

REVISIÓN

Gac Med Bilbao. 2025;122(2):83-91



¿Nos dejará el cuerpo humano llegar a Marte?

Alcaraz David^a, Pascual Julio^a

(a) Servicio de Neurología, Hospital Universitario Marqués de Valdecilla, Universidad de Cantabria e IDIVAL, Santander, España.

Recibido el 25 de enero de 2025; aceptado el 1 de febrero de 2025

PALABRAS CLAVE

Espacio.
Gravedad.
Marte.
Radiación.

Resumen:

Múltiples son los obstáculos para llegar a Marte. Estos incluyen un sistema de propulsión adecuado, la elección de una órbita óptima, además de los problemas económicos y legales. Nuestro objetivo es analizar el factor limitante de un viaje de estas características como es, sin duda, su impacto sobre el organismo de los viajeros, que se vería expuesto a un estado de ausencia de gravedad y radiación espacial prolongados. Sus consecuencias son aún desconocidas en gran medida. Pero en los últimos años se van precisando las múltiples repercusiones potenciales, más allá de la pérdida de masa ósea o muscular, que sobre el organismo humano tendría el ambiente hostil del exposoma espacial. Estas repercusiones son variadas e incluyen complicaciones derivadas de cambios estructurales, tales como el síndrome neuro-ocular o la afectación miocárdica con arritmias; de la exposición prolongada a la radiación espacial, tales como la aterosclerosis acelerada o el riesgo de neoplasias; de modificaciones en el sistema inmune, que condicionan un auténtico estado de inmunodepresión y de alteraciones en los fenómenos de división celular y en la longitud de los telómeros, lo que podría acortar la esperanza de vida. Aunque es técnicamente factible realizar un viaje tripulado a Marte, las potenciales amenazas médicas que se van desvelando obligan, por un lado, a continuar esta línea de investigación y, por otro, a la planificación de medidas preventivas que reduzcan en lo posible estos riesgos. Los resultados de estas investigaciones se traducirán también en avances en el conocimiento de las enfermedades en nuestro planeta.

© 2025 Academia de Ciencias Médicas de Bilbao. Todos los derechos reservados.

GILTZA-HITZAK

Espazioa.
Grabitateak.
Marte.
Erradiazioa

Giza gorputzak utziko al digu Martera iristen?

Laburpena:

Asko dira Martera iristeko oztopoak. Hauek propulzio-sistema egokia, orbita optimoa aukeratzea eta arazo ekonomiko eta legalak barne hartzen dituzte. Ezaugarri horiek dituen bidaia baten faktore mugatzailea aztertzea da gure helburua, bidaiarien organismoan duen eragina, zalantzarik gabe, larritasun eta erradiazio espazialik gabeko

egoera luze baten eraginpean egongo litzatekeena. Horren ondorioak oraindik ezezagunak dira neurri handi batean. Azken urteotan, ordea, hainbat ondorio potentzial zehaztu dira, hezur- edo muskulu-masaren galeraz gain, espazioko esposomaren aurkako giroak giza organismoan izango litzatekeenak. Ondorio horiek askotarikoak dira, eta egiturazko aldaketek eragindako konplikazioak dituzte, hala nola síndrome neuro-okularra edo arritmiekiko miokardio-afekzioa; erradiazio espazialarekiko esposizio luzea, hala nola ateroklerosi azeleratua edo neoplasiak izateko arriskua; sistema immunearen aldaketak, inmunodepresio-egoera eta zelula-zatiketaren fenomenoak eta telomeroen luzeraren alterazioak baldintzatzen dituztenak, eta horrek bizi-itxaropena laburtu dezake. Nahiz eta teknikoki posible den Martera bidaia tripulatua egitea, agerian geratzen ari diren mehatxu medikoen ondorioz, alde batetik, ikerketa-ildo horri jarraitu behar zaio, eta, bestetik, arrisku horiek ahal den neurrian murrizteko prebentzio-neurriak planifikatu behar dira. Ikerketa horien emaitzek gure planetako gaixotasunak ezagutzeko aurrerapenak ere ekarriko dituzte.

© 2025 Academia de Ciencias Médicas de Bilbao. Eskubide guztiak gordeta.

KEYWORDS

Space.
Gravity.
Mars.
Radiation.

Will the human body allow us to reach Mars?

Abstract:

There are many obstacles to reaching Mars. These include a suitable propulsion system, the selection of an optimal orbit, and economic and legal issues. Our objective is to analyze the limiting factor of such a journey, which is undoubtedly its impact on the organisms of travelers, who would be exposed to a state of weightlessness and prolonged space radiation. Its consequences are still largely unknown. However, in recent years, the multiple potential repercussions, beyond the loss of bone or muscle mass, that the hostile environment of the space exposome would have on the human body have become clearer. These repercussions are varied and include complications derived from structural changes, such as neuro-ocular syndrome or myocardial damage with arrhythmias; from prolonged exposure to space radiation, such as accelerated atherosclerosis or the risk of neoplasia; of modifications in the immune system, leading to a true state of immunosuppression and alterations in cell division and telomere length, which could shorten life expectancy. Although a manned trip to Mars is technically feasible, the potential medical threats that are being revealed require, on the one hand, to continue this line of research and, on the other, to plan preventive measures to reduce these risks as much as possible. The results of this research will also translate into advances in our understanding of diseases on our planet.

© 2025 Academia de Ciencias Médicas de Bilbao. All rights reserved.

Introducción

Desde los primeros destellos de la imaginación humana se soñó con viajar y explorar el espacio exterior. Los grandes avances científico-tecnológicos permitieron en 1961 poner en órbita al primer ser humano, Yuri Alekseyevich Gagarin por parte de la Unión Soviética. En 1969, Estados Unidos consiguió llevar al primer hombre a la luna, en su misión Apolo 11. Desde el año 1961 se han llevado a cabo más de 1200 vuelos espaciales tripulados y casi 600 humanos han estado en órbita¹.

La inmensa mayoría de este tipo de viajes se han realizado en la órbita terrestre baja que se encuentra entre la atmósfera y el cinturón de radiación de Van Allen, entre 160 y 2000 kilómetros de distancia. La órbita terrestre baja es un lugar sostenible para los viajes espaciales gracias a su proximidad a la Tierra, lo que permite el abasteci-

miento de las múltiples aeronaves que están en órbita y acorta la duración de los vuelos. Además, en esta órbita la Tierra protege de la radiación y las temperaturas no cambian drásticamente. Ambos fenómenos abaratan los costes, que también son un factor limitante importante en el mundo espacial. En esta órbita es donde se encuentran una gran cantidad de satélites y la Estación Espacial Internacional (EEI).

El interés en el descubrimiento del espacio exterior sigue en pie y hay un nuevo objetivo: Marte. Sin embargo, la misión no será tarea fácil, ya que existen múltiples obstáculos desde el punto de vista tecnológico, económico, legal y médico que solventar. El objetivo de este artículo es revisar las nuevas evidencias en cuanto a las múltiples adversidades a las que se expondrían, desde el punto de vista médico, los astronautas en una misión a Marte.

Métodos

Revisamos exhaustivamente las principales bases de datos o publicaciones (Pubmed, UptoDate, Elsevier o Google Scholar) con los términos “microgravity”, “space radiation”, “Mars”, long-duration spaceflight”, las páginas webs de la NASA (<https://www.nasa.gov/>) y la Agencia Europea del Espacio (<https://www.esa.int>), así como el material existente en libros publicados al respecto.

El problema de la distancia

Aunque esta revisión se centrará en la repercusión de un posible viaje a Marte en el organismo de los astronautas, explicaremos en primer lugar las opciones de recorrido de un viaje de estas características, ya que las repercusiones van a depender, directamente, de la ruta que se elija. La distancia que existe entre la Tierra y Marte difiere ampliamente en función de sus posiciones relativas. De esta forma, la distancia oscila desde 54,6 millones de kilómetros hasta 399 millones de kilómetros².

Por este motivo es de vital importancia realizar una ruta espacial adecuada y elegir el momento exacto. De las múltiples opciones descritas, tres son las más plausibles. La primera es la denominada maniobra de transferencia orbital de Hohmann (**Figura 1**).

Esta plantea una elipse que se entrecruza entre la órbita de la Tierra y la órbita de Marte, aprovechando al máximo el movimiento orbital de los propios planetas. La aeronave despegaría cuando Marte se encuentre delante de la Tierra en un ángulo de aproximadamente 45 grados (fenómeno que ocurre cada 26 meses), y llegaría a la órbita de Marte justo en el lado opuesto al Sol de la localización terrestre original. Para la vuelta, la aeronave debe despegar cuando Marte esté a, aproximadamente, 75 grados delante de la Tierra, alcanzar la órbita terrestre y esperar a que la Tierra los alcance. Con este plan teamiento el viaje completo llevaría aproximadamente 2 años y medio, 260 días para ir a Marte, 260 días para volver a la Tierra y 460 días en Marte esperando a una adecuada posición interplanetaria para poder alcanzar la órbita terrestre³.

La segunda opción de viaje se basa en la “oposición”, momento en el cual Marte está lo más cercano posible de la Tierra (**Figura 1**).

Puede parecer la opción más lógica, pues es con la que menos kilómetros se deben recorrer; no obstante, presenta dos problemas. El primero, el itinerario de viaje. La ida conllevaría 220 días y la vuelta 290 días, con una estancia en Marte de tan solo 30 días. Supone demasiado tiempo de viaje para una estancia muy corta. El segundo es de fechas. Debido a la dinámica de los movimientos interplanetarios en sus órbitas, la última vez que Marte y la Tierra estuvieron tan cerca fue el 27 de agosto de 2003 y los cálculos prevén que esto no volverá a ocurrir hasta el 28 de agosto de 2287³

La tercera y última forma de intentar alcanzar el Planeta Rojo sería propia de las aeronaves con motores de baja propulsión que no alcanzan la fuerza suficiente como para sobrepasar la órbita terrestre de una sola vez. La aeronave se queda dando vueltas alrededor de la órbita terrestre hasta conseguir la velocidad suficiente como para alcanzar la órbita de Marte, en lo que se puede demorar hasta un año. En ese tiempo la aeronave y sus tripulantes se verían expuestos a la radiación³ lo que se podría reducir en el futuro si se estableciera una base lunar permanente.

Las consecuencias de la radiación espacial

Al igual que la distancia, la radiación espacial constituye un factor que condiciona la llegada del hombre a Marte. La radiación espacial es diferente a la terrestre, gracias a la atmósfera y al campo magnético. Las formas más comunes de radiación en la Tierra son la alfa (α), beta (β) y gamma (γ), las cuales se clasifican como de baja transferencia lineal de energía (hace referencia a la cantidad de energía media que una radiación emite al medio por unidad de longitud)⁴. Al contrario, en el espacio el tipo de radiación se cataloga como de alta transferencia lineal de energía, formada fundamentalmente por protones e iones de alta energía. En el espacio, dichas radiaciones se originan a partir de eventos de partículas solares, también llamados tormentas de radiación solar y de los rayos cósmicos. Los eventos de partículas solares son fenómenos no muy frecuentes en los que el Sol emana grandes cantidades de protones, partículas α e iones de alta energía. A diferencia de los anteriores, los rayos có-

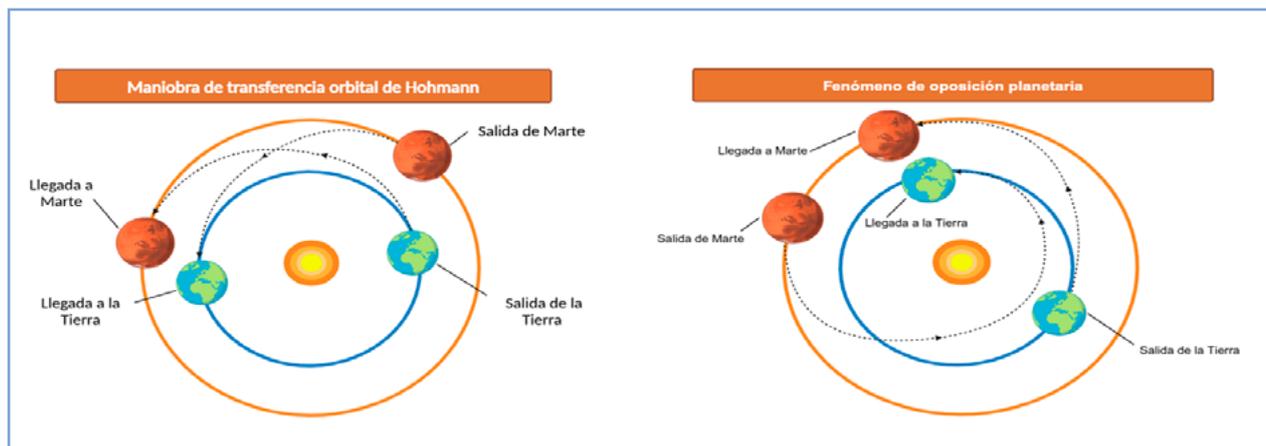


Figura 1. Trayectorias potenciales de un vuelo tripulado a Marte.

micos se producen de forma omnidireccional y continua, por lo que son una fuente de exposición de radiación permanente a la que se está expuesto en el espacio. Los protones son su principal componente, similar a los eventos de partículas solares, y en menor proporción partículas α e iones de alta energía⁴.

Son bien conocidos los efectos de la radiación sobre el cuerpo humano. El síndrome de irradiación agudo se conoce bien desde el bombardeo de Hiroshima y Nagasaki y la catástrofe de Chernobyl. Podría ocurrir en el caso de una tormenta solar intensa en la dirección de la aeronave. La exposición prolongada a una radiación excesiva se asocia a un mayor riesgo de cáncer, aterosclerosis, cataratas y deterioro cognitivo precoces⁵.

Las agencias espaciales han fijado un límite máximo para la exposición de los astronautas en 10 años de servicio. Según la edad y el sexo es de alrededor de 1 Sv (Sivert es la unidad de medida para cuantificar la radiación absorbida por el cuerpo humano). Como muestra, la dosis media que recibimos las personas durante cada año en la Tierra es de 2,4-3,6 mSv. Los datos de las aeronaves Odyssey y Curiosity confirmaron la existencia de múltiples tormentas solares y la presencia continua de los rayos cósmicos, ambas como fuentes de radiación. Un viaje de ida y vuelta (sin tener en cuenta la estancia en Marte) de tan solo 360 días de duración supone una radiación media de 660 mSv, lo que sobrepasa claramente los límites de radiación al año marcados por las agencias espaciales y más si tenemos en cuenta que la duración más plausible del viaje sería de 2,5 años.

Por poner un ejemplo práctico, esta radiación equivaldría a 6600 radiografías de tórax o a 86 TAC abdominales. En conclusión, la radiación supone un problema de salud limitante en este momento para los viajes a Marte, que necesitarían aeronaves resistentes a la radiación y refugios antiprotones para el tiempo que los astronautas estén en la superficie del planeta rojo. El problema del blindaje de las aeronaves, por ejemplo, no está resuelto. Los rayos cósmicos, los más peligrosos, no se pueden parar con las tecnologías desarrolladas hasta ahora; de hecho, se da la paradoja de que si se aumenta el grosor del blindaje se reduce la dosis, pero si se sigue engrosando, la dosis se incrementa por efecto de la cascada de partículas secundarias generadas al chocar los rayos más energéticos^{6,7}.

Efectos de la falta de gravedad prolongada sobre el cuerpo humano

Los riesgos sobre la salud de los tripulantes en las misiones espaciales se relacionan con la duración y la trayectoria del vuelo. En los vuelos cortos (suborbitales, en la órbita terrestre baja o incluso lunares) los síntomas son bien conocidos e incluyen, fundamentalmente: ansiedad, trastornos vestibulares, cefalea o dolor de espalda⁸.

Estas alteraciones, muy dependientes del "ambiente" en los vuelos cortos, persistirían en el despegue de los vuelos a Marte, pero en un trayecto de tan larga duración los efectos de la falta de gravedad prolongada serían los más importantes a tener en cuenta y se revisan a continuación. Se dispone de resultados novedosos proceden-

tes de estudios en humanos en situaciones de ausencia de gravedad en nuestro planeta y sobre todo de estancias prolongadas en la EEI, pero son datos de series pequeñas de casos y que no superan un año en situación de falta de gravedad.

Sistema nervioso

En una cohorte de 34 astronautas (18 participantes en vuelos de larga duración) y en sujetos sometidos a condiciones experimentales que intentan remedar la ausencia prolongada de gravedad se practicaron RM cerebral de 3 teslas, antes y después de la falta de gravedad. Los neurorradiólogos ciegos respecto a la muestra, detectaron múltiples cambios estructurales en el sistema nervioso central.

En un 59% de los astronautas se objetivó un estrechamiento del surco central, en un 21% una reducción de la cisterna supraventricular y en un 15% un estrechamiento del surco calcarino. El hallazgo más llamativo en estos estudios fue el desplazamiento ascendente del encéfalo y tronco del encéfalo en la mayoría de los participantes en vuelos de larga duración, con estrechamiento de los espacios cefalorraquídeos a nivel del vértice craneal, rotación del acueducto de Silvio, aumento del tamaño de la glándula pituitaria y un ascenso del quiasma óptico en un 33%⁹.

El 70% de los astronautas aquejan cefalea y borrosidad visual¹⁰. Aproximadamente la mitad de los astronautas en misiones de larga duración en la EEI cumplen criterios de lo que se conoce como síndrome neuro-ocular asociado al viaje espacial, caracterizado por: edema de papila bilateral, hipermetropía con aplanamiento de la zona posterior del globo ocular, aparición de pliegues coroideos, edema macular uni o bilateral e isquemias retinianas "en bola de algodón"^{11,12}.

La microgravedad continuada condiciona un desplazamiento cefálico del líquido cefalorraquídeo y del parénquima cerebral, lo que, junto a otros factores como la elevada concentración de CO₂ y el efecto de la radiación espacial, da lugar a un aumento de la presión intracraneal, con alteración también del intercambio glinfático y la consiguiente repercusión en el globo ocular⁹.

El ejercicio físico intensivo, necesario para conservar el tono muscular y la masa ósea, podría paradójicamente facilitar el desarrollo del síndrome neuro-ocular, ya que reduce la presión intraocular y aumenta la intracraneal.

El síndrome neuro-ocular desaparece una media de 3 meses después del aterrizaje, salvo la hipermetropía que puede tardar 6 meses en revertir¹⁰⁻¹². Los síntomas y signos son similares a los que acontecen en el pseudotumor cerebri o hipertensión intracraneal idiopática y a nadie se le escapa que estos síntomas pueden afectar a la capacidad de conducción de un vehículo espacial y más teniendo en cuenta los tiempos de viaje tan prolongados¹³.

Por ello se están llevando a cabo investigaciones para intentar contrarrestar este síndrome. Van encaminadas a reducir el gradiente de presión encéfalo-ojo, como el uso de gafas que aumentan la presión intraocular.

Corazón

La capacidad de producir daño cardíaco por la radiación inherente a los viajes espaciales prolongados, se deduce de las secuelas que la radioterapia para tratamiento oncológico provoca sobre el corazón: pericarditis, miocardiopatía, alteraciones valvulares y aterosclerosis local acelerada^{14,15}.

La ausencia prolongada de gravedad, per sé, también es capaz de inducir alteraciones cardíacas. En astronautas de vuelos de larga duración se han descrito disminución del volumen ventricular, del gasto cardíaco y atrofia miocárdica, cambios que se asemejan al declinar de la función cardíaca con la edad. Se han puesto en relación, entre otros factores, con el daño mitocondrial por la ausencia de gravedad y se ha visto que no son totalmente reversibles tras el aterrizaje¹⁶.

La complicación más estudiada, probablemente porque es la que más preocupa durante los vuelos, ha sido las arritmias¹⁷. Se han descrito fibrilación auricular y episodios de taquicardia ventricular durante los vuelos al espacio, a pesar de que los astronautas habían sido seleccionados más que cuidadosamente. Se sabe que, a su regreso a la tierra, los astronautas experimentan fibrilación auricular a edades claramente más tempranas, entre los 41 y 45 años, que el resto de la población, que lo hace habitualmente a partir de los 60 años^{18,19}. Al igual que ocurre en el encéfalo, se ha demostrado con estudios de RM cardíaca pre y post-misión, que la redistribución hemodinámica en situación de ausencia de gravedad produce ascenso de los fluidos corporales lo que genera la distensión de la aurícula izquierda¹⁶. En el electrocardiograma la duración de la onda P no se ve afectada, pero sí se ha observado un descenso en su amplitud. Estos cambios anatómicos, que revierten tras el aterrizaje, junto con situaciones descritas en los vuelos espaciales, tales como hipotasemia, edema miocárdico, disautonomía y estrés físico y mental, además de la afectación cardíaca por la radiación excesiva pueden desencadenar arritmias, algo que también ha de ser tenido en cuenta específicamente a la hora de planificar la asistencia médica en un vuelo de larga duración a Marte¹⁶⁻²⁰.

Microbioma intestinal

La composición del microbioma intestinal, tan importante para la salud corporal²¹ se ve afectada durante los vuelos espaciales debido a la continua exposición a factores tales como falta de gravedad, radiación espacial, alteración de los ritmos circadianos, privación del sueño, disminución de la ingesta y aislamiento prolongado, factores que se han agrupado con el nombre de exposoma espacial. Los cambios en la microbiota intestinal de los astronautas en vuelos prolongados, influyen en: a) la salud metabólica, con resistencia a la insulina; b) el sistema músculo-esquelético, contribuyendo decisivamente al daño muscular; c) en el sistema inmunológico y d) a través del eje intestino-cerebro en el estado cognitivo del individuo²¹⁻²³. No existe aún una dieta que satisfaga los requerimientos nutricionales tan demandantes de los astronautas y sea capaz de evitar los déficits de micro y macronutrientes y la disbiosis intestinal²³.

Los últimos estudios apuntan hacia el uso de dietas ricas en fibra con determinados probióticos, que permiten una correcta síntesis de los ácidos grasos de cadena corta, uno de los pilares fundamentales para la homeostasis del microbioma intestinal y, por tanto, para el resto del organismo^{23,24}. Son necesarios nuevos estudios cuyas conclusiones sean útiles, no solo para los viajes interplanetarios, sino también para comprender el efecto de la disbiosis a nivel terrestre.

Funciones inmunológicas

La afectación inmuno-hematológica en los vuelos espaciales es menos obvia que las alteraciones músculo-esqueléticas. La falta de gravedad obliga al cuerpo a una adaptación a nivel celular y molecular para intentar mantener la homeostasis. Se produce una elevación aproximadamente del 17% en el recuento celular de leucocitos, junto con un descenso aproximado del 10% de la masa eritrocitaria^{16,25}. Esta última se debe a un fenómeno de hemólisis documentado en astronautas que han permanecido periodos de tiempo prolongado en la EEI^{26,27}.

A raíz de estos hallazgos, se ha estudiado el transcrito de los leucocitos antes, durante y después de los viajes espaciales prolongados. Se observó que 276 genes modularon su expresión genética, ya sea aumentando o disminuyendo; estos se distribuyeron en dos grupos en función de cómo se modificaba su expresión. Así, al grupo 1 pertenecían aquellos cuya expresión disminuía durante el viaje espacial y aumentaba en el regreso a la gravedad terrestre, y al grupo 2, a la inversa. Se ha visto que estos cambios persisten un año después del aterrizaje. Los genes del grupo 1 están relacionados con la regulación del sistema inmune, desarrollo de los órganos linfoides y la activación de leucocitos, mientras que los del grupo 2 intervienen como factores de transcripción de unión al ADN y en la regulación de los niveles de fluidos corporales²⁵. Sumado a lo citado en los párrafos de arriba, también se ha objetivado una disminución de un gen relacionado con el complejo inmunitario CD3 presente en linfocitos T y que interviene en el reconocimiento de antígenos, así como del gen responsable de codificar proteínas conocida como dedos de zinc, que permiten fijar objetivos virales y eliminarlos²⁵.

En síntesis, durante los viajes espaciales prolongados el organismo entra en un estado de inmunodepresión, lo que se ha correlacionado con reactivación de infecciones latentes o con mayor posibilidad de adquirir infecciones. Se ha demostrado reactivación de las infecciones por virus herpes²⁸ y se ha visto que la reactivación puede no ceñirse a zonas pequeñas de piel y mucosas, sino que puede ser más extensa y afectar a múltiples órganos, causando fallo multiorgánico o dejar como secuelas permanentes pérdida de la visión y/o audición²⁸. Además, hay un aumento de la colonización, y de su virulencia, de bacterias tales como *Pseudomonas*, *Staphylococcus aureus* y *Enterobacteriaceae*²⁹. Dado que la duración del vuelo a Marte supera con creces la de los viajes más prolongados a la EEI, ese estado de inmunosupresión podría asociarse, al

menos teóricamente, con la reactivación de infecciones latentes como el virus JC y su temida leucoencefalopatía multifocal progresiva.

Sistema osteo-muscular

Las repercusiones de la ausencia de gravedad en el sistema osteo-muscular se conocen desde los primeros vuelos espaciales hace más de 50 años⁸, por lo que, a pesar de ser las más constantes, no ocupan un papel estelar en esta revisión, centrada en los últimos hallazgos.

La gravedad terrestre supone el principal estímulo para el mantenimiento y homeostasis de la densidad mineral y ósea; de ahí la pérdida de masa ósea en los viajes espaciales⁸. Estudios de imagen recientes han demostrado que la pérdida de densidad ósea estaba en relación con la duración del vuelo. Así, en las misiones de "larga" duración (>6 meses) la pérdida era mayor, se correlacionaba con elevación de los marcadores de reabsorción ósea y con reducción de los de formación ósea. El defecto persistía, al menos parcialmente, un año después del aterrizaje, lo que se ha propuesto podría traducirse en una osteoporosis acelerada. Estos cambios son menos acusados en miembros superiores, que los astronautas usan continuamente para impulsarse en las naves, y en aquellos astronautas que hicieron un alto nivel de ejercicio intravuelo, por lo que serían parcialmente tratables introduciendo ejercicio de alto impacto y carga dinámica. En este momento están en marcha estudios con fármacos, como el alendronato, en un intento de prevenir o amortiguar estos fenómenos de osteoporosis acelerada³⁰⁻³².

Algo similar ocurre con el aparato muscular. La amiotrofia desencadenada por la falta de gravedad es un problema, ya que los astronautas necesitan utilizar la fuerza muscular en misiones espaciales. El ejercicio físico, incluso de varias horas al día, es claramente insuficiente

como prevención o tratamiento⁸. La amiotrofia es, además, uno de los marcadores funcionales más objetivos y se asocia a peor pronóstico de cualquier enfermedad y a un aumento de la mortalidad, lo que es importante no solo para las patologías intravuelo, sino tras el aterrizaje³³. A diferencia de la osteoporosis, no disponemos de terapias capaces de revertir la atrofia muscular. Se han ensayado, en modelos preclínicos los anticuerpos frente a la miostatina, para evitar la amiotrofia en situaciones de ausencia de gravedad prolongada³⁴.

Telómeros

Los telómeros son repeticiones en tándem de ADN que aseguran la estabilidad e integridad genómica. Se relacionan íntimamente con los procesos de división y senescencia. El envejecimiento y cada ciclo de división celular son los principales responsables del acortamiento telomérico fisiológico, en el que influyen otros factores como el estrés, la baja actividad física, la obesidad, los hábitos tóxicos o varias enfermedades que se asocian con mortalidad precoz³⁵⁻³⁷. Tanto la radiación como la ausencia de gravedad espacial son factores que podrían modificar la dinámica de los telómeros con la consiguiente posibilidad de mortalidad precoz, por lo que su estudio ha estado en el punto de mira de las misiones espaciales³⁸. Sorprendentemente, se ha encontrado un aumento en la longitud de los telómeros (algo teóricamente positivo) durante las misiones espaciales, si bien tras el aterrizaje la longitud telomérica no solo no volvió a su estado basal, sino que se acortó con respecto a la longitud prevuelo. Estos datos se han confirmado en el NASA Twins Study en el que los telómeros de Scott Kelly estaban aumentados en longitud a su llegada a la tierra, pero inmediatamente se acortaron con respecto a su longitud prevuelo y con respecto a los de su gemelo monocigoto idéntico

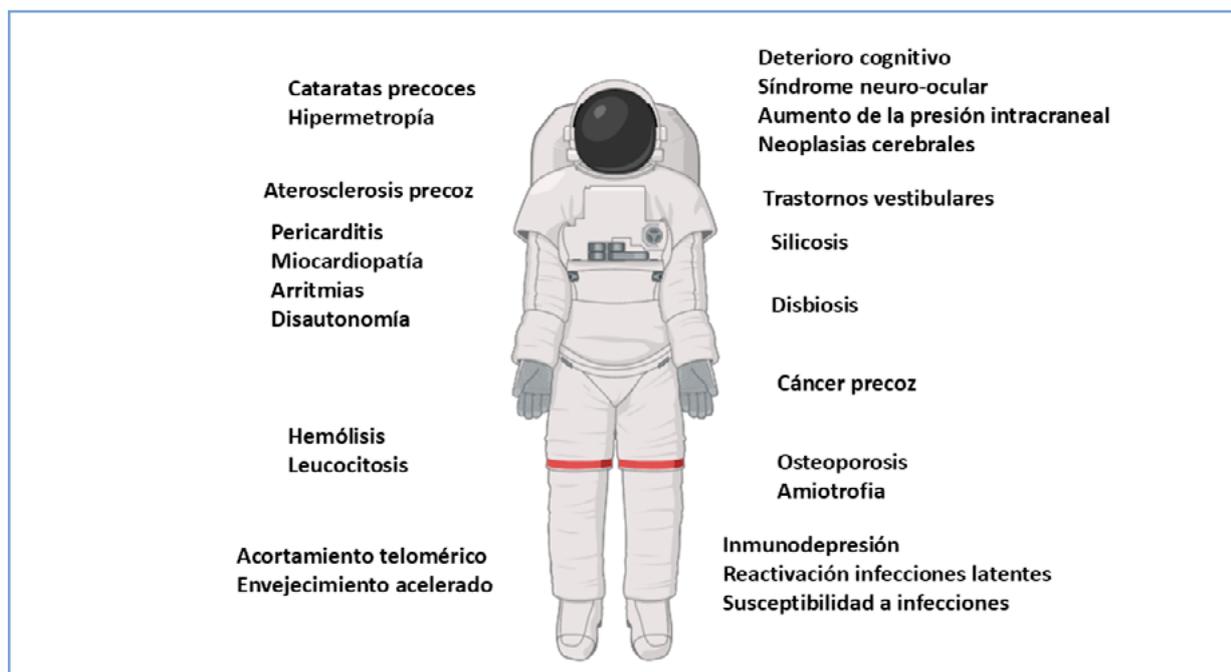


Figura 2. Esquema de las principales repercusiones del exposoma espacial en el organismo humano durante un viaje a Marte.

Mark, también astronauta, que se había quedado en tierra como control durante el año que duró la misión³⁹. Se desconocen las consecuencias clínicas que puedan tener estas alteraciones dado el bajo tamaño de la muestra de estos estudios, pero el acortamiento telomérico podría predisponer, teóricamente, a una reducción de la esperanza de vida y más teniendo en cuenta que la duración teórica de un viaje a Marte casi triplica la experiencia de los gemelos Kelly.

Incógnitas

Restan muchas incógnitas acerca de los riesgos potenciales de un viaje a Marte, que por la extensión de un artículo de estas características o por el casi desconocimiento actual no se han revisado aquí. Entre ellas, los efectos (dejando aparte los telómeros) del exposoma espacial en nuestro ADN o en la conectividad cerebral.

Sin necesidad de invocar la radiación, la misma falta de gravedad induce una división celular atípica y aberrante y también alteraciones en el secretoma. Por poner un único ejemplo, éstas se traducen en el aumento de osteonectina, una glicoproteína de la matriz extracelular clave en el desarrollo de neoplasias cerebrales⁴⁰. El conocimiento de la influencia de la ausencia de gravedad sobre la neuroplasticidad de las conexiones cerebrales es limitado, pero preocupante. En situaciones de ausencia de gravedad prolongada, la conectividad disminuye en áreas como el córtex cingulado posterior, implicado en el mantenimiento de la alerta o la detección de cambios en el ambiente, en el tálamo, fundamental en la memoria, atención o toma de decisiones, o en la corteza insular, implicada en la generación adecuada de respuestas motoras y autonómicas. En otras áreas, como el giro angular derecho, implicado en la percepción de aferencias sensoriales, se ha observado un aumento de la conectividad.

En la mayoría de los casos, estos cambios en la conectividad persistieron 8 meses después del aterrizaje, por lo que han de ser tenidos en cuenta en misiones de duración aun más larga y sobre todo con momentos de máxima exigencia, como puede ser el aterrizaje en Marte^{41,42}. No hemos mencionado los riesgos para el organismo tras poner el pie en Marte. Ese planeta está cubierto de un manto de polvo capaz de obstruir y dañar los trajes espaciales. Contiene peróxido de hidrógeno, capaz de desgastar y resquebrajar los sellados del equipamiento espacial. Además abunda en partículas de cuarzo, altamente peligrosas en caso de inhalación por el riesgo de silicosis. Todo ello obligaría a llevar doble traje o a limpiar los trajes antes de quitárselos y entrar en los refugios. Sumado a esto, existe la posibilidad de que existan microorganismos en Marte, por lo que se están desarrollando sistemas específicos de bioaislamiento en la Tierra, algo ya conseguido para las misiones robóticas, pero no para las humanas^{3,29}. Para terminar, hemos de tener en cuenta que el conocimiento de los efectos sobre el cuerpo humano de la ausencia de gravedad no solo es limitado por la duración de las misiones actuales, todavía corta en comparación con la de un viaje a Marte, sino que es sesgado, al incluirse en estos viajes a astronautas con

un estado de salud, edad, carga genética y preparación predeterminados y excelentes.

Conclusiones

Es técnicamente posible realizar un viaje a Marte, si lo analizamos desde un punto de vista logístico. Sin embargo, las amenazas y los riesgos del viaje para la salud de la tripulación durante y después del vuelo a medio y largo plazo, así como la práctica ausencia de medidas preventivas eficaces frente al *exposoma* espacial, impiden que el viaje se haga realidad a corto plazo con mínimas garantías de seguridad. Son necesarias, por tanto, nuevas investigaciones encaminadas a aclarar las consecuencias médicas reales intra y postvuelo de un viaje de estas características, así como las medidas preventivas necesarias si realmente la humanidad quiere poner un pie en Marte. Sin duda, estas investigaciones no solo harán posible la llegada a Marte, sino que proporcionarán conocimientos para las enfermedades que se padecen en la Tierra.

Bibliografía

1. Smith MG, Kelley M, Basner M. A brief history of spaceflight from 1961 to 2020: An analysis of missions and astronaut demographics. *Acta Astronaut* 2020;175:290-9.
2. Meeus J. When was Mars last this close? *Planetarian* 2023; 12-13. Disponible en <https://spider.seds.org/spider/Mars/Add/whenwasmarsclose.pdf>
3. Musser G, Alpert M. How to go to Mars. *Sci Am* 2000; 282:44-51.
4. Bagshaw M. Cosmic radiation in commercial aviation. *Travel Med Infect Dis* 2008; 6: 127-127.
5. Freese S, Reddy AP, Lehnhardt K. Radiation impacts on human health during spaceflight beyond low earth orbit. *Reach* 2014; 1: 191-198.
6. Narici L, Berger T, Matthiä D, Reitz G. Radiation measurements performed with active detectors relevant for human space exploration. *Front Oncol* 2015; 5. doi:10.3389/fonc.2015.00273.
7. Alwood JS, Ronca AE, Mains RC, Shelhamer MJ, Smith JD, Goodwing TJ. From bench to exploration medicine: NASA life sciences translation research for human exploration and habitation missions. *NPJ Microgravity* 2017; 3: 5. doi: 10.1038/s41526-016-0002-8.
8. Stepanek J, Blue RS, Parazynski S. Space medicine in the era of civilian spaceflight. *N Engl J Med* 2019; 380: 1053-1060.
9. Roberts DR, Albrecht MH, Collins HR, Asemani D, Chatterjee AR, Spampinato MV, et al. Effects of spaceflight on astronaut brain structure as indicated on MRI. *N Engl J Med* 2017;377:1746-1753.
10. van Oosterhout WPJ, Perenboom MJL, Terwindt GM, Ferrari MD, Vein AA. Frequency and clinical features of space headache experienced by astronauts during long-haul space flights. *Neurology* 2024;102:e209224. doi:10.1212/WNL.0000000000209224.

11. Vein AA, Koppen H, Haan J, Terwindt GM, Ferrari MD. Space headache: A new secondary headache. *Cephalalgia* 2009; 29: 683-686.
12. Mader TH, Gibson CR, Pass AF, Kramer LA, Lee AG, Fogarty J, et al. Optic disc edema, globe flattening, choroidal folds, and hyperopic shifts observed in astronauts after long-duration space flight. *Ophthalmology* 2011; 118: 2058-2069.
13. Lawley JS, Petersen LG, Howden EJ, Sarma S, Cornwall WK, Zhang R, et al. Effect of gravity and microgravity on intracranial pressure. *J Physiol* 2017; 595: 2115-2127.
14. Bhattacharya S, Asaithamby A. Ionizing radiation and heart risks. *Semin Cell Dev Biol* 2016; 58: 14-25.
15. Meerman M, Bracco Gartner TCL, Buikema JW, Wu SM, Siddiqi S, Bouten CVC, et al. Myocardial disease and long-distance space travel: solving the radiation problem. *Front Cardiovasc Med* 2021; 8: 631985. doi: 10.3389/fcvm.2021.631985.
16. Sy MR, Keefe JA, Sutton JP, Wehrens XHT. Cardiac function, structural, and electrical remodeling by microgravity exposure. *Am J Physiol* 2023; 324: 1-13. Vol.
17. Popovva OV, Rusanov VB. Is space flight arrhythmogenic? *Front Physiol* 2023; 14: 1162355. doi: 10.3389/fphys.2023.1162355.
18. Khine HW, Steding-Ehrenborg K, Hastings JL, Kowal J, Daniels JD, Page RL, et al. Effects of prolonged spaceflight on atrial size, atrial electrophysiology, and risk of atrial fibrillation. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2018; 11: e005959. doi: 10.1161/CIRCEP.117.005959.
19. Anzai T, Frey MA, Nogami A. Cardiac arrhythmias during long-duration spaceflights. *J Arrhythmia* 2014; 30: 139-149.
20. Mair DB, Tsui JH, Higashi Ty, Koenig P, Dong Z, Chen JF, et al. *PNAS* 2024; 121:40:e2404644121. doi: 10.1073/pnas.2404644121.
21. de Vos WM, Tilg H, Van Hul M, Cani PD. Gut microbiome and health: mechanistic insights. *Gut* 2022; 71: 1020-1032.
22. Tesei D, Jewczynko A, Lynch A, Urbaniak C. Understanding the complexities and changes of the astronaut microbiome for successful long-duration space missions. *Life* 2022; 12: 495. doi: 10.3390/life12040495.
23. Turrone S, Magnani M, KC P, Lesnik P, Vidal H, Heer M. Gut microbiome and space travelers' health: state of the art and possible pro/prebiotic strategies for long-term space missions. *Front Physiol* 2020; 11: 553929. doi: 10.3389/fphys.2020.553929.
24. Etlin S, Rose J, Bielski L, Walter C, Kleinman AS, Masn CE. The human microbiome in space: parallels between Earth-based dysbiosis, implications for long-duration spaceflight, and possible mitigation strategies. *Clin Microbiol Rev* 2024; 37: e0016322. doi: 10.1128/cmr.00163-22.
25. Stratis D, Trudel G, Rocheleau L, Pelchat M, Laneuville O. The transcriptome response of astronaut leukocytes to long missions aboard the International Space Station reveals immune modulation. *Front Immunol.* 2023;14: 1171103. doi: 10.3389/fimmu.2023.1171103.
26. Trudel G, Shahin N, Ramsay T, Laneuville O, Louati H. Hemolysis contributes to anemia during long-duration space flight. *Nat Med* 2022; 28: 59-62.
27. Rooney B V., Crucian BE, Pierson DL, Laudenslager ML, Mehta SK. Herpes virus reactivation in astronauts during spaceflight and its application on earth. *Front Microbiol* 2019; 10: 16. doi: 10.3389/fmicb.2019.00016.
28. Dunn C, Boyd M, Orengo I. Dermatologic manifestations in spaceflight: A review. Vol. 24, *Dermatol Online J* 2018; 24: 13030/qt9dw087tt.
29. Weinstein R, Mermel LA. Infection prevention and control during prolonged human space travel. *Clin Infect Dis* 2013; 56: 123-130.
30. Stavnichuk M, Mikolajewicz N, Corlett T, Morris M, Komarova SV. A systematic review and meta-analysis of bone loss in space travelers. *NPJ Microgravity* 2020; 6: 13. doi: 10.1038/s41526-020-0103-2.
31. Gabel L, Liphardt AM, Hulme PA, Heer M, Zwart SR, Sibonga JD, et al. Incomplete recovery of bone strength and trabecular microarchitecture at the distal tibia 1 year after return from long duration spaceflight. *Sci Rep* 2022; 12: 9446. doi: 10.1038/s41598-022-13461-1.
32. LeBlanc A, Schneider V, Shackelford L, West S, Oganov V, Bakulin A, et al. Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight. *J Musculoskelet Neuronal Interact* 2000; 1: 157-160.
33. Legrand D, Vaes B, Mathei C, Adriaensen W, Van Pottelbergh G, Degryse J. Muscle strength and physical performance as predictors of mortality, hospitalization, and disability in the oldest old. *J Am Geriatr Soc* 2014; 62: 1030-1038.
34. Smith RC, Cramer MS, Mitchell PJ, Lucchesi J, Ortega AM, Livingston EW, et al. Inhibition of myostatin prevents microgravity-induced loss of skeletal muscle mass and strength. *PLoS One* 2020; 15: e0230818. doi: 10.1371/journal.pone.0230818.
35. Turner K, Vasu V, Griffin D. Telomere Biology and Human Phenotype. *Telomere biology and human phenotype.* *Cells* 2019; 8: 73. doi: 10.3390/cells8010073.
36. Liu J, Wang L, Wang Z, Liu JP. Roles of telomere biology in cell senescence, replicative and chronological ageing. *Cells* 2019; 8: 54. doi: 10.3390/cells8010054.
37. Kalmykova A. Telomere checkpoint in development and aging. *Int J Mol Sci* 2023; 24: 15979. doi: 10.3390/ijms242115979.
38. Luxton JJ, McKenna MJ, Taylor LE, George KA, Zwart SR, Crucian BE, et al. Temporal telomere and DNA damage responses in the space radiation environment. *Cell Rep* 2020; 33: 108457. doi: 10.1016/j.celrep.2020.108457.
39. Garrett-Bakelman FE, Darshi M, Green SJ, Gur RC, Lin L, Macias BR, et al. The NASA Twins Study: A multidimensional analysis of a year-long human spaceflight. *Science* 2019; 364: eaau8650. doi: 10.1126/science.aau8650.

40. Shaka S, Carpo N, Tran V, Cepeda C, Espinosa-Jeffrey A. Space microgravity alters neural stem cell division: Implications for brain cancer research on Earth and in space. *Int J Mol Sci* 2022; 23: 14320. doi: 10.3390/ijms232214320.
41. Jillings S, Pechenkova E, Tomilovskaya E, Rukavishnikov I, Jeurissen B, Van Ombergen A, et al. Prolonged microgravity induces reversible and persistent changes on human cerebral connectivity. *Commun Biol* 2023; 6: 46. doi: 10.1038/s42003-022-04382-w.
42. Van Ombergen A, Laureys S, Sunaert S, Tomilovskaya E, Parizel PM, Wuyts FL. Spaceflight-induced neuroplasticity in humans as measured by MRI: What do we know so far? *NPJ Microgravity* 2017; 3: 2. doi: 10.1038/s41526-016-0010-8.