones sobre las paredes elásticas de los vasos sanguíneos, lo que desencadena respuestas específicas para mantener el equilibrio de nuestro medio interno. En μG , la ausencia de las fuerzas hidrostáticas causa un desplazamiento de los fluidos desde los miembros inferiores hacia el tronco, miembros superiores y cabeza. Además, ese trasiego cefálico del agua se sigue de su paso desde el espacio extravascular al intravascular en la mitad inferior del cuerpo, mientras que en la mitad superior ocurre lo contrario: el agua sale desde el espacio intra al extravascular. De ahí que en las primeras semanas en el espacio los astronautas sufran edema facial, inyección conjuntival, congestión nasal, sensación de pesadez de cabeza y disminución del perímetro de los miembros inferiores, que describen con humor como «cara de globo y patas de pollo». Esos síntomas disminuyen con el ejercicio físico y el paso de los días hasta desaparecer.

A la vez, en las dos primeras semanas se pierden unos 2,5 kilos de peso y el volumen sanguíneo disminuye en un 10-15% (en gran medida por una mayor diuresis), hecho que perdura durante el vuelo y es el motivo de la hipotensión e intolerancia a la bipedestación que sufren los astronautas al volver a la Tierra. (Por eso deben tomar abundantes bebidas isotónicas en los días previos al aterrizaje). Con el tiempo, la diuresis se normaliza y, al formarse una fina capa de agua sobre la piel al faltar la convección del aire sobre ella, disminuye la pérdida de agua por sudor.

En cuanto al corazón, se ha comprobado que la frecuencia cardíaca aumenta en circunstancias concretas como el despegue, entrada en órbita, actividades extravehiculares y reentrada en la atmósfera, para reducirse en reposo y con las actividades a bordo. Igualmente, un tercio de los astronautas tienen extrasístoles ventriculares ocasionales, en especial en trabajos extenuantes fuera de la nave. No obstante, por tratarse de corazones jóvenes, sanos y entrenados, hasta la fecha sólo se han registrado arritmias graves en casos excepcionales.

3.—*Sistema músculo-esquelético* Sin duda, Arthur C. Clarke se documentó a conciencia y puso sus muchos conocimientos físicos y matemáticos al servicio de su fértil imaginación para crear su ya clásica *2001, A Space Odyssey* (1968). Entre un sinfín de aciertos, como el de dotar a su *Discovery One*, en su viaje hacia Saturno, de un cilindro de rotación de once metros de diámetro para generar una fuerza centrífuga productora de una gravedad similar a la de la Luna, no pudo prever uno de los problemas más serios a los que se enfrentan los astronautas en el espacio. Y es que, si los tripulantes se hubieran mantenido en hibernación durante cinco años como propuso en su obra, es muy probable que al despertar no hubieran podido moverse por la atrofia muscular y la desmineralización ósea secundarias a tan larga inmovilidad.

Recordemos que la arquitectura del músculo es la base de su función y que los parámetros que la determinan son: *a)* la propia forma y longitud del músculo, *b)* a longitud de las fibrillas que lo componen, *c)* el área transversal al corte, y *d)* su ángulo de anclaje en los tendones. Así, cuanto mayor sea el área transversal, mayor será su fuerza; a mayor longitud, mayor velocidad; y a menor ángulo de anclaje mayor será la eficiencia en la transmisión de la fuerza al tendón. La actividad física incrementa el número y el diámetro de las fibras musculares (y, en consecuencia, el área transversal del músculo) y, simultáneamente, aumenta el número y tamaño de las mitocondrias. La actividad y el entrenamiento de músculos concretos deciden su masa y, de tal modo, basta observar la atrofia al retirar un yeso de un miembro; o comparar la musculatura de los corredores de fondo, entrenados a campo través, frente a las masas musculares de velocistas o lanzadores trabajando en el gimnasio contra la resistencia de máquinas diversas.

Pero, la inmovilidad, el reposo prolongado o los viajes espaciales en μG , producen el efecto contrario: disminuyen la síntesis de proteínas musculares y causan la pérdida generalizada de masa muscular, o «atrofia por desuso».

En cuanto al hueso, es un tejido dinámico compuesto por: *a)* una matriz orgánica, esencialmente colágeno tipo I; *b)* un mineral de fosfato de calcio, la hidroxiapatita, y *c)* células óseas (osteoblastos formadores de hueso, osteocitos con función mecanorreceptora, y osteoclastos que reabsorben hueso) que controlan su fisiología. A pesar de su dureza, este tejido está surcado por infinidad de lagunas y canalículos ocupados por un fluido propio y osteocitos, detectores de las fuerzas que recibe el hueso. Además, éste sigue procesos continuos de formación y reabsorción mediados por una compleja trama de proteínas, de forma que a lo largo de la vida todo él se renueva varias veces y la masa ósea que poseemos en un momento dado es consecuencia del equilibrio (o desequilibrio) entre su formación y su reabsorción. Precisamente, un factor esencial en el remodelado del hueso son las cargas físicas que recibe, de manera que cuando faltan se reabsorbe más del que se forma.

Pronto se vio que la permanencia en el espacio se acompañaba de «pérdida de hueso» y ya en 1980 se publicaron las primeras observaciones de la desmineralización del calcáneo en tripulantes del *Skylab* y la estación *Mir*. Hoy sabemos que

en μG ¡cada mes! se pierde algo más de un 1% de la masa ósea, algo serio si la misión se prolonga durante meses. Y más aún si tenemos en cuenta que lleva años recuperar la masa previa.

Los estudios experimentales en personas (reposo en cama durante semanas) y en ratones, tanto en tierra (colgados de las patas traseras) como en la *ISS* (recluidos en cajas con un control estricto de su fisiología), han demostrado que la falta de la fuerza mecánica de la gravedad conlleva una menor formación ósea y una reabsorción aumentada, sobre todo donde se soportan mayores cargas como la columna lumbar, pelvis y huesos de los miembros inferiores.

Esos problemas se evitarían generando en las naves espaciales una fuerza similar a la gravedad y está en estudio cómo dotarlas de una fuerza centrífuga, como la imaginada por Clarke, que se traduzca en gravedad en su seno. Pero, tal idea tropieza con problemas técnicos aún no resueltos, como el del consumo de energía que implica, un asunto de índole mayor cuando, a millones de kilómetros, las naves no pueden utilizar la energía del Sol. Hasta que no se haya superado esta cuestión, la forma de que los astronautas conserven músculo y hueso (o al menos no los pierdan en demasía) es el ejercicio físico y una alimentación con suficientes proteínas y vitamina D (esencial para la absorción intestinal de calcio y fosfato, componentes del mineral óseo).

El método utilizado en la *ISS*, y probablemente en un hipotético viaje a Marte, es combinar ejercicios de carga contra resistencia alternando con movimientos vibratorios. Así, los astronautas practican a bordo ejercicios en bicicleta estática con resistencia en los pedales y pesos en hombros y miembros inferiores; y, sujetos con correas elásticas sobre los hombros, caminan sobre cinta continua durante dos horas y media al día en días alternos. Además, ya se está probando el *Galileo Space Exercise Device*, que permite aplicar vibraciones sobre el cuerpo. El astronauta, tumbado sobre una mesa, agarrado a unas asas, con las plantas de los pies apoyadas en una base vibratoria y una plataforma igualmente vibratoria contra la que hace fuerza con el tronco, se enfrenta a unas fuerzas que estimulan músculos y esqueleto. Estos ejercicios se practican durante 25 minutos al día y potencian el efecto de los ejercicios de carga.

No obstante, esas medidas poseen un efecto limitado, ya que hasta hoy no se ha logrado un sistema que reproduzca la situación a la que músculos y huesos se enfrentan sobre la Tierra, por lo que éste es un capítulo no acabado de escribir.

Por último, cuando se revisaron las historias clínicas de los 728 astronautas de los programas *Mercury*, *Apolo*, *Soyuz*, *Skylab*, *Shuttle*, *Mir* e *ISS*, se comprobó que 328 (el 52%) habían sufrido dolor lumbar durante las tres-cuatro primeras semanas en el espacio. Ese dolor fue leve en el 86%, pero fue moderado en el 11% e importante en el 3%. Ese 14% precisó tomar analgésicos y vio limitada su capacidad de trabajo. Aunque ese síntoma mejora con la posición fetal y el ejercicio en bicicleta estática, sigue siendo un problema no resuelto.

4.—*Litiasis renal* Los astronautas tienen mayor riesgo de desarrollar urolitiasis en el espacio que en la Tierra y un cólico nefrítico complicado (dolor prolongado durante horas o días, pielonefritis, anulación funcional de un riñón) puede dar al traste con una misión. Junto a factores hereditarios, tal riesgo obedece a: *a)* la excesiva reabsorción ósea, con llegada a los riñones del calcio y fosfato liberados desde el hueso; recordemos que la hipercalcemia es básica en la litiasis renal; y *b)* una ingesta escasa de agua, que facilita la sobresaturación de calcio, fosfato y otros solutos en el filtrado renal.

Otros factores, como una alta ingesta de proteínas animales y de sodio, un alto filtrado de ácidos oxálico y úrico, y un aporte escaso de ácido cítrico, también juegan un papel significativo. El exceso de proteínas animales aumenta la calciuria y favorece la formación de ácido úrico y su filtrado por el riñón. Igualmente, una comida rica en sodio reduce la reabsorción tubular de calcio, aumentando su concentración en el filtrado renal y facilitando su combinación con los ácidos oxálico y úrico. Por su parte, el efecto protector del citrato se debe a que por su fuerte carga aniónica se combina con el Ca^{2+} filtrado, formando una sal soluble de citrato cálcico que reduce la saturación de oxalato y urato cálcicos, y, por ende, la formación de cristales de esas sales de calcio.

De ahí que, además de intentar limitar la reabsorción ósea, las medidas para evitar la urolitiasis son: *a)* beber al menos dos litros diarios de agua para aumentar el volumen del solvente y dificultar la precipitación de los solutos; (el mareo y los vómitos de los primeros días en el espacio dificultan la ingesta y debemos recordar que, por ejemplo, los tripulantes del *Skylab* tuvieron diuresis inferiores a 500 ml/día durante la primera semana de misión); *b)* controlar el aporte de sodio a menos de 3,5 g/día, así como de proteínas (pero no demasiado, para evitar las atrofas musculares) y de ácido oxálico (en espinacas, acelgas, remolacha, cacao y alimentos integrales), y *c)* asegurar una toma adecuada de citrato en forma de cítricos o de citratos potásico y magnésico.

5.—*Microgravedad, inmunidad y médula ósea*. Los organismos unicelulares como el *Paramecio* perciben la gravedad a través de receptores (canales de iones) localizados en su membrana y, aunque en los mamíferos no se han identificado tales «gravirreceptores», es probable que también los poseamos. Ello explicaría por qué se produce una cierta inmunodepresión en el espacio. Así, no sólo se ha observado reactivación de virus herpes en las tripulaciones, también dos astronautas del *Apolo 13* sufrieron infecciones por *Pseudomonas aeruginosa* y las viriasis son frecuentes en todas las misiones. Los motivos son: *a)* la μG favorece la apoptosis de linfocitos T, lo que disminuye su número y, además, éstos producen menos interferón γ , interleuquina 2, y $\text{TNF-}\alpha$, lo que reduce su respuesta a los antígenos víricos y bacterianos; y *b)* en estudios realizados en la *ISS*, se ha observado que bacterias como *Salmonella* y *Pseudomonas*, y un hongo como la *Candida albicans*, sufren cambios en la expresión de genes que se traducen en una mayor virulencia. (Es probable que

la μG , al generar una menor fricción de los líquidos de cultivo sobre la superficie de los gérmenes, aumente por vía genética su capacidad infecciosa).

Asimismo, la permanencia en el espacio repercute en la sangre al reducir el volumen plasmático y el número de hematíes. Esta «anemia de los vuelos espaciales» se debe a la μG y a las radiaciones. Se ha observado que la μG altera la forma de los eritrocitos y modifica la composición de su membrana, aumentando su fragilidad y facilitando su rotura al pasar por vasos de pequeño diámetro. Además, las radiaciones solares y las electromagnéticas de baja longitud de onda como los rayos γ , escinden la molécula de agua para generar «especies reactivas de oxígeno» causantes de reacciones que llevan a la peroxidación de los lípidos de la membrana de los hematíes y facilitando la hemólisis.

A su vez, la médula ósea, sede de la formación de las células sanguíneas, ve alterada su función por estrés ambiental mantenido, cambios en los ritmos circadianos y las radiaciones, circunstancias que coinciden en los vuelos espaciales. No sorprende, por lo tanto, que en las tripulaciones de esos vuelos se haya observado una reducción de las células progenitoras hematopoyéticas, en especial las formadoras de macrófagos, monocitos y granulocitos. Además, paralelamente, la ingravidez también posee un cierto efecto inhibitorio de la adhesión de las plaquetas, lo que puede facilitar fenómenos hemorrágicos si se asocia otro factor predisponente.

6.—*Radiaciones y daño celular.* En 1958, cuando los ingenieros de la NASA incorporaron un contador Geiger en el satélite *Explorer 1*, ya observaron que existen radiaciones en el espacio. Hoy sabemos que éste está surcado por rayos ultravioleta, protones y electrones de alta energía producidos por el choque de rayos cósmicos con la magnetosfera, así como por protones y otras partículas energéticas procedentes del Sol, y por rayos cósmicos galácticos, de enorme energía y controvertida procedencia (¿de los agujeros negros?). Estas radiaciones pueden inutilizar no sólo los paneles solares y los componentes electrónicos de las naves, también son nocivos para las personas ya que dañan el ADN, además de alterar su síntesis y reparación.

Si la radiación anual que recibimos en la Tierra es de unos 0,0024 Sieverts (Sv), se calcula que en vuelos interplanetarios los astronautas recibirán 0,5 Sv al año, cifra que aumentará con las actividades extravehiculares. Como el riesgo de desarrollar cáncer se incrementa por una dosis aguda de radiación de 0,2 Sv y con una mantenida de 0,4 Sv al año, un viaje a Marte aumentará la probabilidad de sufrir un tumor maligno.

Por lo tanto, además de planificar bien las misiones; dotar de escudos que limitan la llegada de radiaciones al interior de las naves; utilizar trajes, cascos y viseras protectoras en las actividades extravehiculares; aportar vitaminas antioxidantes (A, C y E), y reposicionar las estaciones durante las tormentas solares, se recurre a sustancias antioxidantes. Las más ensayadas y prometedoras son L-selenometionina, melatonina y aminoácidos con estructura semejante a la micosporina, presentes en la piel de

ciertos moluscos marinos. Tales sustancias, además de antioxidantes, actúan como pantallas solares al absorber radiaciones ultravioleta y otras radiaciones.

7.—*Mente y vista*. Los psiquiatras de la NASA que en 1958 examinaron a los primeros candidatos a astronautas, tenían la idea preconcebida de que debían ser «impulsivos, con ideas de suicidio y con conductas sexuales aberrantes», porque «¿quién, en su sano juicio, se presenta voluntario para ser puesto en órbita?». Tras revisar los expedientes de 508 pilotos de la Marina, Fuerza Aérea y Cuerpo de Marines, seleccionaron a 110, de los que 69 acudieron a la entrevista con los examinadores. Descartaron a 46 por diferentes motivos, y nunca explicaron las razones por las que excluyeron a otros 16, para finalmente decidirse por los siete del proyecto *Mercury*: Carpenter, Cooper, Glenn, Grissom, Schirra, Sheppard y Slayton. Sí explicaron que todos: *a*) tenían gran seguridad en sí mismos y una enérgica necesidad de afirmación personal; *b*) aunque taciturnos, poseían una sorprendente resiliencia (del latín *resilio-resilire*: rebotar) o capacidad de hacer frente a las adversidades con decisión, tenacidad y perseverancia, sin ideas de frustración y enfrentándose a las decepciones con esfuerzos renovados; y *c*) aunque podían experimentar emociones, tenían un gran control de las mismas.

Hubo ejemplos sobrados de esas cualidades. Sirvan dos. Cuando, cuando en 1965 se averió gravemente la *Gemini 6-A* y se instó desde Tierra a que los dos tripulantes accionaran el mecanismo de eyección, el comandante Tom Stafford mantuvo la calma, no obedeció y aguantó haciendo las correcciones necesarias para que cayera al mar sin complicaciones tres días después. O cuando, en marzo de 1966, la cápsula del *Gemini VIII* se acopló con la nave *Agena* lanzada días antes, empezó a girar sin control, produciéndose una situación nunca ensayada. El comandante, Neil Armstrong (1930-2012), leyó enseguida la situación y necesitó pocos segundos para tomar la decisión de desacoplarla de la *Agena*. Pero ello no impidió que la cápsula empezara a caer girando a gran velocidad, haciendo perder el conocimiento al piloto David Scott. En unos minutos eternos, mareado y vomitando, Armstrong pudo realizar la maniobra de separarla del módulo adaptador, lo que les permitió hacer una reentrada de emergencia en la atmósfera a las diez horas del lanzamiento y llegar vivos a la Tierra.

Además de su influencia sobre el sistema músculo-esquelético, la μG también actúa negativamente sobre los ojos y el cerebro. Así, tras meses en el espacio, los astronautas desarrollan hipermetropía, defecto de refracción en el que los rayos de luz que entran en el ojo convergen en un foco situado detrás de la retina. Además, el examen del fondo de ojo demostró edema de papila en más de un tercio de los tripulantes de la *ISS*. Todo ello se debe a que la μG causa edema cervical, lo que dificulta el retorno sanguíneo por las venas yugulares internas al ser comprimidas entre el esternocleidomastoideo y la carótida primitiva, causando el llamado «síndrome obstructivo espacial» por cierto grado de hipertensión intracraneal. He ahí una buena razón, otra más, para reproducir en las naves una gravedad similar a la

terrestre y evitar a los astronautas la cefalea continua y los vómitos inherentes a tal hipertensión.

8.—*Sueño*. La exploración del espacio desde estaciones en órbita o naves tripuladas a través del cosmos, implica someter al hombre a unas condiciones que ponen a prueba su fisiología. Unas condiciones que pueden llevar al agotamiento físico y mental, reducir la capacidad de alerta y el rendimiento y, en consecuencia, comprometer la seguridad y el éxito de una misión. Hoy sabemos que uno de esos factores es la menor duración y peor calidad del sueño que sufren los astronautas por: *a*) la pérdida del ciclo luz-oscuridad (en la *ISS* ven amanecer cada 90 minutos), *b*) la ruptura de los ritmos circadianos, *c*) la alternancia de monotonía con sobrecarga de trabajo, sin horarios previsibles (con frecuencia, las tripulaciones deben trabajar cuando su ritmo interior les pide dormir, y viceversa), *d*) el confinamiento en un espacio limitado y con perenne ruido de fondo, y *e*) tener que dormir amarrados o en el interior de una bolsa sujeta a una pared para no desplazarse involuntariamente durante el sueño en μ G. Todo ello causa una degradación progresiva de la cantidad y calidad del sueño y, por ende, una menor capacidad cognitiva y mayor probabilidad de tomar decisiones erróneas.

Nuestro «reloj biológico», o marcapasos circadiano, reside en neuronas del hipotálamo anterior, de forma que, aun con «picos» y «valles» en el grado de alerta, ese marcapasos controla la vigilia, el sueño y la temperatura a lo largo de 24 horas. Así, en la Tierra, el menor grado de alerta y temperatura corporal más baja se produce entre las 03 y las 05h. Pero, al desincronizarse repetidamente vigilia, sueño y temperatura, aumenta la tendencia al sueño cuando debiera mantenerse la atención, la astenia parece invencible, merma el interés por el entorno, disminuye la identificación de la fatiga, se reduce la percepción de los riesgos y se minusvalora la trascendencia de las decisiones.

Recordemos, por ejemplo, que Valentin Lebedev, que en 1982 estuvo 211 días en la *Salyut 7*, reconoció haber cometido varios errores graves por falta de sueño reparador; y ya observó lo que más tarde se denominó «inercia de sueño», fenómeno por el que la vigilia se recupera muy despacio tras un déficit prolongado de aquél.

El primer estudio sobre este tema se desarrolló en la *Mir* en los años 1988-89 y se completó en el *Spacelab* en 1996. Así, sabemos que: *a*) los astronautas duermen una media de seis horas al día y con un sueño menos eficiente; *b*) se altera la estructura de su sueño, con disminución de las fases REM (*rapid eye movements*, movimientos oculares rápidos) coincidiendo con las ensoñaciones y momentos en el que el despertar es más fácil y menos traumático; y *c*) su temperatura corporal sigue un patrón en dientes de sierra y que los ritmos circadianos de alerta y temperatura se desplazan de dos a tres horas con respecto a la Tierra. Además, la programación escalonada de la actividad (media tripulación duerme mientras la otra mitad trabaja) altera aún más esos ritmos y empeora la duración y calidad del sueño.

Cómo no evocar la experiencia de Vasily Tsibliyeb, comandante de la accidentada

misión *Mir-23*, en 1997. Tras una concatenación de percances (uno de los paneles solares se inutilizó; se incendió el sistema de producción de O_2 en los cilindros de perclorato; se acumuló un exceso de CO_2 y la nave perdió altura) se produjo una avería en una de las máquinas. Durante varios días, Tsibliyeb no pudo dormir más de dos horas seguidas reponiendo el anticongelante que aquella perdía.

Por lo tanto, además de intentar programar las labores de acuerdo con el ciclo sueño-vigilia de los astronautas, se han desarrollado modelos matemáticos que calculan su ritmo circadiano para, en función de la temperatura corporal, frecuencia cardíaca y horas de actividad física diaria, procurar adaptar su labor a los momentos de vigilia. Y, cuando se produce un hecho relevante, como la llegada de una nave de carga a la *ISS* a una hora como, por ejemplo las 04 h, cuando los astronautas tienen previsto despertarse a las 06 h, se les adelanta el despertar 30 minutos cada día durante los cuatro días previos, para hacer coincidir su vigilia con la hora del ataque.

Entendemos así que, a pesar de todo, los fármacos más utilizados por los astronautas sean los inductores del sueño, en especial los de acción rápida y vida media corta.

Urgencias médicas en el espacio

En las páginas previas se apuntan algunos de los problemas a los que se enfrenta el hombre en el espacio. La selección hace que sólo unos pocos sean elegidos para tripular una estación en órbita o, en el futuro, viajar a millones de kilómetros de la Tierra; e, igualmente, la cuarentena previa reduce la probabilidad de infecciones en el espacio. Pero esas medidas no garantizan la salud de las tripulaciones. Y, ¿qué hacer ante una enfermedad surgida a esas grandes distancias?

Los astronautas son polifacéticos y, además de conocimientos de física, navegación, astronomía, mecánica, electrónica y comunicaciones, poseen formación específica en campos concretos. Muchos imprevistos surgidos a bordo son resueltos por ellos, pero otros precisan la colaboración desde la Tierra. Sin embargo, y por ejemplo, en un viaje a Marte, el contacto por radio tarda 44 minutos y el apoyo médico puede demorarse demasiado. Así, aunque en las tripulaciones que ocupan escalonadamente la *ISS* siempre hay un astronauta que ha seguido un curso en urgencias médicas, y hay una *Soyuz* atracada que puede traer a la Tierra a un enfermo grave en menos de 24 horas, eso no será suficiente a millones de kilómetros. Por lo tanto, las misiones tripuladas a tales distancias deberán contar con un astronauta que sea a la vez médico (y que también podrá enfermar) con experiencia en diagnóstico y terapéutica.

Junto a aparatos sencillos y poco voluminosos, como esfigmomanómetro y electrocardiógrafo, la *ISS* ya lleva un ecógrafo conectado por telemetría con la Tierra. Existen ecógrafos de tecnología digital que pesan poco más de tres kilos, con excelente calidad de imagen, aplicables a tórax, abdomen y extremidades. (Los aparatos de rayos X, más grandes e interferidos por las radiaciones espaciales, «ven» el parénquima pulmonar y los huesos, que escapan a la ecografía, por lo que deberá

desarrollarse un sistema que permita blindarlos para poder hacer radiografías en el espacio).

Sin duda, esas misiones llevarán una farmacia y un laboratorio clínico que permita analizar las células de la sangre y los datos bioquímicos esenciales, para lo que se necesita quien haga la extracción, procese la muestra e interprete los resultados.

En cuanto a una posible anestesia, los gases están proscritos por el riesgo de su dispersión en el entorno cerrado de una nave y, por lo tanto, deberá ser local, regional o intravenosa (sabiendo que en μG no se ve el nivel aire-fluido en una bolsa de suero, debiendo eliminarse el aire antes de infundirlo; y que el fluido «no cae» como en la Tierra, por lo que debe utilizarse un sistema a presión).

Asimismo, en el aire de las naves es frecuente que haya pequeñas cantidades de hidrocarburos halogenados que pueden facilitar arritmias cardíacas potencialmente graves. Por ello, además de un desfibrilador, a bordo debe haber el instrumental necesario para una reanimación cardiopulmonar, a sabiendas de que intubar la tráquea a alguien flotando en μG tiene especial dificultad.

Por último, los astronautas pueden sufrir traumatismos cerrados o penetrantes, que podrán necesitar aporte de volumen intravenoso o, incluso cirugía en el espacio. A la hora de actuar en cada situación, la pericia del médico minimizará los daños.

Viajar al espacio: ¿por qué? y ¿para qué?

Probablemente, las preguntas básicas en cualquier rama de la ciencia son: ¿por qué? y ¿cómo? Desde que el hombre apareció sobre la Tierra, tuvo curiosidad, observó e intentó entender lo que le rodeaba: la tierra y el cielo; la vida y la muerte, el espacio y el tiempo. Poco a poco, sus luces le permitieron, tras infinitos porqués y cómo, conocer su entorno inmediato e imaginar el contenido del Universo. No en vano, Einstein consideraba su imaginación como la más valiosa de sus capacidades.

El hombre imagina y necesita saber... todo. Viajar al espacio significa buscar respuestas y conocer. Conocer el origen de la Tierra y, acaso también, su destino. Conocer los ingredientes del Universo y desvelar la «materia oscura» (o no visible), deducida a partir de sus efectos gravitacionales sobre las estrellas y que constituye una quinta parte de su masa; y, también, conocer la composición gaseosa de los espacios intergalácticos, precisar la edad, expansión y el destino del Universo; conocer la composición química, mineral e isotópica de otros planetas y saber si en otras galaxias hay alguno con atmósfera y geología similares a la nuestra; saber si en esos «exoplanetas» hay vida, la hubo, o podrá haberla y de qué tipo.

Y, a la vez, estudiar cómo la μG afecta a los genes y al endotelio de nuestros vasos y, por lo tanto, cómo se envejece en ese medio; cómo el efecto genotóxico y mutagénico de las radiaciones repercute en la replicación de las células normales y tumorales, o sobre las semillas de vegetales, o cómo actúan y se degradan los fármacos en μG ...

Pero, al mismo tiempo, ir al espacio significa desarrollar una tecnología nueva, como la de los propulsores atómicos o los motores iónicos, capaces de facilitar a las naves velocidades de hasta 38.000 km/h con un consumo mínimo de combustible; o la de investigar las aleaciones de metales fundidos en hornos en μG ; o aplicaciones médicas, como la telemedicina, la nanocirugía, la microcirugía asistida por robot, la producción de fármacos ya conocidos o fabricar otros nuevos. Todo eso no sólo es posible, ya está en marcha y se traducirá en aplicaciones aquí.

Y quién sabe si algún día partirá de la Tierra una nave tripulada hacia un planeta hoy aún desconocido en un viaje deliberadamente sólo de ida.

Quizá, quien mejor resumió por qué viajar al espacio fue Arthur C. Clarke (1917-2008), allá por 1950, en el prólogo de su obra *Interplanetary Flight. An Introduction to Astronautics*:

«No hay camino de retorno al pasado. Como ya dijo Wells, las únicas opciones son el Universo o la nada... Los grandes espacios entre los mundos son un reto formidable; pero, si no nos enfrentamos a ese desafío, significará que la historia de nuestra raza llega a su fin. La Humanidad habrá dado la espalda a las alturas aún vírgenes y volverá a descender por la larga pendiente que lleva, a través de millones de años, a los mares primigenios».

Bibliografía

- Belavy DL, Beller G, Armbrrecht G, Perschel FH, Fitzner R, Bock O, Börst H, Degner C, Gast U y Felsenberg D. Evidence for an additional effect of whole-body vibration above resistive exercise alone in preventing bone loss during prolonged bed rest. *Osteoporos Int.* 2011; 22: 1581-91.
- Cancedda R, Liu Y, Ruggiu A, Tavella S, Biticcho R, Santucci D, Schwartz S, Ciparelli P, Falcetti G, Tenconi C, Cotronei V y Pignataro S. The mice drawers system (MDS) experiment and the space endurance record-breaking mice. *PlosOne* 2012; 7:e32243.
- Hughson RL, Shoemaker JK, Blaber AP, Arbeille P, Greaves DK, Pereira-Junior PP y Xu D. Cardiovascular regulation during long-duration spaceflights to the International Space Station. *J Appl Physiol.* 2012; 112: 719-727.
- Mallis MM y DeRoshia CW. Circadian rhythms, sleep, and performance in space. *Aviat Space Environ Med.* 2005; 76 (6, Suppl.): B94-107.
- Perchonock MH, Cooper MR y Catauro PM. Mission to Mars: food production and processing for the final frontier. *Annu Rev Food Sci Technol.* 2012; 3: 311-330.
- Pietsch J, Bauer J, Egli M, Infanger M, Wise P, Ulbrich C y Grimm D. The effects of weightlessness on the human organism and mammalian cells. *Curr Mol Med.* 2011; 11:350-64.
- Stewart LH, Trunkay D y Rebagliati GS. Emergency medicine in space. *J Emerg Med.* 2007; 32: 45-54.
- Takahashi A y Ohnishi. The significance of the study about the biological effects of solar ultraviolet radiation using the exposed facility on the International Space Station. *Biol Sci Space.* 2004; 18: 255-60.
- Whitson PA, Pietrzyk RA, Jones JA, Nelman-González M, Hudson EK y Sams CF. Effect of potassium citrate therapy on the risk of renal stone formation during spaceflight. *J Urol.* 2009; 182: 2490-96.
- Wiener TC. Space obstructive syndrome: intracranial hypertension, intraocular pressure, and papilledema in space. *Aviat Space Environ Med.* 2012; 83: 64-66.