

## RIESGOS DE SER UN ASTRONAUTA: HÉROES DEL ESPACIO

Flor de María Muñoz Gallego<sup>1</sup>, María Virginia Pinzón Fernández<sup>2</sup>, Luisa Fernanda Zúñiga Cerón<sup>3</sup>,  
Luisa Fernanda Mahecha Virgüez<sup>4</sup>, Jhan Sebastián Saavedra-Torres<sup>5</sup>

### Resumen

**Objetivo:** Realizar una revisión documental acerca de los riesgos, complicaciones y cambios fisiológicos que experimentan los astronautas bajo la ausencia de gravedad y exposición a dosis de radiación cósmica. **Metodología:** Se desarrolló una revisión bibliográfica de cada referencia entre un margen de tiempo de 38 años, entre 1980 y 2018, con el fin de analizar la evidencia actual validada que abordan los estudios sobre los riesgos, complicaciones y cambios fisiológicos que experimentan los astronautas en los viajes espaciales, y sus implicaciones clínicas y biológicas. De ese modo, se recolectó un total de 821 bibliografías, de las cuales se lograron tamizar y referenciar 85 bibliografías, a partir de la búsqueda bibliográfica en la base de datos oficial de la NASA: NTRS - NASA Technical Reports Server (<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp>); La búsqueda se limitó a la revisión de artículos originales, informes de la agencia espacial, libros de medicina aeroespacial, resúmenes de ponencias y experimentos publicados en el idioma inglés por parte de la NASA; no se usaron los términos MeSH porque la base de datos oficial de la NASA permite el análisis detallado por temas, sin ingresar fórmulas o términos de búsqueda de sus propios estudios. Para la gestión y la organización de la información, se utilizó el programa de libre acceso Mendeley. **Resultados y conclusión:** Los estudios describen que la exposición a la radiación ionizante y a la falta de gravedad en los astronautas, son factores de riesgos determinantes para padecer enfermedades y cambios fisiológicos de importancia, antes y después de una misión espacial de larga duración. Sin embargo, las agencias espaciales reducen todos los riesgos con entrenamientos, herramientas tecnológicas, análisis clínicos y genealógicos de los tripulantes de una misión interplanetaria.

**Palabras clave:** *Astronautas; sistema cardiovascular; cáncer; osteoporosis; enfermedades espaciales; alteraciones de conducta; evaluación de riesgos; vuelo espacial; programas espaciales.*

- 1 Licenciada en Biología. M.Sc. Fisióloga. Profesora Asociada, Departamento de Ciencias Fisiológicas, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia.
- 2 Bacterióloga. Esp. Educación. Maestría en Salud Pública. Candidata a doctorado en Antropología médica. Profesora titular de la Universidad del Cauca. Popayán, Colombia.
- 3 Médica Interna. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Medicina. Corporación Del Laboratorio al Campo (DLC). Grupo de Investigación en Salud (GIS). Popayán, Colombia.
- 4 Enfermera Profesional. Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias de la Salud, Departamento de Enfermería. Grupo de Investigación en Salud (GIS). Popayán, Colombia.
- 5 Médico Interno. Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias de la Salud, Departamento de Medicina Interna. Corporación Del Laboratorio al Campo (DLC). Grupo de Investigación en Salud (GIS). Popayán, Colombia.

## RISKS OF BEING AN ASTRONAUTS: HEROES OF SPACE

### Abstract

**Objective:** To perform an article of documentary review, about risks, complications and physiological changes that is experiencing the astronauts in the absence of gravity and exposure to doses of cosmic radiation. **Methodology:** A bibliographical review developed in a margin of time of 38 years, between 1980 and 2018, with the target to analyze the validated current evidence that the studies tackle on you risks, complications and physiological changes that it experiences the astronauts in the spatial trips, and its clinical and biological implications. This way, there was gathered a whole of 821 bibliographies, of which they managed to sift and index 85 bibliographies, from the bibliographical search in the official database of the NASA: NTRS - NASA Technical Reports Server (<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp>); The search was limited to the review of original articles, reports of the space agency, medical books aerospace, abstracts of papers and experiments published in the English language by NASA. The terms MeSH were not used, because the official database of the NASA allows the analysis detailed by topics, without entering you formulate or terms of search of your own studies. For the management and the organization of the information, there was used the program of free access Mendeley. **Results and conclusion:** The studies describe that exposure to ionizing radiation and the lack of seriousness in astronauts, are risk factors determinants for disease and physiological changes of importance, before and after a space mission of long duration. However, space agencies all reduce the risks with trainings, technological tools and clinical analysis and genealogy of the crew of an interplanetary mission.

**Key words:** *Astronauts; cardiovascular system; cancer; Osteoporosis; diseases space; alterations of conduct; Risk assessment; space flight space programs.*

### Introducción

Este artículo corresponde a una revisión documental que tiene como propósito principal dar a conocer los riesgos fisiológicos que pueden presentar los astronautas en sus viajes interplanetarios, así como también reconocer la importancia de su resiliencia durante los entrenamientos para ser los caminantes del espacio; la base de datos de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) describe los riesgos con base en sus estudios. Es por ello que la Universidad del Cauca y el Grupo de Investigación en Salud (GIS) de la Facultad de Ciencias de la Salud, integrada al Departamento de Medicina Interna, presenta este breve

texto para dar a conocer a la comunidad en general, el reto de comprender y adaptar un cuerpo humano a los desafíos de un viaje espacial.

La National Aeronautics and Space Administration (NASA), es una de las entidades más grandes de investigación en el planeta. Actualmente cuenta con muchos retos a nivel de ingeniería y medicina aeroespacial y, cuando se revisa la evidencia que reportan los estudios de la NASA y universidades asociadas acerca del riesgo de padecer cáncer durante y después del vuelo espacial de un astronauta, los retos aumentan.

Existe un sinnúmero de informes registrados y disponibles en sitios oficiales de la NASA respecto a las misiones de exploración espacial y los riesgos que éstas conllevan para la Salud humana en los astronautas con un alto rendimiento. Algunos factores de riesgo y cambios fisiológicos en un viaje espacial, se abordan en el presente trabajo; entre ellos, a nivel: Osteoartromuscular, Cardiovascular, Neurológico, Psicológico y comportamental y, por último, Oncológico.

Si hablamos del espacio, pensamos inmediatamente en el mar de posibilidades que tiene el hombre en cuanto a descubrimientos, pero muy pocos conocen o logran reconocer los riesgos y desafíos que afrontan los astronautas al estar fuera de la tierra (1).

Cuando el presidente John F. Kennedy declaró, en 1962, que los Estados Unidos de América lograría ir a la luna, no tenía idea de lo difícil que sería explorar el universo; no imaginó que el solo hecho de levantar toneladas de instrumentos, combustible y herramientas para viajar a otro planeta, sería un riesgo a gran escala. Sin embargo, el éxito del aterrizaje lunar del Apolo 11 y las misiones tripuladas subsiguientes, inspiraron a los exploradores espaciales a querer conocer más del universo y contemplar la idea de llegar al planeta Marte (2).

Se conocen y desconocen muchos de los riesgos fisiológicos de un viaje interplanetario; no obstante, los científicos tienen claro que hay riesgos patentes como: alteraciones celulares por la radiación cósmica, alteraciones en el comportamiento, alteraciones fisiológicas por la falta de gravedad, riesgos de cáncer, enfermedades cardiovasculares y osteoporosis, lo que convierte un viaje espacial en un gran reto (2).

### **Alteración osteomuscular**

Uno de los riesgos de salud que experimenta un astronauta, es sufrir cambios a nivel muscular y óseo;

en los largos y cortos viajes en el espacio, pueden presentar una acentuada atonía y atrofia muscular, con disminución en la síntesis de proteínas constitutivas del músculo. De igual forma, se ha evidenciado que un viajero espacial retorna a la tierra con una estatura o talla mayor; esto es cierto porque se ensancha el disco intervertebral por ganancia de agua, lo que condiciona un incremento de la estatura de 5 a 7 cm, al tiempo que genera dolor bajo de espalda y predispone así, algunos cambios comportamentales de irritabilidad (3,4).

La agencia espacial ha evaluado la expresión genética a nivel intramuscular, buscando posibles afectaciones mediante el uso de métodos de microarrays de ADN; en ratones de laboratorio investigados y enviados en un vuelo espacial de 17 días de duración, el estudio los sacrificó 24 horas después de regresar al planeta Tierra. Teniendo el mismo número de ratones control en la base de investigación terrestre de la NASA, en jaulas que simulaban las condiciones físicas del vuelo, encontraron como resultados, que el estar en un vuelo espacial induce la pérdida de un 19% a 23% de la masa muscular respectivamente, en comparación con los controles terrestres (5).

Con técnicas de biología celular y molecular, encontraron evidencia de que existe una inhibición de los genes para la proliferación celular y las cascadas de factores de crecimiento, incluidos los genes del ciclo celular y las proteínas de transducción de señales, como p21, Cip1, retinoblastoma (Rb), y diversas rutas de participación de ciclinas (5). Estos datos indican que luego de la exposición a la microgravedad, existe una regulación a la baja de los genes involucrados en la regulación de la replicación de las células musculares (6,7).

Mientras, en los viajeros espaciales y ratones de experimentación se ve la atrofia muscular más evidente en las extremidades inferiores, en los seres humanos el volumen de estas porciones llega a disminuir hasta un

30 o 35% de su volumen, lo que contribuye a la movilización de los líquidos hacia las partes superiores del cuerpo (7, 8, 9).

A nivel óseo, se presenta una rápida descalcificación de aproximadamente el 1% por mes, en el fémur, la pelvis y la columna vertebral. Ello incrementa el riesgo de fracturas y desarrollo de cálculos renales (8,9); esta es la parte del organismo que sufre con mayor intensidad los efectos de la gravedad cero. Se ha observado que el calcio se moviliza de los huesos hacia la sangre y de ahí al exterior a través de la orina; se pierde mensualmente en promedio de 1 a 1,5% del calcio de los huesos, con mayor intensidad en los huesos de la columna, la pelvis y las extremidades inferiores, que son los que resisten el peso del cuerpo (8, 9, 10).

Se puede ver que la rápida descalcificación produce un mayor aumento en la frecuencia de padecer litiasis renal, debido al aumento en la eliminación de calcio a través de la orina; sumando y desarrollándose con infecciones bacterianas que aumentan su patogenicidad, creando resistencia a los antibióticos y deteriorando con el tiempo el sistema inmune al estar expuesto a la radiación y al estrés celular (3,10).

El problema de la descalcificación del esqueleto durante la estancia en el espacio, no se ha resuelto hasta ahora, pero se trabaja intensamente para modificar el metabolismo del calcio en ausencia de gravedad (3,10).

El esqueleto no solo se adapta a la ingravidez, sino que también está influenciado por numerosos factores de riesgo inducidos por las restricciones operativas; entre ellos pueden mencionarse: la incapacidad de mantener las actividades aeróbicas y de soporte de su mismo peso, una dieta sub óptima (por ejemplo, alto contenido de sodio para la estabilidad de los alimentos, falta de frutas y verduras frescas) y la supresión del metabolismo de la vitamina D, las cuales se suman a las complejidades de una misión (8).

La aparición temprana de osteoporosis en estados crónicos, aumenta durante viajes espaciales que tengan un tiempo de 4 a 6 meses, multiplicando la posibilidad de fractura de un astronauta (11,12). La osteoporosis de inicio precoz es, probablemente y a largo plazo, el riesgo más reconocido para un astronauta; el tratamiento que se ofrece en las investigaciones es principalmente profiláctico, y las intervenciones clínicas se basan en la capacidad de predecir las fracturas con monitoreo de la pérdida de calcio por la orina (10).

El estudio “The Digital Astronaut Project Computational Bone Remodeling Model (Beta Versión) Bone Summit Summary Report”, reportó en su programa de simulación computacional, que un astronauta sufre más pérdida de masa ósea, con posterioridad a un vuelo espacial y esto conlleva un pico máximo de no actividad compensatoria de formación y remodelación de los huesos largos. Las únicas herramientas que hasta el momento tienen los proyectos espaciales para prevenir en el astronauta la osteopenia y la fractura, son la alimentación apropiada y la actividad física (12).

## **Alteración cardiovascular en el espacio**

A nivel cardiovascular se desarrolla un estado de disautonomía, atrofia cardíaca, alteraciones iónicas en los sistemas de células cardíacas y cambios en la conducción cardíaca, que predispone al fenómeno de T alternante en el electrocardiograma; además, incrementa el riesgo de arritmias malignas y disminución en la densidad capilar, en especial en los músculos de las extremidades inferiores, alterando la redistribución sanguínea a nivel corporal (13, 14).

Según la evidencia científica en vuelos espaciales, la preparación física es fundamental, debido a que surgen cambios en el sistema cardiovascular reversibles a corto plazo e irreversibles a largo plazo, desarrollados por la exposición a velocidades extremas, fenómenos de desaceleración, aumentos de fuerza de gravedad y

estados de reposo sin gravedad en un viaje espacial de exploración y reconocimiento. Estos cambios incrementan el riesgo de padecer una enfermedad cardiovascular y se representan con la disminución de la distensibilidad de la arteria carótida interna y externa, la disminución de la masa ventricular del corazón, las alteraciones en las cifras tensionales y el aumento de procesos celulares y moleculares inflamatorios en las capas ateroscleróticas de las arterias cardiacas, tras la exposición a la radiación ionizante (13,15).

Aunque se reconoce la existencia de estas alteraciones, aún no se tiene claro cuánto es el tiempo de exposición mínima que puede tolerar un astronauta en el espacio, sin comprometer o llegar a estados irreversibles de cambios o fenómenos patológicos a nivel cardiovascular y de envejecimiento celular (13,14).

En una misión espacial que perdure más de 6 meses, el corazón se vuelve más pequeño y disminuye el volumen sanguíneo del 15 al 20% (3,17); según algunos estudios, la disminución en el tamaño se debe a la atrofia muscular generada por la ausencia de gravedad y el cambio en el volumen sanguíneo que este maneja (17, 18).

Existen además dos datos clínicos muy evidentes: las venas de la cara, el cuello y los antebrazos aparecen siempre dilatadas, y los pulsos arteriales de las extremidades inferiores disminuidos, al estar en ingravidez. Por último, en una investigación realizada recientemente en la Estación Espacial Internacional, se ha demostrado que durante la permanencia en el espacio, se produce un engrosamiento que va del 10 al 15% de las capas íntima y media de las arterias carótidas y femorales; este incremento de la pared de las arterias mencionadas, desaparece cuatro días después de regreso a estados gravitacionales normales, como en el caso del regreso al planeta Tierra (14, 17,18).

La asociación entre altas dosis de exposición a la radiación y daño cardiovascular, están bien establecidas

en los análisis de los estudios mundiales y comparaciones que hace la agencia espacial. Cuando se toman los datos de pacientes que se han sometido a radioterapia para los cánceres primarios de cabeza, cuello y regiones mediastínicas, se ha demostrado la existencia de mayor riesgo de daño cardíaco y vascular a largo plazo, inducida por la radiación en la Estación Espacial Internacional (15,18).

Por lo tanto, se sabe que los protocolos de seguridad de la NASA en la creación de trajes y naves, garantizan la capacidad de aislar en un mayor porcentaje la radiación a la que se expone el cuerpo humano en el espacio exterior, permitiendo la reducción de enfermedades cardiovasculares y oncológicas en los viajes espaciales (13, 14,16).

El traje antigraavedad consta de vejigas inflables en las piernas y el abdomen, y de prendas de enfriamiento líquido por las cuales circula agua enfriada termoelectricamente que se distribuye a través de una red de tubos que cubren el cuerpo. Estos trajes ofrecen protección cardiovascular transitoria mediante el apoyo a la presión arterial, limitando los aumentos en la frecuencia cardiaca. Sin embargo, está claro que aún no se ha logrado aislar totalmente la radiación a la que se expone un tripulante que sale fuera de la atmosfera a la Estación Espacial Internacional, a pesar de que la ingeniería no cesa en la búsqueda de métodos de protección para los astronautas. Con todo, es válido afirmar que los métodos actuales de protección de un astronauta son eficaces de acuerdo a los descubrimientos y avances que hoy se tienen, para reducir y proteger los cambios que sufre una célula en el espacio exterior (13, 16).

El Programa de Vigilancia de la Salud de los Astronautas en el Centro Espacial Johnson de la NASA, comparó una cohorte de astronautas, con un modelo de análisis de regresión logística para evaluar la asociación de la radiación espacial y la mortalidad por

enfermedad cardiovascular y oncológica. Dicho análisis no fue significativo, debido a que del grupo selecto de astronautas, solo un pequeño número se enfrenta realmente a las mismas condiciones del espacio, lo que hace incomparable cuando se evalúa el grupo de astronautas capacitados que nunca llega a exponerse a dichas condiciones en la Estación Espacial Internacional; aunque poseen criterios de selección al haber fallecido o sufrido enfermedades cardiovasculares y oncológicas, se necesitan más estudios para obtener datos con mayor afinidad a los cambios y riesgos que sufre el cuerpo al estar fuera del ecosistema terrestre (16- 19).

Por lo anterior, los datos obtenidos no son válidos para determinar si la radiación espacial crea un mayor número de padecimientos por cáncer o no, pero sí se puede ver el aumento de mortalidad por fenómenos cardiovasculares en todos los astronautas entrenados y expuestos en misiones a la Estación Espacial Internacional (17). El ajuste del estudio reporta que son 10 veces más altos los riesgos de padecer enfermedades cardiovasculares al ser astronauta (16-19).

El desacondicionamiento cardiovascular que se presenta en los vuelos espaciales incluye la disminución del volumen sanguíneo circulante, disminución de la presión arterial diastólica y disminución de la masa muscular del ventrículo izquierdo. Estas alteraciones dependen del tiempo de exposición a un ambiente de microgravedad y pueden ocasionar mareos, taquicardia, palpitaciones, o reducción de la capacidad de ejercicio. Las arritmias no se presentan habitualmente durante o después del vuelo (3, 16).

La manifestación más inmediata y molesta en un retorno a la Tierra, es la intolerancia ortostática posvuelo (PSOI; space-flight orthostatic intolerance). La intolerancia ortostática posvuelo es causada por perfusión insuficiente del cerebro y se presenta como síncope o presíncope (mareo, vértigo, sudoración, presión arterial sistólica por debajo de 70 mm Hg), aumentando

los riesgos de sufrir un evento adverso patológico en el sistema cardiovascular de un piloto espacial (3).

En uno de los proyectos que posee la NASA para evaluar las posibles alteraciones y riesgos cardiovasculares, tienen como modelo experimental a un gemelo que se quedará en la Tierra y otro que saldrá al espacio, ante ello, se genera una hipótesis primaria, debido a que el proyecto aún está en proceso de recolección de datos (20). La predicción de los investigadores, en la comparación del gemelo terrestre versus el gemelo que experimenta el viaje espacial, muestra que el estar fuera del ambiente terrestre aumentará los biomarcadores, demostrando que el estrés oxidativo y daño inflamatorio en la función arterial, es progresiva en el espacio exterior y consecuente al regresar a la tierra; las propiedades biofísicas del cuerpo para adaptarse y generar reparación a los daños tisulares, se verán reflejados en los aumentos de factores de riesgo de sufrir enfermedades cardiovasculares en edades avanzadas, que ya antes en los estudios previos de la Estación Espacial Internacional se han publicado (21).

## **Cambios psicológicos y de comportamiento durante un viaje espacial**

Para la NASA, la demencia espacial es otro de los grandes riesgos que sufre un astronauta; la demencia espacial se basa en el estrés y disfunción cognitiva secundaria a vivir en un ambiente cerrado y estrecho, con ruido y vibración constante, luz artificial y privación del sueño (25,26), lo que genera un sentimiento de soledad y aislamiento. Esto reitera que un viaje espacial es un reto con desafíos de proporciones inimaginables (27,28).

El desarrollo de un programa de medicina espacial integral, requiere de una infraestructura compleja, siempre buscando y resolviendo preguntas de investigación para lograr sostener con vida a los astronautas en el espacio, y sobreponiéndose a los riesgos. Es un logro

contar con la Estación Espacial Internacional porque se pueden hacer experimentos que resuelven las dudas de los científicos que desean seguir trabajando para conquistar el planeta Marte. A nivel clínico, los sistemas de alerta y seguridad de los astronautas han venido mejorando de manera significativa y exponencial (27), gracias a la experiencia obtenida de misiones previas, y también a los aportes derivados de la investigación, evitando que la fisiología del viajero no se descompense ante las variables que el espacio expone a las células (27,28).

Los expertos e investigadores, teniendo como base los conocimientos en el comportamiento humano, reconocen que los problemas y conflictos se pueden presentar en una misión espacial, por el hecho de que los astronautas son seres humanos con emociones y comportamientos que no excluyen la apatía y empatía entre grupos de personas. Sin importar cuán seleccionados y entrenados estén, las interacciones sociales pueden tener cambios y alteraciones comportamentales que predispongan a estrés en un viaje espacial (29,30).

Un informe de comparación que se desarrolló con los capacitados astronautas versus personas con una vida rutinaria, señala que una tasa de incidencia de problemas de comportamiento va para ambos grupos, desde un 3 al 13% por persona /año. El informe transpone estas cifras a grupos de 6 y 7 personas (31), que pueden considerarse capaces de desarrollar una misión espacial; esto no excluye que en el espacio exterior, entre la tripulación que viaja, no haya probabilidades significativas de sufrir un trastorno del comportamiento y problemas psiquiátricos emergentes por estrés y privación del sueño (32).

El programa de investigación humana de la NASA (HRP- Human Research Program), tiene como objetivo minimizar e identificar los impactos de los problemas de comportamiento de manera temprana para evitar riesgos en los viajes espaciales por medio de

tecnología de monitoreo médico. Para ello, ha creado programas pedagógicos entre astronautas a fin de evidenciar, desde la base terrestre, si hay cambios fisiológicos que indiquen deterioro en el rendimiento y estrés fisiológico no compensatorio (31).

El programa de investigación humana debe proporcionar las mejores medidas y herramientas para monitorear y evaluar el estado de ánimo y predecir el riesgo de un astronauta a nivel psicológico. Ello a fin de manejar las condiciones psiquiátricas y de comportamiento, antes, durante y después del vuelo espacial, que desaten una catástrofe y deterioro psíquico de un viajero espacial, lo que se demuestra bajo patrones de señales cerebrales y marcadores biológicos en aumento y que son específicos de indicación de estrés psicológico (31, 32, 34).

Para disminuir los problemas de estrés psicológico, se filtran a los astronautas, desde la evaluación clínica e histórica de predisposición familiar, con un mínimo de 3 generaciones atrás, que no tengan trastornos psicológicos y psiquiátricos de desarrollo endógeno o genético; esto con el objetivo de evitar el aumento de factores de riesgos psicológicos que lleven al fracaso de una misión espacial, al no contar con personal capacitado que pueda afrontar decisiones difíciles, sin alterar su comportamiento a estados de auto destrucción (31- 34).

La salud psicosocial de los astronautas ha sido una preocupación durante más de una década. Importantes estudios identificaron como requisito, abordar los factores humanos (emociones, necesidades psicológicas, sexuales, sociales) en la selección, entrenamiento y soporte para los vuelos espaciales (34,35).

Durante misiones prolongadas dentro de órbita, la provisión de apoyo en vuelo a los miembros de la tripulación, es una contramedida importante para estabilizar el estado emocional y asegurar un bienestar

óptimo (36), además de mantener un contacto cercano entre la tripulación y la Tierra. Para este propósito, se confía el avance tecnológico en métodos de comunicaciones entre espacio exterior y Tierra, que deben ser efectivos en las transmisiones de audio y video. La limitada atención médica o de asesoramiento en el sitio, enfatiza la necesidad de tener disponibilidad de una consulta precisa de telemedicina o telepsicología, en un viaje espacial de larga duración (3, 36).

Entre los riesgos de alteración comportamental en el espacio, se presentan los siguientes problemas: trastornos del ritmo circadiano, cambios de personalidad con emociones negativas y alteraciones fisiológicas que predisponen al estrés emocional. También se presentan complicaciones relacionadas con la falta de adaptación a la microgravedad, a las rutinas repetitivas y la dificultad para alimentarse en ausencia de gravedad. Se deben agregar y, sin dejar de lado la falta de autonomía en un espacio cerrado, los irritantes personales que se pueden presentar en el viaje y las alteraciones físicas que se ven reflejadas en el cuerpo de un astronauta al estar fuera de la Tierra -como en el caso de pérdida de la masa muscular, estiramiento de la columna vertebral, aumentos de presión arterial, atonía muscular, fatiga o monotonía. Igualmente, los factores culturales y organizativos, las cuestiones familiares e interpersonales con la conexión de factores ambientales y todos los riesgos mencionados, son las variables que pueden alterar una psiquis y llevar a una posible demencia espacial de la cual aún se desconocen exactamente sus causas (36).

La lista aumenta cuando se habla de factores de estrés en vuelos espaciales de larga duración, tales como: demanda de trabajo, eventos y retos impredecibles, aislamiento, falta de información o malas noticias de casa, lejanía, fenómeno de rompimiento, aburrimiento, tiempo libre prolongado (ociosidad), síndrome de adaptación espacial, condiciones adversas dentro de la cápsula (contaminación, ruido, temperaturas ele-

vadas, poder insuficiente, etc.). También se encuentran alteraciones de la fotoperiodicidad, fatiga y ritmo circadiano, cambio de turnos, preocupación psicológica por presencia de efectos adversos (radiación, cambios cardiovasculares, osteoartromuscular, endocrinos, inmunológicos y cognitivos), preocupación por falla en equipos, accidentes y rendimiento físico inadecuado (3).

Pero no todo es negativo, pues hay aspectos positivos en los vuelos espaciales que contribuyen a los resultados de propiciar una buena salud y comportamiento en los astronautas. Así por ejemplo, el trabajo en equipo, el dar y recibir apoyo social o las responsabilidades de liderazgo, continúan siendo benéficos para el desarrollo y la construcción, tanto del comportamiento estable como de la estructura psíquica de un astronauta (36).

La edad promedio de inicio de la depresión para las personas que no tienen antecedentes familiares, es de 41 años; por lo tanto, los astronautas que nunca han experimentado depresión, no son inmunes a su desarrollo. La edad de los candidatos para ser astronautas oscila, en su selección, entre los 26 y 46 años. En el período comprendido entre 1989 y 2003, la edad promedio de los astronautas que fueron seleccionados fue de 36,5 años. Es importante tener en cuenta que la depresión podría ocurrir en cualquier fase de la carrera y edad de un astronauta. Además, los reportes de 1985 emitidos por la agencia espacial, determinan que los problemas de comportamiento que ocurren durante el vuelo espacial, a menudo no terminan cuando la misión finaliza y pueden persistir con notables efectos al regresar al planeta (36).

El Manual Diagnóstico y Estadístico de trastornos mentales (DSM, por sus siglas en inglés) define un trastorno mental como: “Un síndrome caracterizado por una alteración clínicamente significativa en la cognición, regulación emocional o comportamiento de un

individuo que refleja una disfunción en los procesos psicológicos, biológicos o de desarrollo subyacentes”. Las condiciones agudas o crónicas que se presentan durante el vuelo espacial, pueden llevar al desarrollo de un trastorno psiquiátrico (36).

Por otra parte, los factores de estrés en el espacio exterior se experimentan simultáneamente, por lo que hay muchos factores de riesgo que pueden inducir cambios de comportamiento. Al volver al planeta Tierra, las modificaciones en el comportamiento se tornan positivas, los astronautas se vuelven muy animados y con sentimientos de solidaridad internacional; así mismo, desarrollan mayor simpatía por todos los pueblos y un compromiso de hacer cosas benéficas, así como preocupaciones por el destino de la humanidad. A ello se suma, que los seres humanos que han viajado al espacio exterior, adquieren la convicción de ser ciudadanos del mundo y que la Tierra es un solo hogar para toda la humanidad (36).

En vista de los hallazgos realizados en materia de comportamiento humano, se desarrolló un plan de investigación totalmente integrado para abordar tres factores de riesgo de alta prioridad que afectan la salud y el rendimiento de la tripulación; se cree que están relacionados de manera sinérgica: la radiación espacial (34), el aislamiento, y la exposición a la microgravedad en misiones de larga duración. Por lo tanto, los anteriores tres riesgos se combinaron en un enfoque integrado denominado “Plan de Investigación Integrada”, en el que se analizaron los efectos agudos en vuelo y que afectan al sistema nervioso central (38).

La falta de gravedad repercute notablemente en el sistema neurovestibular, el cual es regulador de la orientación y del equilibrio. Su disfunción genera los síntomas propios de la cinetosis espacial y afecta al 40 y 50% de los tripulantes. Su incidencia sería aún más elevada en los tripulantes, de no recurrir a la administración de medicación anticinetósica. A diferencia de

la cinetosis terrestre, la cinetosis espacial se caracteriza por los síntomas siguientes: malestar general, anorexia, letargia y cefalea. La actividad fuera del vehículo espacial no genera nuevos síntomas (3).

La evidencia indica que los factores estresantes incluyen la gravedad alterada, la pérdida de sueño por más de 18 horas fuera del rango de normalidad de un astronauta, la exposición a la radiación, el aislamiento y confinamiento (39). Todo esto puede llevar a la desregulación de la estructura del cerebro y su micro entorno, creando una función desequilibrada de las redes neuronales y gliales, sin olvidar la fisiopatología que se genera en neurovasculatura, debido a la falta de gravedad y la búsqueda de compensación de los líquidos del cuerpo (36).

La exposición a la microgravedad altera la distribución de los líquidos corporales y el grado de distensión de los vasos sanguíneos craneales; estos cambios pueden ocasionar remodelamiento estructural y modificar la autorregulación cerebral (3, 36,39). Los vuelos espaciales inducen cambios en el líquido cefalorraquídeo, lo cual puede ocasionar un aumento en la presión intracraneal (PIC), en la presión del líquido cerebroespinal, la presión intraocular (PIO) y también generar síndrome de adaptación espacial y pérdida de la agudeza visual. Lo anterior, supone factores de riesgo y predisposición a desencadenar cambios de comportamiento y desorientación en una misión de corta o larga duración (3).

Todo esto logra afectar negativamente el rendimiento de la tripulación, alterando por ejemplo, el rendimiento de un astronauta, quien depende del tiempo de reacción y de la memorización de los procedimientos que debe repetir (40, 41, 42). Los cambios antifisiológicos que puede sufrir un tripulante en el sistema nervioso central, son la fuente de estudio avanzado de la agencia espacial para cuidar y evitar que aumenten los riesgos y daños a nivel cerebral (3).

Los algoritmos biológicos en la investigación comportamental de los proyectos de la NASA, se basan en la arquitectura de las redes cerebrales que se encuentran en reposo y, a su vez, son patrones de conectividad que surgen durante la ejecución de diversas tareas (36,43), siendo guías para cuantificar y cualificar en programas de computación desde la Tierra. Con ellos se tiene la probabilidad de disminuir los márgenes de error que se pueden presentar en un comportamiento negativo o riesgo psíquico, que no dejan de ser estados relativos en el desarrollo de una tarea bajo presión psicológica y fisiológica (39); se recurrirá a médicos y especialistas para evaluar «estados de reposo y de actividad neuronal» que logren predecir el buen y mal rendimiento de la memoria de trabajo de un astronauta, para ejecutar herramientas y decisiones que no cambien el curso de la misión; en otras palabras, se busca reducir el error humano en las acciones de un viaje espacial, por medio de análisis y evaluación de las ondas cerebrales (42,44).

### **Alteraciones de la masa corporal en el viaje espacial**

Las preocupaciones clínicas para el vuelo espacial de larga duración, incluyen la pérdida de masa corporal y la ingesta inadecuada de alimentos, basadas en la irregularidad del ritmo circadiano que se sufre al estar en una nave espacial y las diferentes necesidades basales que surgen ante la falta de fuerza de gravedad, generando la disminución de masa ósea en el cuerpo del astronauta expuesto (45).

Considerando que los requerimientos energéticos promedio de una persona en la Tierra, cambian en su totalidad al salir al espacio exterior, se ha evidenciado la disminución de la vitamina B12 y vitamina D. También se constata un enlentecimiento de la síntesis de aminoácidos esenciales, con disminución de la reabsorción de calcio, deficiencia de cofactores enzimáticos y aumento del catabolismo a raíz de los mecanismos que se activan para la adaptación fisiológica en el espacio (46,47).

En consecuencia, se hace de vital importancia entender los cambios metabólicos en condiciones diferentes del nivel gravitacional de la tierra ( $9.8m/s^2$ ), permitiendo investigar y adaptar herramientas que faciliten a los astronautas, las misiones espaciales (48,49). Los estudios de la medicina aeroespacial, se han encaminado a asegurar la salud humana y la supervivencia durante los vuelos espaciales, sobre todo, los de larga duración (48, 50, 51).

Dado que bajo las condiciones de la microgravedad, se pierde una tasa del 1 al 2% de la masa ósea corporal por mes, particularmente en las extremidades inferiores (52,53), la contramedida más utilizada contra la pérdida mineral ósea y muscular en la microgravedad, es el hábito de realizar ejercicio físico diario en la misión (51,53).

La atrofia muscular progresiva en condiciones de ingravidez, ha sido consistentemente documentada. En ausencia de medidas específicas, la masa muscular disminuye en aproximadamente dos tercios de la masa inicial, después de 270 días. Se necesita la integridad muscular por maniobras de emergencia, actividades de alto rendimiento, tales como las actividades extravehiculares, como por ejemplo, los paseos espaciales y las reparaciones de la nave espacial (55-59).

La ingravidez real y la simulada, han demostrado que la atrofia es mayor en los músculos posturales anti-gravitatorios. La pérdida en el volumen muscular es mayor en los flexores plantares del tobillo, seguido de los flexores dorsales, extensores de la rodilla, flexores de la rodilla y músculos de la columna lumbosacra (3, 59,61).

Debido a que las medidas preventivas no pueden preservar los músculos en su totalidad, los astronautas requieren readaptación neuromuscular a la gravedad y, actualmente, reciben terapia física similar a un régimen de pérdida de condición generalizada. La res-

tauración de la masa muscular y la fuerza se produce a una velocidad similar, o posiblemente más corta que la tasa de atrofia inicial que sufre un músculo a la ingravidez. Durante la búsqueda bibliográfica para el presente análisis, no fue posible encontrar estudios que comparen la eficacia de diversos protocolos de rehabilitación, aplicados a los astronautas después de misiones de larga duración (55- 59).

Sin embargo, los datos han demostrado que las técnicas existentes de hacer ejercicio físico, no son muy efectivas para prevenir la pérdida de masa ósea y muscular en su totalidad, en los vuelos de larga duración (58,59). La aparición temprana de osteoporosis en estados crónicos, aumenta durante viajes espaciales que tengan un tiempo de 4 a 6 meses, multiplicando el riesgo de fractura de un astronauta (60, 61,62).

### **Riesgo oncológico de estar en el espacio exterior**

Los astronautas que participan en misiones con dirección a la estación espacial, a la luna o a Marte, están expuestos a una alta dosis de radiación ionizante en el rango de 50 a 2.000 mSv (milli-Sievert) según lo proyectado por los cálculos de expertos y programas de simulación biológica. Ello genera una predisposición al cáncer, así como daño al sistema nervioso central, cataratas y otras enfermedades; la evidencia describe que es amplia la posibilidad de padecer cáncer por radiación ionizante, para dosis que están por encima de unos 50 mSv (60). En los estudios epidemiológicos que proporcionaron datos respecto a la exposición a rayos X o rayos gamma bajo dosis de 50 a 2.000 mSv, incluyendo a los sobrevivientes de las explosiones de bombas atómicas en Hiroshima y Nagasaki (63,65) o trabajadores de un reactor nuclear, se encontró que estas personas tienen un alto riesgo de padecer patologías oncológicas. En estos casos, el riesgo es mayor e incluso 20 veces más, en comparación con una persona que no se exponga a dichas condiciones. Para la agencia espacial, el cáncer de piel en un viaje de mi-

sión interplanetaria, es el que más probabilidades tiene de presentarse, en teoría, al estar en otro planeta como por ejemplo Marte (63 - 66).

La radiación afecta las células y tejidos, ya sea a través del daño directo a los componentes celulares o a través de la producción de radicales libres altamente reactivos al agua; ambos mecanismos pueden generar el daño suficiente para causar la muerte celular, la mutación del ADN o la función celular anormal con inhibición de la apoptosis. La extensión del daño, por lo general, se cree que depende de la dosis y el tipo de partícula con que se da la respuesta a activar los mecanismos oncogénicos (63- 66).

El riesgo de cáncer, causado por la exposición a la radiación espacial, se considera el principal obstáculo para los viajes interplanetarios, por las siguientes razones: hay grandes incertidumbres con las estimaciones de padecer cáncer (61- 65); no hay contramedidas simples y efectivas disponibles, ni medidas de mitigación como el blindaje contra la radiación o el uso de contramedidas biológicas; también se carece de medidas para tamizar astronautas con factores de riesgos y predisposición de padecer cáncer, basados en antecedentes familiares cercanos, en hábitos no saludables, exposiciones radiológicas previas que superen las 3 placas de rayos X en su historia clínica en un año; las contramedidas disponibles, no protegen a las células de las mínimas dosis de radiación que pueden acumularse en el espacio y el cuerpo humano durante una misión espacial (63- 66).

Viajar a la luna, puede aumentar el riesgo de padecer una enfermedad oncológica de 1 a 10%, en comparación con una persona en la Tierra que nunca ha realizado un viaje espacial. En el caso de un viaje interplanetario, como se espera en el proyecto del planeta Marte, se puede aumentar el riesgo de padecer cáncer de un 20 a un 70%, tras la finalización del viaje espacial (63, 65).

Diversos estudios analíticos proporcionan pruebas sólidas de morbilidad y mortalidad por cáncer, que pueden originarse al exponerse a la radiación; se describen especialmente las leucemias en adultos jóvenes, así como tumores de pulmón y también de mama, piel, estómago, colon, vejiga e hígado, como los lugares específicos de riesgo al estar expuestos a radiaciones cósmicas o iónicas (63, 66).

La NASA tiene claro que al enviar 6 tripulantes a una misión de larga duración como la exploración al planeta Marte, los astronautas pueden desarrollar la activación de rutas patológicas tumorales. Esto debido a los estudios de experimentación con animales, los cuales reflejan gran predisposición a leucemias y cáncer de pulmón, por lo que solo se espera tener las herramientas suficientes para aislar las mínimas y máximas dosis de radiación que puede presentar un astronauta en un viaje espacial de tal característica (67, 68).

Continuando con la evidencia experimental de la radiación, investigaciones realizadas en modelos animales y cultivos celulares, donde se utilizan dosis altas de exposición prolongada a la radiación gamma (64, 65,66), muestra un aumento de predisposición a desarrollar una patología oncológica a largo plazo. La investigación se compara y es adaptada a datos probabilísticos, dando como resultado que un astronauta tiene un 10% más de riesgo de padecer cáncer en la cuarta década de la vida, al exponerse a altas dosis en un vuelo espacial de corta duración, menor o igual a 2 meses (72, 73).

Si una célula se expone a neutrones de fisión en comparación con la exposición a los rayos gamma, la producción de tumores malignos es más grande y probable, asegurando la letalidad. Todo esto bajo la evidencia y los desafíos que guarda un viaje espacial de larga duración en el espacio, mayor o igual a 6 meses (74, 75).

La radiación que es capaz de alterar los átomos y moléculas, y con ello las estructuras que constituyen la

materia, recibe el nombre de radiación ionizante y tiene efectos especialmente perjudiciales sobre los seres vivos (76).

Las radiaciones ionizantes en los seres vivos quedan restringidas (77, 78); siguiendo la definición de la Organización Mundial de la Salud (OMS), las radiaciones ionizantes pueden ser portadas en forma de ondas electromagnéticas, como son los rayos X y los rayos gamma, o en forma de partículas, en las que se diferencian las partículas alfa, beta y neutrones (1, 76, 79). La frecuente exposición a la radiación ultravioleta o ionizada, puede alterar la estructura de las glándulas, provocando desde la disminución de la saliva, hasta afectar el ADN (80, 81). La saliva se considera como un biomarcador para identificar enfermedades sistémicas, síndromes y hasta cáncer en viajeros espaciales (82,83).

Para los científicos, es obvio que los riesgos de salir de la magnetosfera de la Tierra (78), son cada vez más grandes; esto debido a que el universo visible es solo el 5% del total, mientras que el resto se conforma por un 95% de materia y energía oscura, llamada así porque se desconoce su estructura fundamental (79).

En la actualidad se están realizando estudios de investigación en microorganismos resistentes a las radiaciones, con el propósito de averiguar y reconocer los mecanismos que usan para proteger su material genético de las radiaciones. Tales hallazgos buscan aplicarse para salvaguardar al ser humano en los viajes interplanetarios que aspira realizar la NASA en años futuros. El estímulo para dicho estudio, fue la comprobación de un aumento en la incidencia de cáncer y de catarata en astronautas que se expusieron a viajes fuera de la atmósfera, en los años 60 y 70 del siglo XX (84). Especialmente sensibles a esas radiaciones, fueron quienes viajaron a la Luna, al cruzar más allá de los cinturones de radiación de Van Allen de la magnetosfera terrestre (84, 85).

## Conclusión

Los estudios describen que la exposición de los astronautas a la radiación ionizante y a la falta de gravedad son factores de riesgo, determinantes para padecer enfermedades y cambios fisiológicos de importancia, antes y después de una misión espacial de larga duración. Sin embargo las agencias espaciales reducen todos los riesgos con entrenamientos, herramientas tecnológicas, análisis clínicos y genealógicos de los tripulantes de una misión interplanetaria.

Es claro que las investigaciones acercan y evalúan los posibles riesgos y probabilidades de padecer enfermedades, y esto permite tener aproximaciones para seguir mejorando las herramientas y protocolos de un viaje espacial.

## Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

## Financiación

Ninguna declarada por los autores.

## Agradecimientos

Los autores estamos cordialmente agradecidos con la colaboración brindada por la Universidad del Cauca y el departamento de Medicina interna, e igualmente por su gran motivación a los estudiantes para aprender y conocer acerca del universo, de la investigación y de la producción científica.

## Referencias

1. Townsend LW. Implications of the space radiation environment for human exploration in deep space. *Radiat Prot Dosimetry*. 2005; 115: 44–50. Doi: 10.1093/rpd/nci141
2. Boddy J. From shrinking spines to space fungus: The top five dangers of space travel. Dec. 2, 2016; Science. [shrinking-spines-space-fungus-top-five-dangers-space-travel](#), Posted in: Brain & Behavior Space. Doi: 10.1126/science.aal0451
3. Carrillo R. *Medicina espacial*. 1ª ed. México: Academia Nacional de Medicina; 2016. ISBN 978-607-443-624-2.
4. Stewart LH, Trunkey D, Rebagliatti SG. Emergency medicine in space. *J Emerg Med*. 2007; 32: 45-54.
5. Taylor WE. Alteration of gene expression profiles in skeletal muscle of rats exposed to microgravity during a spaceflight. *Life Sciences (General), Journal of gravitational physiology: a journal of the International Society for Gravitational Physiology*. 9 (2): 61-70. ISSN: 1077-9248
6. Willey JS, Lloyd SA, Nelson GA, Bateman TA. Space radiation and bone loss. *Gravit Space Biol Bull*. 2011; 25: 14-21.
7. Liakopoulos U, Leivaditis K, Eleftheriadis T, Dombros N. The kidney in space. *Int Urol Nephrol*. 2012; 44: 1893-901.
8. Stein TP. Weigth, muscle and bone loss during space flight: another perspective. *Eur J Appl Physiol*. 2013: 2171-81.
9. Hughson RL. Recent findings in cardiovascular physiology with space travel. *Resp Physiol Neurobiol*. 2009; 169: 38-41.
10. Sibonga JD. Managing the Risk for Early Onset Osteoporosis in Long-Duration Astronauts Due to Spaceflight. NASA Johnson Space Center; Houston, TX, United States. *Life Sciences (General)*; JSC-CN-21978.
11. Layne CS, Forth KE. Plantar stimulation as a possible countermeasure to microgravity-induced neuromotor degradation. *Aviation Space and Environmental Medicine*. 2008; 79: 787–794.
12. LeBlanc A, Matsumoto T, Jones J, Shapiro J, Lang T, Shackelford L, et al. Bisphosphonates as a supplement to exercise to protect bone during long-duration spaceflight. *Osteoporosis International: A Journal Established as Result of Cooperation Between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*. 2013.
13. Carl J. Ade, PhD, Incidence Rate of Cardiovascular Disease End Points in the National Aeronautics and Space Administration Astronaut Corps. *J Am Heart Assoc*. 2017 Aug; 6(8): e005564. *J Am Heart Assoc*. 2017 Aug; 6(8): e005564. Published online 2017 Aug 7. Doi: [10.1161/JAHA.117.005564]
14. Abrosimova AN, Shafirkin AV, Fedorenko BS. Probability of lens opacity and mature cataracts due to irradiation at various LET values. *Aviakosm Ekolog Med*. 2000; 34(3): 33–41.
15. Human Health and Performance Risks of Space Exploration Missions, (Jancy C. McPhee and John B. Charles, editors), NASA SP-2009-3405, 2009.
16. Charvat JM, Lee SM, Wear M, Stenger L, Michael B, Van Baalen M. Cardiovascular Disease Outcomes Among the NASA Astronaut Corps. NASA Center: Johnson Spa-

- ce Center, Jan 22, 2018; 20170010301; JSC-CN-40701. 2018 NASA Human Research Program Investigators' Workshop (HRP IWS 2018); 22-25 Jan. 2018; Galveston, TX; United States.
17. Stenger MB, Stuart MC, Lee D. The Heart of the Matter: Avoiding Cardiovascular Dysfunction. <https://www.nasa.gov/content/cardiovascular-health> March 31, 2015, Last Updated: Aug. 7, 2017. National Aeronautics and Space Administration.
  18. Carl JA. Incidence Rate of Cardiovascular Disease End Points in the National Aeronautics and Space Administration Astronaut Corps. *J Am Heart Assoc.* 2017 Aug; 6(8): e005564. *J Am Heart Assoc.* 2017 Aug; 6(8): e005564. Published online 2017 Aug 7. Doi: [10.1161/JAHA.117.005564]
  19. Elgart SR. Radiation Exposure and Mortality from Cardiovascular Disease and Cancer in Early NASA Astronauts: Space for Exploration. 20170009911, Aerospace Medicine, JSC-CN-40709. NASA; Washington, DC, United States. NASA Human Research Program Investigators' Workshop; 22-25 Jan. 2018; Galveston, TX; United States.
  20. Zarana P. Evidence Report: Risk of Cardiovascular Disease and Other Degenerative Tissue Effects from Radiation Exposure. National Aeronautics and Space Administration Lyndon B. Johnson Space Center Houston, Texas.
  21. Anderson RE, Key CR, Yamamoto T, Thorslund T. Aging in Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivors. Speculations based upon the age-specific mortality of persons with malignant neoplasms. *Am J Pathol.* 1974; 75: 1-11.
  22. Lee SMC. Metabolomic and Genomic Markers of Atherosclerosis as Related to Oxidative Stress, Inflammation, and Vascular Function in Twin Astronauts. Jan 23, 2017. 20160013632. Aerospace Medicine. JSC-CN-37998. NASA; Washington, DC, United States.
  23. Hughson RL. Recent findings in cardiovascular physiology with space travel. *Resp Physiol Neurobiol.* 2009; 169: 38-41.
  24. Stein TP. Weigh, muscle and bone loss during space flight: another perspective. *Eur J Appl Physiol.* 2013; 2171-81.
  25. Pietsch J, Bauer J, Egli M, Infanger M, Wise P, Ulbrich C, et al. The effects of weightlessness on human organism and mammalian cells. *Curr Mol Med.* 2011; 11: 350-64.
  26. Stewart LH, Trunkey D, Rebagliatti SG. Emergency medicine in space. *J Emerg Med.* 2007; 32: 45-54.
  27. Liakopoulos U, Leivaditis K, Eleftheriadis T, Dombros N. The kidney in space. *Int Urol Nephrol.* 2012; 44: 1893-901.
  28. Stuster J. CPE. Behavioral Issues Associated With Long Duration Space Expeditions: Review and Analysis of Astronaut Journals Experiment 01-E104 (Journals) Phase 2 Final Report. National Aeronautics and Space Administration; Johnson Space Center Houston, Texas 77058, NASA/TM-2016-218603.
  29. Vipan K. Parihar; Cosmic radiation exposure and persistent cognitive dysfunction. *Scientific Reports* volume6, Article number: 34774. 2016.
  30. APA. Diagnostic and statistical manual of mental disorders. 4th Ed. (text rev.). Washington, D.C. 2000.
  31. Antonovsky A. Health, stress, and coping: new perspectives on mental and physical well-being. Jossey-Bass, San Francisco, Calif. (1979).
  32. Jancy CM. Human Health and Performance Risks of Space Exploration Missions, Evidence reviewed by the NASA Human Research Program. NASA SP-2009-3405. Lyndon B. Johnson Space Center; Houston, Texas 77058
  33. Bailey DA, Gilleran LG, Merchant PG. Waivers for disqualifying medical conditions in U.S. Naval aviation personnel. *Aviat. Space Environ. Med.* 1995; 66: 401-407.
  34. Review of the NASA Astronaut; NASA Astronaut Health Care System Review Committee February – June 2007 Report to the Administrator.
  35. Review of the NASA Astronaut, Memo from the NASA Administrator to the Chief Health and Medical Officer; 7 Feb 2007.
  36. Review of the NASA Astronaut, Johnson Space Center Astronaut and Flight Surgeon Survey Report; January 2008.
  37. Thomas W. Evidence: Risk of Adverse Cognitive or Behavioral Conditions and Psychiatric Disorders; Report- Human Factors and Behavioral Performance (HFBP), BMed Last Published: 07/31/18 09:30:03 AM (Central).
  38. Mao XW, Nishiyama NC, Pecaunt MJ, Campbell-Beachler M, Gifford P, Haynes KE, Gridley DS. Simulated Microgravity and Low-Dose/Low-Dose-Rate Radiation Induces Oxidative Damage in the Mouse Brain. *Radiation Research.* 2016; 185(6): 647-57. <https://doi.org/10.1667/RR14267.1>
  39. Britten R, Jewell JS, Duncan VD, Hadley MM, Macadat E, Musto A, & La Tessa C. Impaired Attentional Set-Shifting Performance after Exposure to 5 cGy of 600 MeV/n 28 Si Particles. *Radiation Research.* 2018; 189(3): 273-282. <https://doi.org/10.1667/RR14627.1>
  40. Cassady K, Koppelmans V, Reuter-Lorenz P, De Dios Y, Gadd N, Wood S, Seidler R. Effects of a space-flight analog environment on brain connectivity and behavior. *NeuroImage.* 2016; 141: 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.07.029>
  41. Clewett DV, Lee TH, Greening S, Ponzio A, Margalit E, & Mather M. Neuromelanin marks the spot: identifying a locus coeruleus biomarker of cognitive reserve in healthy

- aging. *Neurobiology of Aging*. 2016; 37: 117–126. <http://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2015.09.019>.
42. Demertzi A, Van Ombergen A, Tomilovskaya E, Jeurissen B, Pechenkova E, Di Perri C, Wuyts FL. Cortical reorganization in an astronaut's brain after long-duration spaceflight. *Brain Structure and Function*. 2016; 221: 2873–2876. <http://doi.org/10.1007/s00429-015-1054-3>
  43. Muldoon SF, Pasqualetti F, Gu S, Cieslak M, Grafton ST, Vettel JM, & Bassett DS. Stimulation-Based Control of Dynamic Brain Networks. *PLoS Computational Biology*. 2016; 12(9). e1005076. <http://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005076>
  44. NASA CNS Risk Evidence Report: Risk of Acute and Late Central Nervous System Effects from Radiation Exposure (2016). Retrieved from <https://humanresearchroadmap.nasa.gov/evidence/reports/cns.pdf>
  45. Pani G, Samari N, Quintens R, de Saint-Georges L, Meloni M, Baatout S, Benotmane MA. Morphological and Physiological Changes in Mature In Vitro Neuronal Networks towards Exposure to Short-, Middle- or Long-Term Simulated Microgravity. *PLoS ONE*. 2013; 8(9). e73857. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0073857>
  46. Zwart SR, Launius RD, Coen GK, Morgan JLL, Charles JB, Smith SM. Body mass changes during long duration spaceflight. *Aviat Space Environ Med*. 2014; 85: 897–904.
  47. Smith SM, Zwart SR. Nutritional biochemistry of spaceflight. *Adv Clin Chem*. 2008; 46: 87–130. 2.
  48. Smith SM, Zwart SR, Kloeris V, Heer M. Nutritional biochemistry of space flight. New York: Nova Science Publishers; 2009.
  49. Estrategia y Visión de la Labor de la FAO en Materia de Nutrición. Papel de la FAO en la nutrición. Rome, 2014. Sitio web de la Organización ([www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)).
  50. Carrillo R. Medicina espacial. 1ª ed. México: Academia Nacional de Medicina De México (ANMM); 2016. ISBN 978-607-443-624-2.
  51. Conference on Nutrition in Space and Related Waste Problems. University Of South Florida. Tampa, Florida April 27-30, 1964. NASA SP-70.
  52. Bourland CT, Smith MC. Selection of human consumables for future space missions. *Waste Manage Res*, 1991; 9: 339–44.
  53. Carl JA. Incidence Rate of Cardiovascular Disease End Points in the National Aeronautics and Space Administration Astronaut Corps. *J Am Heart Assoc*. 2017 Aug; 6 (8): e005564. Published online 2017 Aug 7. Doi: [10.1161/JAHA.117.005564]
  54. Lang TA, LeBlanc H, Evans Y, Lu H, Genant A. Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight. *J. Bone Min. Res*. 19 (2004) 1006–1012.
  55. Lambertz D, Perot C, Kaspranski R, Goubel F. Effects of longterm spaceflight on mechanical properties of muscles in humans. *J Appl Physiol*. 2001; 90:179–88.
  56. NASA. Postflight Rehabilitation Plan. Document JSC 27050. Johnson Space Center, NASA, 1997.
  57. Payne MWC, Williams DR, Trudel G. Review: spaceflight rehabilitation. *Am J Phys Med Rehabil*. 2007; 86: 583–91.
  58. Reeves ND, Maganaris CN, Ferretti G, Narici MV. Influence of 90-day simulated microgravity on human tendon mechanical properties and the effect of resistive countermeasures. *J Appl Physiol*. 2005; 98: 2278–86.
  59. Tesch PA, Trieschmann JT, Ekberg A. Hypertrophy of chronically unloaded muscle subjected to resistance exercise. *J Appl Physiol*. 2004; 96: 1451–8.
  60. Pennline J. The Digital Astronaut Project Computational Bone Remodeling Model (Beta Version) Bone Summit Summary Report, Sep 23, 2013; 20140003236; JSC-CN-29755, Aerospace Medicine.
  61. Buckley JC, Jr. *Space Physiology*, Oxford University Press, New York, 2006.
  62. Layne CS, Forth KE. Plantar stimulation as a possible countermeasure to microgravity-induced neuromotor degradation. *Aviation Space and Environmental Medicine*. 2008; 79: 787–794.
  63. LeBlanc A, Matsumoto T, Jones J, Shapiro T, Lang L, Shackelford et al. Bisphosphonates as a supplement to exercise to protect bone during long-duration spaceflight., *Osteoporosis International: a Journal Established as Result of Cooperation Between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*. (2013).
  64. Badhwar GD. (1997) Spaceflight validation of material shielding properties. In: Wilson JW, Miller J, Konradi A, Cucinotta FA (Eds.), NASA workshop on shielding strategies for human space exploration. NASA-CP-1997-3360. NASA Johnson Space Center, Houston.
  65. Badhwar GD, Cucinotta FA. A comparison of depth dependence of dose and linear energy transfer spectra in aluminum and polyethylene. *Radiat. Res*. 2000; 153: 1–8.
  66. Barcellos-Hoff MH, Park C, Wright EG. Radiation and the microenvironment – tumorigenesis and therapy. *Nat. Rev. Canc*. 2005; 5: 867–875.
  67. Beir. Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. National Research Council of the National Academies. (2006) Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII – Phase 2. The National Academies Press, Washington, D.C.
  68. Billings MP, Yucker WR, Heckman BR. (1973) Body self-shielding data analysis. MDC-G4131. McDonnell-Douglas Astronautics Company West.

69. Bingham S, Riboli E. Diet and cancer—the European prospective investigation into cancer and nutrition. *Nat. Rev. Canc.* 2004; 4: 206–215.
70. Bunger BM, Cook JR, Barrick MK. Life table methodology for evaluating radiation risk: an application based on occupational exposures. *Health Phys.* 1981; 40: 439–455.
71. Burns FJ, Jin Y, Koenig KL, Hosselet S. The low carcinogenicity of electron radiation relative to argon ions in rat skin. *Radiat. Res.* 1993; 135: 178–188.
72. Burns F, Yin Y, Garte SJ, Hosselet S. Estimation of risk based on multiple events in radiation carcinogenesis of rat skin. *Adv. Space Res.* 1994; 14: 507–519.
73. Ochola DO. Persistence of Gamma-H2AX Foci in Irradiated Bronchial Cells Correlates with Susceptibility to Radiation Associated. *Aerospace Medicine. NASA Ames Research Center; Moffett Field, CA, United States. ARC-E-DAA-TN53304/SUPPL.* Jan 01, 2018. 20180001965.
74. NASA. Managing Space Radiation Risk in the New Era of Space Exploration; Jan 01, 2008; Space Radiation; NASA; Washington, DC, United States. 20080016495.
75. Burns FJ, et al. Induction and prevention of carcinogenesis in rat skin exposed to space radiation. *Radiat. Environ. Biophys.* 2007; 46: 195–199.
76. Ordóñez A. Efectos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos. Febrero, 2016. Universidad De Jaén; Facultad de Ciencias Experimentales.
77. Gil JM. Radiobiología para profesionales sanitarios: radiosensibilidad vs radioresistencia. Respuestas bioquímica, celular y tisular. Madrid, España: MAD; 2010.
78. Vipani KP. Cosmic radiation exposure and persistent cognitive dysfunction. *Scientific Reports* volumen 6, Article number: 34774 (2016). Published: 10 October 2016.
79. Locke PA, Weil MM. Personalized cancer risk assessments for space radiation exposures. *Front Oncol.* 2016; 6:38.
80. Mohammad A, Ahad S, Durand SD. Saliva as a diagnostic tool for oral and systemic diseases. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research.* 2016 Enero-Abril; 6 (1): 67-76.
81. Belstrøm D, Holmstrup P, Bardow A, Kokaras A, Fiehn NE, Paster B. Temporal stability of the salivary microbiota in oral health. *Plos ONE.* 2016; 11(1).
82. Balwant R, Jasdeep K, Bernard H F. Evaluation by an aeronautic dentist on the adverse effects of a six-week period of microgravity on the oral cavity. *International Journal of Dentistry.* 2011.
83. DiPrampo PE, Narici MV. Muscles in microgravity: From fibres to human motion. *J Biomech.* 2003; 36: 403–12.
84. Hammer L. Aeronautical Systems Division studies in weightlessness: 1959-1960. Wright-Patterson Air Force Base, OH: Aeronautical Systems Division, Air Force Systems Command, United States Air Force; 1961. Wadd Technical Report 60-715.
85. Space Studies Board: National Research Council. A Strategy for Research in Space Biology and Medicine in the New Century. Washington, DC: National Academy Press; 1998.

**Recibido:** 3 de diciembre de 2018

**Aceptado:** 8 de marzo de 2019

**Correspondencia:**

Jhan Sebastián Saavedra-Torres  
*Jhansaavedra@unicauca.edu.co*