

Generalidades del ambiente de cabina de la Estación Espacial Internacional como análogo para misiones de tipo exploración*: una visión desde la medicina aeroespacial

| Fecha de recibido: 24 de junio 2022 | Fecha de aprobado: 28 de septiembre 2022 |

| Reception date: June 24, 2022 | Approval date: September 28, 2022 |

| Data de recebimento: 24 de junho de 2022 | Data de aprovação: 28 de agosto de 2022 |

**Diego Leonel
Malpica Hincapie**

<https://orcid.org/0000-0002-2257-4940>

✉ diego.malpica@fac.mil.co

Especialista en Medicina Aeroespacial

Docente e Investigador

Escuela de Postgrados de la FAC

Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación Ciencia

y Poder Aéreo - CIPAER

Aerospace Medicine Specialist

Teacher and researcher

Escuela de Postgrados de la FAC

Colombia

Researcher's role: theoretical and writing

Science and Air Power Research Group - CIPAER

Especialista em Medicina Aeroespacial

Professor e investigador

Escuela de Postgrados de la FAC

Colombia

O papel do pesquisador: teórico e escrito

Grupo de Pesquisa em Ciência e Poder Aéreo - CIPAER

* Revisión narrativa de la literatura por el grupo Cipaer. Financiación en especie de la Dimae.

Cómo citar este artículo: Malpica, D. L. (2023). Generalidades del ambiente de cabina de la Estación Espacial Internacional como análogo para misiones de tipo exploración: una visión desde la medicina aeroespacial. *Ciencia y Poder Aéreo*, 18(1), 6-24. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.753>



Generalidades del ambiente de cabina de la Estación Espacial Internacional como análogo para misiones de tipo exploración: una visión desde la medicina aeroespacial

Overview of the International Space Station cabin environment as an analog for exploration-type missions: A view from aerospace medicine

Visão geral do ambiente da cabine da Estação Espacial Internacional como um análogo para missões do tipo exploração: Uma visão da medicina aeroespacial

Resumen: La salud y la seguridad de los astronautas en misiones de exploración espacial dependen del ambiente donde habitan, y la supervivencia en ambientes extremos requiere sistemas robustos que provean protección y les ofrezcan una atmósfera que les permita tener un desempeño normal en un entorno hostil. Es importante, entonces, conocer la cercana relación de los sistemas de soporte de vida, y el impacto en el bienestar de aquellos que trabajan en un espacio confinado con mínima utilización de recursos y energía.

El objetivo de esta revisión es describir los sistemas de control ambiental y de soporte de vida de la Estación Espacial Internacional, y relatar el impacto en la salud y el rendimiento psicofísico de los astronautas si estos no funcionan normalmente. Se hacen búsquedas en las bases de datos Scopus, Ovid, arXiv.org, SAGE, BioMed, ClinicalKey, ProQuest, EBSCO, SpringerLink, Web of Science, Google Scholar y Pubmed, que integren el sistema de control ambiental y soporte de vida con los fenómenos fisiopatológicos en caso de emergencia. Se recopilan 649 referencias con las estrategias de búsqueda y se restan aquellas repetidas (445) y cuyo texto completo no se consiguió (133), con un total de 71 referencias para análisis. Se discuten las características habitacionales de la Estación Espacial Internacional en términos de calidad y cantidad de aire disponible, la composición de los gases, la producción de oxígeno y nitrógeno, el barrido del dióxido de carbono y sus efectos en el astronauta bajo condiciones de microgravedad. Además, se exploran efectos toxicológicos, del ambiente microbiológico, acústica y vigilancia de la exposición a radiación electromagnética. Las futuras misiones de tipo exploración espacial necesitarán sistemas de control ambiental robustos con bajo riesgo de fallo y probable uso de recursos *in situ*.

Palabras clave: astronautas; estación espacial internacional; exposición ocupacional; fisiología espacial; medicina aeroespacial; vuelo espacial.

Abstract: The health and safety of astronauts on space exploration missions depends on the environment they inhabit, and survival in extreme environments requires robust systems that provide protection and an atmosphere that allows them to perform normally in a hostile environment. It is important, then, to understand the close relationship of life support systems, and the impact on the well-being of those working in confined space with minimal resource and energy utilization.

The objective of this review is to describe the environmental control and life support systems of the International Space Station, and to relate the impact on the astronauts' health and psychophysical performance if they do not function normally. Scopus, Ovid, arXiv.org, SAGE, BioMed, ClinicalKey, ProQuest, EBSCO, SpringerLink, Web of Science, Google Scholar, and Pubmed databases are searched, integrating the environmental control and life support system with pathophysiological phenomena in case of emergency. We collected 649 references with the search strategies and subtracted those that were repeated (445) and whose full text was not obtained (133), with a total of 71 references for analysis. The habitation characteristics of the International Space Station are discussed in terms of quality and quantity of available air, gas composition, oxygen and nitrogen production, carbon dioxide scavenging and its effects on the astronaut under microgravity conditions. In addition, toxicological effects, microbiological environment, acoustics, and electromagnetic radiation exposure monitoring are explored. Future space exploration type missions will require robust environmental monitoring systems with low risk of failure and likely use of *in situ* resources.

Keywords: Astronauts; international space station; occupational exposure; space physiology; aerospace medicine; space flight.

Resumo: A saúde e a segurança dos astronautas em missões de exploração espacial dependem do ambiente que habitam, e a sobrevivência em ambientes extremos requer sistemas robustos que ofereçam proteção e uma atmosfera que lhes permita atuar normalmente em um ambiente hostil. É importante, portanto, compreender a estreita relação dos sistemas de suporte de vida e o impacto sobre o bem-estar daqueles que trabalham em espaços confinados com o mínimo de uso de recursos e energia.

O objetivo desta revisão é descrever os sistemas de controle ambiental e de suporte de vida da Estação Espacial Internacional, e relacionar o impacto na saúde e no desempenho psicofísico dos astronautas se eles não funcionarem normalmente. As bases de dados Scopus, Ovid, arXiv.org, SAGE, BioMed, ClinicalKey, ProQuest, EBSCO, SpringerLink, Web of Science, Google Scholar e Pubmed são pesquisadas, integrando o controle ambiental e o sistema de suporte de vida com os fenômenos fisiopatológicos em caso de emergência. Compilamos 649 referências utilizando as estratégias de busca e subtraímos aquelas que foram repetidas (445) e cujo texto completo não estava disponível (133), para um total de 71 referências para análise. As características habitacionais da Estação Espacial Internacional são discutidas em termos de qualidade e quantidade de ar disponível, composição do gás, produção de oxigênio e nitrogênio, remoção de dióxido de carbono e seus efeitos sobre o astronauta sob condições de microgravidade. Além disso, os efeitos toxicológicos, o ambiente microbiológico, a acústica e o monitoramento da exposição à radiação eletromagnética são explorados. As futuras missões do tipo exploração espacial exigirão sistemas robustos de monitoramento ambiental com baixo risco de falhas e provável uso de recursos *in-situ*.

Palavras-chave: Astronautas; estação espacial internacional; exposição ocupacional; fisiologia espacial; medicina aeroespacial; vôo espacial.

Introducción

La salud y la seguridad de los astronautas es una prioridad para las agencias espaciales y para la empresa privada, que con frecuencia realizan misiones en órbita baja y proyectan sus intenciones a la superficie lunar y de Marte por periodos prolongados de tiempo. Es por esto que los sistemas de soporte de vida deben proveer una atmósfera confortable para vivir y trabajar en un ambiente hostil donde los astronautas se exponen a las alteraciones de la gravedad, que afectan la masa muscular (Lee *et al.*, 2022), predisponen a alteraciones de la estructura ósea (Man *et al.*, 2022), producen desplazamiento cefálico de fluidos (Tanaka *et al.*, 2017) y generan cambios del rendimiento sensoriomotor (Kourtidou-Papadeli, 2022). Además, la exposición a la radiación ionizante proveniente del Sol y de la galaxia puede generar enfermedades degenerativas, cáncer y alteraciones en el sistema nervioso central (Kennedy, 2014); el confinamiento, por su parte, provoca alteraciones del sistema inmune (Pagel y Choukèr, 2016), estrés térmico y contaminación de la cabina de material particulado (Horie *et al.*, 2012). En las cercanas misiones Artemisa, podremos ver los retos al tener tripulaciones con cambios del comportamiento y alteraciones del sueño y de sus emociones resultado del aislamiento (Alfano *et al.*, 2018).

Las misiones Artemisa son el conjunto de expediciones a la superficie de la Luna como reto para llegar a Marte, en la siguiente década, por parte de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y de aquellos Estados que suscriban sus acuerdos. Su nombre se origina en la mitología griega: los hijos mellizos de Zeus y Leto son Apolo y Artemisa (Creech *et al.*, 2022). En las décadas de los sesenta y los setenta, se llevaron a cabo diecisiete misiones llamadas Apolo, que resultaron en doce astronautas que hicieron caminatas en la superficie de la Luna. Se tiene el objetivo de alunizar a la primera mujer y a la primera persona de color para tener presencia permanente, diseñar procedimientos e infraestructura que soporte la vida en el

siguiente paso expedicionario de la humanidad: Marte (Cortright, 2019).

La literatura publicada acerca de la interacción del ambiente de cabina en naves espaciales con los astronautas es escasa en español y en Colombia. La construcción de doctrina sobre el rendimiento humano en operaciones espaciales comienza en el entendimiento de la fina interacción entre el ser humano y el sistema (*software*, *hardware* y ambiente), con el fin de plantear contramedidas para sostener la vida permanentemente en misiones de tipo exploración futura a partir de la colaboración que suscribió el país con la NASA firmando los acuerdos Artemisa (Deplano, 2021). La Estación Espacial Internacional (EEI) lleva operando más de veinte años y es una plataforma donde han madurado los sistemas de soporte vital que servirán para llevar seres humanos a la Luna y a Marte en las próximas décadas (DeLucas, 1996). Pero ¿cuáles son estos sistemas de control ambiental y cuál es el impacto en la salud y el rendimiento del astronauta si no tienen una operación normal?

Para asegurar una mayor autonomía de la Tierra, se necesita integrar contramedidas que le permitan tener un ambiente lo más similar a la Tierra, con disponibilidad de soporte médico y nutricional, y además gestionar los peligros de tormentas solares y el impacto de micrometeoritos que ponen en peligro la vida de los astronautas (Biswal M *et al.*, 2021). Por esta razón, se deben establecer módulos habitacionales en la superficie de la Luna y de Marte que protejan a los próximos exploradores con un ambiente similar al terrestre para que su rendimiento psicofísico no se altere significativamente en su día a día (Escobar *et al.*, 2019; Stapleton *et al.*, 2016). La EEI ha sido el análogo ideal para conocer qué se requiere en términos de ambiente de cabina y de interacción hombre-sistema para soportar misiones más complejas e independientes de la Tierra (Robinson *et al.*, 2019). Por tal motivo, se propone revisar detalles del ambiente en el interior de la EEI para conocer las implicaciones en la salud y el rendimiento de los astronautas en una misión de tipo exploración y para las futuras operaciones comerciales en órbita terrestre baja.

Métodos

Se realiza una revisión de la literatura a través de la búsqueda de publicaciones en bases de datos como Scopus, Ovid, arXiv.org, SAGE, BioMed, ClinicalKey, ProQuest, EBSCO, SpringerLink, Web of Science, Google Scholar y Pubmed (desde 2000 hasta 2022). Se usaron palabras clave de acuerdo con la estrategia descrita en la tabla 1 y se consideraron las publicaciones en inglés relevantes del ambiente de cabina de la EEI. Se excluyen aquellas publicaciones que consideran aspectos del sistema de control ambiental como propuestas teóricas y en unidades de movilidad extravehicular, además de aquellas cuyo texto completo no se pudo recolectar.

repetidos en las estrategias de búsqueda (445 referencias) y de los que no se logra conseguir documentos en texto completo (133 referencias). Para lectura y análisis, se recolectan 79 referencias que se consiguen en texto completo.

La atmósfera respirable de la EEI cuenta con unos estándares que permiten el trabajo en condiciones de microgravedad sin degradar de manera significativa el funcionamiento del cuerpo humano e incluyen la presión barométrica (P_b), la humedad relativa (HR%), la temperatura, los compuestos volátiles orgánicos (VOC), la calidad y cantidad de agua para higiene y consumo, y demás requerimientos médicos, tóxicos ambientales y microbiológicos, material particulado, acústica y radiación electromagnética (EMR), entre otros llamados

Tabla 1.
Ejemplo de la estrategia de búsqueda

Número de búsqueda	Término	Palabras clave en formato de búsqueda*	Filtro de búsqueda
1	Atmospheric control of the International Space Station	"Oxygen" OR "Barometric pressure" OR "Water recovery" OR "Hypoxia"	Título / Resumen
2	International Space Station AND Environment Control and Life Support System	"Temperature" OR "Humidity" OR "Atmosphere revitalization" OR "Waste management" OR "Fire detection and suppression" OR "Vacuum system"	Todos los campos
3	International Space Station AND Air Quality	"Trace contaminant" OR "Major Constituent Analyzer"	Todos los campos
4	International Space Station AND Carbon Dioxide Removal Assembly	"Hypercarbia" OR "Toxicological emergency" OR "Training" AND "ISS"	Todos los campos
5	International Space Station AND Humidity and Temperature	"Common Cabin Air Assembly" AND "Intermodular ventilation fan" AND "HEPA Filter Element"	Todos los campos
6	International Space Station AND Acoustics and electromagnetic radiation	"Human-system Integration" AND "Noise" OR "Galactic Cosmic Radiation" AND "ISS" OR "Radiation Sensor"	Todos los campos
7	Búsqueda combinada	1 AND (2 OR 3 OR 4 OR 5 OR 6 OR 7 OR 8)	

*Las palabras clave fueron combinadas usando descriptores booleanos agrupados por palabras clave.

Fuente: elaboración propia.

Resultados

Se recopilan 649 referencias. Con la combinación especificada en la tabla 1, la primera arroja ochenta referencias; la segunda, 39 referencias; la tercera, sesenta referencias; la cuarta, dieciocho referencias; la quinta, diez referencias; la sexta, 352 referencias; y la séptima, cien referencias. Se resta del total los artículos

"ensambles", divididos en los componentes: revitalización atmosférica, control de temperatura y humedad, detección de fuego y supresión, control y suministro atmosférico, sistema de vacío, sistema de recuperación de agua y gestión de residuos. Todo ha sido socializado en la literatura (Carrasquillo *et al.*, 1997) y sus elementos deben seguir una normativa descrita por NASA (2019).

El desarrollo tecnológico en sistemas de soporte de vida puede traerles beneficios a los habitantes de la Tierra, con la implementación de desarrollos costo-efectivos que permitan ahorrar recursos a partir del reciclaje y proveer mejores estándares de vida a habitantes en áreas remotas del planeta.

¿Cómo se crea la atmósfera dentro de la Estación Espacial Internacional para soportar la vida del astronauta?

El sistema de suministro y control atmosférico mantiene una vigilancia continua de la presurización y de la presión parcial de oxígeno (PO_2), nitrógeno (PN_2) y dióxido de carbono (PCO_2) en cada uno de los módulos de la EEI para la detección temprana y, en caso de emergencia, poner en marcha las medidas de contingencia. La tripulación tiene la capacidad de modificar algunos parámetros interdependientes para mantener márgenes de salud y seguridad, entre ellos: $HR\%$, temperatura, flujo de ventilación, P_b , PO_2 y monitoría de la PCO_2 , partículas en suspensión y trazas de contaminantes dentro de rangos aceptables (Ley *et al.*, 2009).

Según la NASA, la Agencia Espacial Europea, la Agencia Espacial Canadiense, la Agencia Espacial Japonesa y Roskosmos (los principales actores de la operación de la EEI), la P_b debe estar entre 724 y 770 mmHg, y la PO_2 debe estar entre 146 y 148 mmHg, lo cual permite variaciones de la fracción inspirada de oxígeno (F_iO_2) hasta del 30 % para reducir el riesgo de inflamabilidad y mantenerla en promedio en 24,1 % (NASA, 2019; Pickett *et al.*, 2007). Esta composición del ambiente respirable previene la degradación del rendimiento neurocognitivo secundario a hipoxia y además ofrece un factor de protección ante actividades extravehiculares, en las que se tendrá al astronauta en una unidad de movilidad extravehicular de exploración (XEMU) donde su presurización será menor y lo expone a enfermedad por descompresión (Auerbach *et al.*, 2016; Thomas y McMann, 2011).

El sistema de control ambiental y de soporte vital (ECLSS, por sus siglas en inglés), como se describe

en la Figura 1, consiste en tres componentes: el sistema de recuperación del agua (WRS, por sus siglas en inglés), el sistema de generación de oxígeno (OGS, por sus siglas en inglés) y el sistema de revitalización del aire (ARS, por sus siglas en inglés), que están operativos desde 2008 en la EEI. El WRS permite el reciclaje del agua a partir de la recolección de la orina de la tripulación, y la condensación de la humedad y del agua del sistema de hidratación de las unidades de movilidad extravehicular (EMU, por sus siglas en inglés), con un 90 % de eficiencia en el proceso (Williams *et al.*, 2012). El ARS se encarga de filtrar los contaminantes atmosféricos usando el equipo de control de trazas de contaminantes (TCCS, por sus siglas en inglés) producidos por los componentes electrónicos, la manipulación de equipos, los materiales, etc., y con el soporte del ensamble de reducción de dióxido de carbono (CDRA, por sus siglas en inglés) proveniente de los astronautas (Seedhouse, 2020), usando camas de carbón activado, un oxidante catalítico térmico, hidróxido de litio, electrólisis del agua y del barrido, y reducción del dióxido de carbono, perlas de aluminio para remover el monóxido de carbono y parte del metano (CH_4), porque el restante es ventilado al espacio (Peterson, 2013; Stambaugh *et al.*, 2013).

Este ensamble es crítico dado que el incremento del dióxido de carbono metabólico del cuerpo humano puede generar cefalea y fatiga en los astronautas, que en medio de una tarea crítica puede significar una reducción de la alerta situacional (Barratt *et al.*, 2020; Nicogossian *et al.*, 2016).

Para misiones de tipo exploración, los esfuerzos de desarrollo se concentran en mejorar la confiabilidad de los sistemas de barrido de dióxido de carbono, reemplazar los adsorbentes y catalizadores obsoletos, y mejorar la eficiencia a más del 90 % de recuperación de oxígeno a partir del CO_2 ; el sistema debe tener menos masa y mejor calidad para minimizar la necesidad de mantenimiento. El WRS en el futuro podrá tener la capacidad de recuperar el 85 % del agua de la orina y tendrá un aditivo antimicrobiano para potabilizarla (Jernigan *et al.*, 2018).

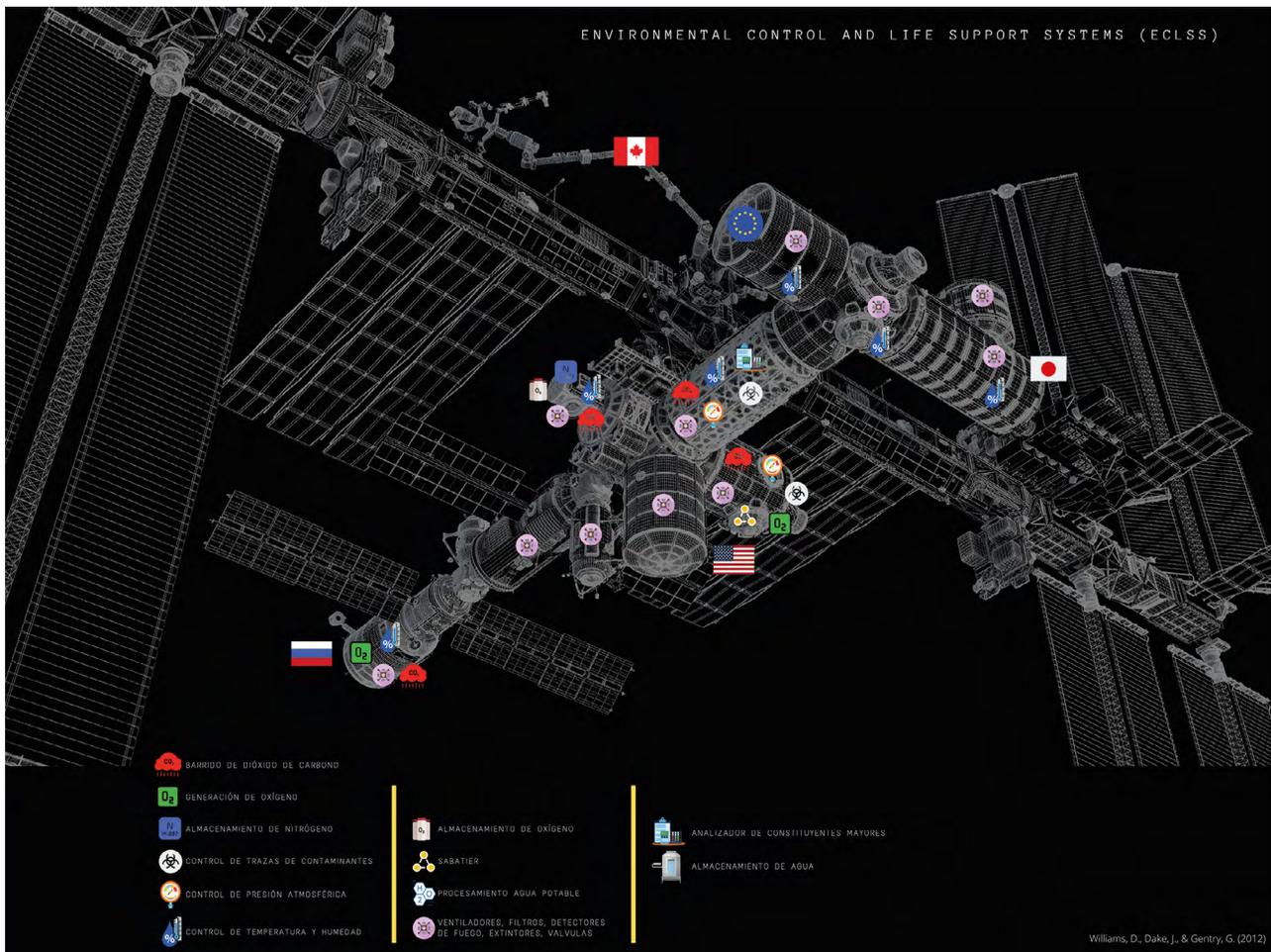


Figura 1. Distribución del sistema de soporte vital y control ambiental en la Estación Espacial Internacional

Fuente: Williams *et al.* (2012).

Monitoría de la composición del aire en la Estación Espacial Internacional

Dado que la composición de los gases es similar a la atmósfera terrestre, con nitrógeno (78 %) y oxígeno (21 %) entre otros, los compuestos consumibles deben ser reciclados y generados a través de un proceso electroquímico del agua y continuo monitoreo con sensores. La calidad del aire respirable, además, es vigilada mediante sensores infrarrojos y espectrometría de masa para el aire, con el fin de determinar la concentración de hidrógeno, dióxido de carbono, metano, presión de vapor de agua y nitrógeno (Ley *et al.*,

2009). También, hay sensores de oxígeno en tiempo real (Eckart, 2013), cuya información es mostrada en monitores y transmitida por telemetría a los diferentes centros de control de misión, teniendo como marco de referencia el documento de concentraciones máximas permisibles en el espacio (SMAC) (Ryder *et al.*, 2020).

Otros sensores dispuestos en la EEI incluyen: el monóxido de carbono (CO) mediante un detector electroquímico (SEQ); cianuro de hidrógeno y cloruro de hidrógeno entre 0,4 y 30 ppm; amonio mediante colorimetría entre 2 y 700 ppm en la cabina y dentro de las escotillas entre 15 y 90 ppm; hidracina entre 25 y 300 ppb; y tetróxido de nitrógeno entre 0,75 y 3 ppm (Nicogossian

et al., 2016). La exposición a un ambiente respirable con incrementos de estas sustancias puede incapacitar al astronauta y producirle la muerte en poco tiempo (American Conference of Governmental Industrial Hygienists [ACGIH], 2020; Cameron et al., 2020).

Diversas actividades en la EEI producen polución gaseosa, como los procesos de limpieza, soldadura, cocina, reparación y vaporización de los compuestos estructurales y materiales, por lo cual en el diseño se contempla la adecuación de filtros de alta eficiencia (HEPA, por sus siglas en inglés) y de carbón activado que atrapan aquellas moléculas con alto peso molecular y bajo peso molecular, como monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), hidrógeno (H₂), cianuro de hidrogeno (HCN), fluoruro de hidrogeno (HF), cloruro de hidrogeno (HCl) y otros hidrocarburos que son ventilados a un catalizador oxidativo de alta temperatura

para ser convertidos y reutilizados (Eckart, 2013), y los cartuchos de hidróxido de litio remueven los compuestos sobreoxidados (Davis et al., 2008).

Además de verificar el medio presurizado con sus componentes principales, otros productos derivados de fugas en la porción externa de la EEI que pueden entrar al aire respirable después de una actividad extravehicular (incluyendo el amonio y la hidracina) son vigilados (Jernigan et al., 2018). La porción rusa (Zvezda) de la EEI cuenta con dos sistemas que monitorean las características atmosféricas, cuyos rangos de operación son (Seedhouse, 2020):

1. PO₂: 0 – 350 mmHg (alarma activa en <120 mmHg)
2. PCO₂: 0 – 25 mmHg (alarma activa en >20 mmHg)
3. Presión de vapor de agua: 0 – 30 mmHg
4. Contenido de hidrógeno: 0 – 2,5 %

Tabla 2.
Descripción general de los niveles de peligro toxicológico en la Estación Espacial Internacional

Nivel de toxicidad	Irritación	Efectos sistémicos	Mitigación
0: Negligible	Irritación leve <30 min	Ninguno	Máscara a discreción de la tripulación
1: Crítico	Irritación leve a moderada de >30 min, requiere tratamiento	Efectos mínimos, no daño tisular	Puede o no ser contenido. Tripulación debe usar equipos de protección personal
2: Catastrófico	Irritación moderada a severa. Potencial de afectación negativa del rendimiento humano a largo plazo. Requiere tratamiento. Peligro ocular, puede haber daño del tejido	Efectos mínimos, no daño tisular	Puede ser contenido mediante limpieza. Tripulación debe usar equipos de protección personal
3: Catastrófico	Irritación moderada a severa, toxicidad sistémica. La irritación sola no se considera nivel 3.	Efectos visibles sobre coordinación, percepción, memoria o tiene la capacidad de causar lesión a largo plazo (cáncer) o daño tisular	Puede ser contenido mediante limpieza. Tripulación debe usar equipos de protección personal
4: Catastrófico	Irritación moderada a severa con potencial de reducción del rendimiento humano a largo plazo. Daño del tejido ocular permanente.	Similar a nivel 3	La tripulación no puede contener el material. El sistema de soporte vital y control ambiental es usado para descontaminar y la tripulación debe usar equipos de protección personal

Fuente: Lam et al. (1997).

Ambiente microbiológico en la Estación Espacial Internacional

Los parámetros para el monitoreo de agentes microbiológicos usan las unidades formadoras de colonia (UFC, por sus siglas en inglés), mediante la recolección de aire en un sustrato de agar en cultivo por 24 h y con recolección activa de muestras en superficies (La Duc *et al.*, 2004), y mediante identificación con pruebas moleculares (Pierson, 2007), cuyos límites han sido definidos por la NASA para hongos 10 000 ufc/m³, para bacterias de 100 ufc/m³ de aire, la misma cantidad de UFC por área de 100 cm² (La Duc *et al.*, 2004) y una tasa máxima de 1640 ufc/persona-min para bacteria y hongos (Pickett *et al.*, 2007). Los filtros de carbón activado tienen bactericidas que ayudan con la sanitación del ambiente respirable (Ley *et al.*, 2009) y los filtros HEPA permiten atrapar microorganismos de >0,3 μm con un 99,997% de eficiencia (Perry, 2017).

La calidad del agua debe ser vigilada para contacto y consumo, y se tiene regulado que su conteo bacteriano no debe ser mayor a 50 ufc/mL, no detectable para coliformes, hongos por 100 mL y no detectable para protozoos (NASA, 2019). Además, hay que asegurarse de que la calidad del agua consumible cumpla estándares de potabilidad que incluyen carbón inorgánico, constituyentes volátiles, metales y otras características como sabor, olor, turbidez, acidez y gases disueltos (Jernigan *et al.*, 2018).

Como resultado de la variedad de experimentos de microbiología que se realizan en la EEI, se pueden generar cepas que adquieran o muestren un incremento en la resistencia antimicrobiana o incluso virulencia que potencialmente afecte la salud de los astronautas en confinamiento, sobre todo si no se tiene soporte médico en misiones de tipo exploración (Bijlani *et al.*, 2021).

Dióxido de carbono

La PCO₂ en la atmósfera es de aproximadamente 0,3 mmHg en condiciones normales, pero dentro de un espacio cerrado un proceso electroquímico la mantiene a 3 mmHg (Virts, 2020). Esta elevación de diez veces

el valor respirable en la troposfera es producto del metabolismo celular.

El dióxido de carbono, que los seres humanos en condiciones de reposo producimos en una cantidad de 0,4 L/min o 600 L/día (±500g/día), se incrementa de 1 a 1,5 kg/día de acuerdo con el régimen de ejercicio físico (Barratt *et al.*, 2020). El ECLSS ha sido diseñado para soportar la carga metabólica de los astronautas en promedio de 82 kg, porque la media de peso por astronauta para 2015 era de 78 kg y un VO₂ máximo de 48 mL/kg/min ±6 mL/kg/min, y una tasa de intercambio respiratorio de 1,0 en ejercicio, dado que de esto depende la producción de CO₂ (Bayt y Lueders, 2016).

Los estándares de habitabilidad de la NASA mencionan que en operaciones nominales los sistemas de barrido deben limitar la PCO₂ en 3 mmHg a 1 h en el volumen del hábitat a 760 mmHg (NASA, 2019; Nicogossian *et al.*, 2016), dado a que se han observado efectos negativos en el rendimiento humano a ±12 mmHg y la correlación con síntomas es positiva desde los 15 mmHg hasta los 20 mmHg, cuyo valor ha sido definido como límite para declarar una emergencia (Barratt *et al.*, 2020). Sin embargo, estos valores están en revisión (Ryder *et al.*, 2020), con el fin de tener mayor correspondencia con el desempeño humano y al mismo tiempo prevenir la condición llamada “cerebro espacial” (Virts, 2020) por algunos astronautas.

Debido al efecto de la microgravedad sobre la convección, en las naves espaciales se pueden encontrar áreas con bajo flujo de aire que no logran dispersar el CO₂ acumulado alrededor del cuerpo y resultan en un área llamada “burbujas de CO₂”. En caso de que la tripulación esté en la obligación de trabajar en un módulo con defectos en la ventilación y para que el astronauta repare el defecto, debe llevar consigo el medidor portátil referenciando el valor de PCO₂ de 5,3 mmHg como límite superior para trabajar sin contramedidas. Pero si esta medida se incrementa entre 10 y 15 mmHg, se debe optimizar el barrido de CO₂; o toda vez que se presente cefalea, disnea o bajo rendimiento psicofísico, se hace necesaria la suplencia de O₂ e incluso cuando se requiera llevar a cabo alguna tarea crítica con la PCO₂ por encima de 20 mmHg (Barratt *et al.*, 2020).

Efectos del dióxido de carbono en el astronauta

En 1985, durante una misión para reparar Salyut 7, dos cosmonautas estuvieron expuestos en un módulo sin electricidad, sin ventilación ni control térmico, lo que ocasionó cefalea y letargia asociada a la acumulación de CO_2 (Newkirk, 1990). Las diversas experiencias de astronautas que han tenido síntomas durante las estadías en la EEI por la acumulación de dióxido de carbono motivaron a construir un modelo de dinámica de fluido para correlacionar el flujo de aire con la presión de CO_2 en un módulo de servicio. Encontraron que el astronauta, en el cuarto donde duerme con el ventilador apagado, construye una burbuja de gas bajo su nariz y tórax que supera los 8 mmHg en tan solo 10 min (Son *et al.*, 2002), no se dispersa y sus síntomas producen potencialmente despertares con importante cefalea (Nicogossian *et al.*, 2016).

Los síntomas agudos (minutos a horas) más frecuentes incluyen: disnea, sensación térmica alterada o sudoración, taquicardia y disestesias en dedos, entre otros. Hay diferencias significativas entre la incidencia de cefalea en los hombres (13%) y en las mujeres (37%); se presenta de manera tardía con un promedio tres a cinco síntomas por astronauta con diferencias individuales y temporales, por lo que varios autores recomiendan a las agencias espaciales realizar el entrenamiento fisiológico de exposición a CO_2 cada cinco años (Law *et al.*, 2017). Por el incremento de la P_iCO_2 , se desencadena una acidosis respiratoria que induce cambios de la ventilación por minuto de 2-3 L por cada 1 mmHg de CO_2 sin cambios en la PO_2 (Barer *et al.*, 1970).

En la EEI, se establece un límite de PCO_2 de 3 mmHg para operaciones nominales y un promedio de 5,3 mmHg en un curso de cinco días; sin embargo, con la evidencia emergente estos rangos son susceptibles de modificaciones. Las acciones correctivas incluyen la activación del sistema alterno si el promedio para un día excede los 3,5 mmHg por más de 9 h; y si un astronauta es sintomático y se sospecha que presenta hipercarbia, se debe parar la actividad y optimizar la ventilación alrededor, y proveer oxígeno en máscara si esto se acompaña de hipoxia (Barratt *et al.*, 2020).

Los hallazgos del consumo crónico de CO_2 en operaciones espaciales suele sumarse a los procesos adaptativos secundarios a microgravedad, contaminantes atmosféricos y radiación, por lo que hace difícil la separación causa-efecto precisa. Sin embargo, se ha observado que la exposición a PCO_2 de 25-30 mmHg de 7 a 15 días continuos produce disnea, cefalea, incremento del volumen por minuto cuatro veces el valor de base, trastornos del sueño y reducción de la tolerancia al ejercicio; y algunos autores sugieren la reducción del desempeño cognitivo en términos de toma de decisiones a pesar de ser tareas aprendidas y repetitivas (Allen *et al.*, 2016; Satish *et al.*, 2012). Se requieren más estudios en condiciones de microgravedad y ambiente de cabina similar a los astronautas de la EEI, dado que observaciones recientes han documentado un proceso de toma de decisiones sin alteraciones importantes a pesar del incremento del contenido de CO_2 respirado en personas jóvenes (Scully *et al.*, 2019) y submarinistas (Rodeheffer *et al.*, 2018).

Métodos de manejo del dióxido de carbono

La cabina de cualquier estructura espacial tripulada debe ser diseñada para proveer la atmósfera suficiente para el metabolismo oxidativo, pero también debe remover los productos de CO_2 y en la EEI se hace mediante un sistema electroquímico acompañado de ventilación con una velocidad entre 0,08 y 0,2 m/s (Barratt *et al.*, 2020).

Al combinar hidróxido de litio (LiOH) con CO_2 , se produce $\text{Li}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ en una reacción irreversible exotérmica que requiere diariamente 2 kg de LiOH para barrer el producto diario de un astronauta, lo que obliga a reemplazar los frascos de manera frecuente y lo hace impráctico para misiones de larga duración (Eckart, 2013).

En la EEI, los laboratorios de Estados Unidos y Rusia usan el sistema CDRA y aprovechan los tamices moleculares con piedras sintéticas de zeolita que remueven el dióxido de carbono del aire ambiental (Eckart, 2013). El módulo europeo aprovecha la capacidad de adsorción sobre la superficie, que consiste en una resina de intercambio iónico y la regeneración de

la cama saturada con dióxido de carbono usando agua a 110 °C a 1 atmósfera; el exceso puede ser usado para reciclar el oxígeno del proceso y si no, es ventilado al espacio (Ley *et al.*, 2009).

Entrenamiento de reconocimiento de síntomas por el dióxido de carbono

Este escenario debe ser estudiado por los astronautas durante toda su carrera, por lo cual es obligatorio realizar entrenamientos recurrentes y previos a las misiones de larga duración para reconocer los síntomas individuales y sortear situaciones de acumulación del dióxido de carbono en la EEI, en su compartimento de descanso, al igual que en reuniones para celebrar eventos especiales, cenar o en conferencias de prensa, en actividades extravehiculares, en el manejo de fuego en cabina y en tareas de reparación en un módulo con pobre ventilación (Law *et al.*, 2017).

Oxígeno

La disminución de la P_b en la EEI por cualquier razón resulta en la presentación de hipoxia hipobárica en la tripulación, y cuando hay solo una reducción de la producción de oxígeno con una P_b normal, se presenta la hipoxia normobárica (Clément, 2011; Rainford y Gradwell, 2016).

En la EEI, la PO_2 debe estar entre 146 y 178 mmHg con una P_b de 724 a 770 mmHg, teniendo en cuenta que el máximo valor de concentración de O_2 es de 24 % para la mayor parte de la EEI y para los sitios donde se hacen las operaciones de conexión al exterior (“airlocks”), y de 30 % (Barratt *et al.*, 2020; NASA, 2019) en condiciones nominales para asegurar un buen rendimiento fisiológico. Existen protocolos establecidos en casos de emergencia (ejemplo: fugas); si se afecta la presurización, el sistema debe incrementar la concentración de oxígeno a más de 30 % por tiempos limitados para no dejar que la P_iO_2 caiga por debajo de 128 mmHg y afecte el rendimiento humano. El punto mínimo de presurización de la EEI se ha definido en 490 mmHg, y cuando no haya otra posibilidad de solución, los astronautas deben abandonar la EEI (NASA,

2019). La fuente primaria de O_2 proviene de la electrólisis del agua, y como sistema redundante primario, se cuenta con un generador de oxígeno de combustible sólido; el sistema redundante secundario se ubica en almacenamiento de tanques en la porción externa del módulo presurizado de Estados Unidos. El proceso de electrólisis requiere dos moléculas de agua que a través de la inducción de electricidad generan dos moléculas de hidrógeno, una de oxígeno y calor mediante una tecnología de intercambio de protones en una membrana de polímero de ácido sulfónico perfluorado (Eckart, 2013).

El sistema ruso llamado Elektron es un generador de oxígeno de combustible sólido a través de electrólisis de agua con 30 % de hidróxido de potasio. El hidrógeno resultante es ventilado al espacio y tiene la capacidad de producir 25 L de oxígeno/h a partir del flujo de 1 L/ H_2O /h, que es suficiente para mantener con vida a un astronauta por día (Seedhouse, 2020). Los módulos europeos usan un proceso llamado electrólisis alcalina (Ley *et al.*, 2009) en una malla de asbesto, cuyo método se denomina electrólisis con alimentación estática de agua (Eckart, 2013).

En la EEI, al tener sistemas de circulación cerrados, es posible aprovechar las moléculas derivadas de la generación de dióxido de carbono a través del principio de Sabatier (Vogt *et al.*, 2019), como lo describe la figura 2, reduciéndolas con un catalizador a temperaturas entre 300 y 500 °C con el hidrógeno para que se produzca gas metano (CH_4), que es ventilado al exterior, y agua para consumo (Barratt *et al.*, 2020), con una eficiencia del 90 al 100 % (Ley *et al.*, 2009).

Requerimientos de oxígeno

El diseño de vehículos y estructuras habitacionales en el espacio considera un consumo promedio de 0,85 a 0,90 kg de O_2 por día por astronauta, teniendo en cuenta que la producción metabólica de CO_2 es de 1 kg/persona/día (Eckart, 2013). La separación electrolítica del agua requiere aproximadamente 0,956 kg de H_2O para garantizar que la producción sea suficiente para mantener con vida a la tripulación (Eckart, 2013). La tasa de masa de dióxido de carbono producida por masa de

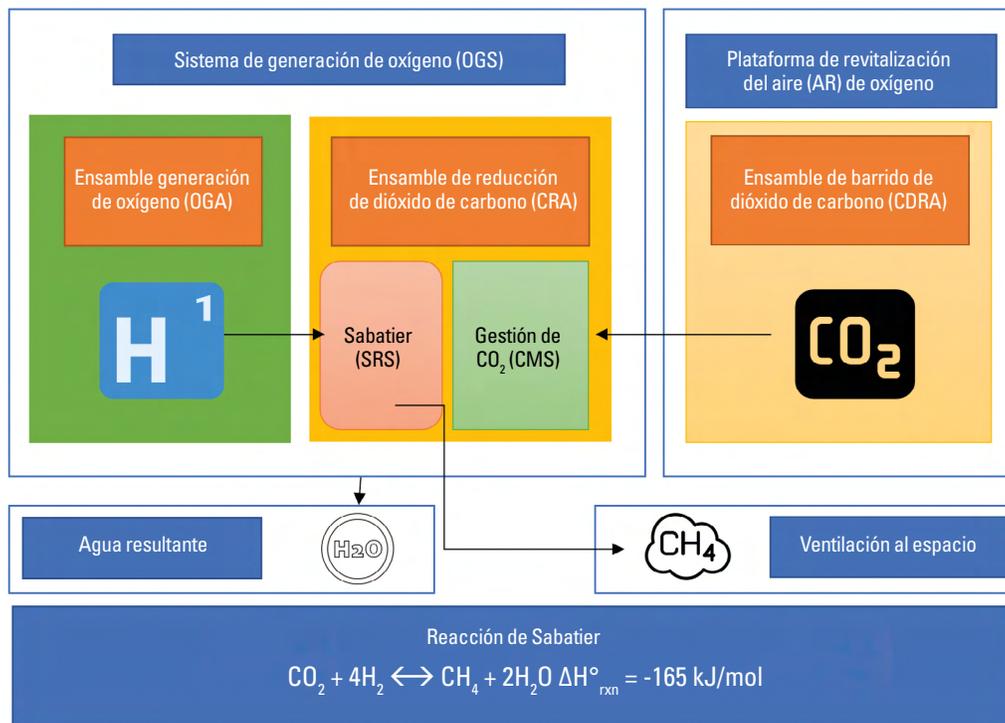


Figura 2. Sistema de revitalización del aire y reacción de Sabatier

Fuente: adaptación de Seedhouse (2020).

oxígeno consumida depende del catabolismo oxidativo de cada astronauta, se conoce como cociente respiratorio (RQ) o tasa de intercambio respiratorio (RER, por sus siglas en inglés) y esta depende del tipo de alimentación disponible. Por ejemplo, con carbohidratos el RQ es 1,0, con la oxidación de ácidos grasos o proteína es de 0,7 y con la alimentación ofrecida en la EEI se tiene un balance en el rango de 0,80 a 0,85 (Davis *et al.*, 2008). Contando que no todo el oxígeno es exhalado, sino que alrededor del 15% es metabolizado en agua para ser perspirado u orinado, se tiene una producción en promedio de 0,73 kg de O_2 + 0,27 de carbono si el cociente respiratorio está alrededor de 0,85 (Nicogossian *et al.*, 2016) para poder ser reutilizado (Eckart, 2013).

Efectos de la hipoxia en el astronauta

Ante el fenómeno de hipoxia, se incrementa la actividad de los quimiorreceptores de H^+ en el sistema nervioso central, que junto a los quimiorreceptores

periféricos en los cuerpos carotídeos y cuerpos aórticos responden directamente a la P_aO_2 , a la P_aCO_2 , y a H^+ , y esta información es llevada a través del nervio glosofaríngeo y vago que, con la participación de receptores de estiramiento pulmonar, de músculos y de articulaciones del tórax, estimulan el centro respiratorio en el bulbo raquídeo para incrementar el volumen y la frecuencia respiratoria compensando por esa deficiencia (Hall y Hall, 2020).

El rendimiento cognitivo y el desempeño físico son altamente afectados por la reducción de la P_aO_2 , que incluso en reposo le representa al sistema nervioso central casi el 20% del consumo de oxígeno (VO_2) (Raichle y Gusnard, 2002), independientemente de la demanda física impuesta en el astronauta. La disminución del aporte desencadena la activación de mecanismos compensadores que incluyen vasoconstricción pulmonar, redistribución del flujo y redistribución de la ventilación, los cuales que terminan en aumento de la presión de la arteria pulmonar (Swenson y Bärtisch,

2021) y en incremento de la frecuencia respiratoria y volumen por minuto (Hall y Hall, 2020).

El término usado para estimar los efectos de la hipoxia sobre el rendimiento psicofísico se denomina “tiempo efectivo de desempeño”, esto es, el periodo desde el inicio de la exposición al ambiente hipóxico hasta el momento en que puede tomar una acción correctiva, por ejemplo, buscar y ponerse la máscara de oxígeno, prender el regulador de oxígeno y configurarlo para remediar la situación (Rainford y Gradwell, 2016). Este periodo es variable de persona a persona y depende de otras situaciones que son posibles dentro del ambiente operativo en la EEI, como despresurización de la cabina, alta actividad física, comunicar al centro de control e incremento de la tasa metabólica; también depende de condiciones de base de la persona como la reducción de la masa eritrocitaria (cambios inducidos por la microgravedad) donde se espera que reduzcan este tiempo disponible (Nicogossian *et al.*, 2016). Es imperativo definir con mayor certeza estos tiempos en astronautas, porque los estudios han incluido solamente aviadores jóvenes (Davis *et al.*, 2008) sin exposición crónica a microgravedad.

Al estar aclimatados a una atmósfera de presión en la EEI, sumado a los efectos de la microgravedad, en caso de emergencia se espera que los astronautas reduzcan su desempeño neurocognitivo hasta en deterioro sutil de la P_b de 570 a 640 mmHg (Petrassi *et al.*, 2012), se incrementan los tiempos de reacción, y los procesos de atención y memoria son significativamente reducidos a 400 mmHg (Turner *et al.*, 2015).

En la exposición aguda, también se incrementa la vasodilatación retiniana; a una P_b de 500 mmHg se afecta significativamente la percepción y discriminación de tonos rojo-verde y azul-amarillo (Connolly *et al.*, 2008). La sensibilidad a la luz en la retina periférica se incrementa a una P_b en promedio de 300 mmHg (Horng *et al.*, 2008) y se amplía el tiempo de adaptación a la oscuridad a una P_b de 450 mmHg (Connolly y Hosking, 2006). Esto se traduce en una reducción de la capacidad visual en general, lo cual impone retos para los astronautas en el manejo de emergencias en una estructura habitable en el espacio en condiciones de hipoxia y oscuridad.

Para sumar estos problemas desencadenados por la hipoxia, una de las necesidades fisiológicas que más se relaciona con rendimiento cognitivo, atención, memoria visual y de trabajo, concentración, trabajo ejecutivo, control inhibitorio, entre otros, es el sueño (de Aquino Lemos *et al.*, 2012). Este se puede ver afectado por el patrón respiratorio con presencia de apneas centrales, exacerbación de las apneas obstructivas (Anders y Selim, 2021) y cambios de la arquitectura electroencefalográfica como los vistos en personas con insomnio (Stadelmann *et al.*, 2014; Venkat *et al.*, 2021).

Producción de nitrógeno

Para mantener la presión barométrica dentro de valores normales, se requiere la disociación térmica catalítica de hidracina (N_2H_4), que proviene del almacenamiento de propelente de vehículos espaciales y permite que a través de amonio (NH_3), un separador de hidrógeno y un oxidante catalítico se produzca nitrógeno e hidrógeno en una reacción exotérmica (Eckart, 2013).

Temperatura y humedad en la Estación Espacial Internacional

El objetivo del sistema de control de temperatura y humedad es mantener un ambiente confortable para que los astronautas trabajen sin afectar significativamente su fisiología de termorregulación, además de mantener la humedad relativa dentro de unos rangos específicos para reducir la probabilidad de condensación atmosférica que puede dañar los instrumentos abordo.

El calor generado por los equipos de soporte habitacional (como el electrolizador de agua para la producción de O_2 y el sistema de barrido de CO_2), los equipos electrónicos, el intercambiador de calor y los seres humanos, aumenta la energía térmica en la atmósfera de la EEI que debe ser regulada a través del sistema de circulación de aire y el exceso de energía térmica ventilada al exterior (Ley *et al.*, 2009).

Dos sistemas de control térmico son usados: el sistema pasivo mediante aislantes, recubrimientos de superficies, escudos de calor y calentadores (que a partir del balance de las propiedades de emisividad

y absorptividad de los materiales pueden mantener el balance térmico dentro de valores deseados), en la EEI hay instalados más de 300 calentadores en el exterior del segmento estadounidense (Rose, 1998); el sistema activo se compone de un intercambiador de condensación de calor (CHX), transfiere la carga térmica interna y el flujo térmico por uno o dos círculos de refrigeración, uno de ellos interno con agua y el otro externo con amoníaco con una capacidad de 75W de rechazo de calor (Davis *et al.*, 2008; Rose, 1998).

Los rangos de temperatura de confort están desde los 18 °C hasta los 27 °C durante operaciones nominales y no consideran los cambios dinámicos en otras actividades espaciales como movilidad extravehicular, ascenso, entrada en órbita, descenso, aterrizaje y postaterrizaje (NASA, 2019). Por eso, para estas actividades debe usarse el modelo “41-Node-Man” o “Wissler” para calcular la ganancia o pérdida de calor corporal con una confianza del 95 % (Pickett *et al.*, 2007).

El mecanismo termodinámico de convección en microgravedad afecta la pérdida de calor en el cuerpo humano. El sudor en actividad física se condensa en una capa gruesa que reduce la evaporación en la cabeza (Polyakov *et al.*, 2001) y obliga a los astronautas a usar una toalla para remover el exceso de sudoración de la piel, además de optimizar el flujo de aire en la zona de ejercicio de la EEI, debido al incremento de la temperatura corporal central de base y de la encontrada en el espacio durante el ejercicio (Fortney *et al.*, 1998; Stahn *et al.*, 2017).

La actividad metabólica humana en promedio genera entre 105 y 155 W/persona/día, y este proceso se adiciona al ambiente mediante la respiración y con un promedio de 2,3 kg de agua/persona/día, regulado en la EEI mediante un sistema que disminuye

la temperatura por debajo del punto de rocío formando de una película de condensación (Hapke *et al.*, 2003) y luego separándola de la corriente de aire (Pérez-Vara *et al.*, 2003) para nuevamente disponer del agua para consumo. La zona de confort de la HR% debe mantenerse entre 25 y 75% en un margen de 24 h (Pickett *et al.*, 2007), y debe medirse, recolectarse y grabarse para ser analizado en tiempo real y entender las tendencias.

La hipotermia resultante de la pérdida del control de temperatura de cabina puede poner en riesgo la vida y esto ya ha ocurrido en el pasado. En la “fallida y exitosa” misión de Apollo 13, donde la temperatura ambiental de 10 °C mantuvo a los astronautas en riesgo de sufrirla, afortunadamente se generaron soluciones para que se mantuviera un ambiente de la cápsula con un CO₂ normal usando dispositivos de hidróxido de litio del módulo lunar y adaptándolos al módulo de comando de manera exitosa (Lovell y Kluger, 2006).

Límites acústicos en órbita de la Estación Espacial Internacional

Estos límites están dispuestos para conservar la salud auditiva de los astronautas, prevenir interferencias en la comunicación y dar soporte al desempeño humano, por lo que el diseño habitacional de los módulos tripulados debe tener un plan de control de ruido acústico que incluye la estrategia de control de ruido, pruebas acústicas, análisis, y protocolo remedial y de seguimiento (NASA, 2019).

Para las operaciones orbitales de la EEI, se establecen los límites de presión de sonido continuo en bandas de octavos de decibeles (dB) re-20 μPa sin elementos de protección personal según la frecuencia en Hertz (Hz), como se describe en la tabla 3.

Tabla 3.
Límites SPL para ruido continuo en bandas de octavos, dB re-20 μPa

Frecuencia	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Máximo en áreas de trabajo (dB)	71	64	58	54	51	49	48	47	46
Máximo en áreas de sueño (dB)	64	56	50	45	41	39	38	37	36

Fuente: NASA (2019).

El ruido intermitente para el trabajo en 24 h no debe superar los 49 dB por un periodo de 8 h, y para trabajos menores a 30 min este no debe superar los 69dB (NASA, 2019).

Radiación electromagnética

El objetivo del ambiente habitacional es proveer protección a los tripulantes de la EEI contra el riesgo de radiación proveniente de partículas solares, radiación cósmica y radiación atrapada geomagnéticamente, manteniendo los principios de exposición tan bajos como sea racionalmente posible (ALARA); y las dosis recibidas están basadas en los trabajos con alto riesgo por el Consejo Nacional de Protección a la Radiación que limita a 0,05 Sv (5 rem)/año, y para astronautas en órbita terrestre baja hasta 0,5 Sv (50 rem) /año (Townsend y Fry, 2002). Un grupo de soporte de operaciones espaciales llamado SRAG (que por sus siglas en inglés significa Grupo de Análisis de Radiación Espacial), en el Centro Espacial Johnson, considera parámetros como la altitud, la inclinación de la órbita, el estado de la zona interna y externa de los cinturones de protones, el flujo de protones interplanetario, las condiciones del campo geomagnético y el ciclo solar para administrar el riesgo de exposición y dar recomendaciones para actividades extravehiculares (Barratt *et al.*, 2020; Davis *et al.*, 2008).

Los equipos de medición abordo para consolidar la dosimetría de cada astronauta, transmitida en tiempo real vía telemetría, incluyen: el detector para análisis de radiación (RAD, por su siglas en inglés) de partículas cargadas y neutrones, el contador proporcional al tejido (TEPC, por su siglas en inglés), el telescopio de Dosis y Dostel de la agencia espacial alemana y el RD-8 Lulin de Rusia. Los monitores de radiación por área (RAM, por su siglas en inglés) se encuentran en todos los volúmenes habitables y son rotados cuando se cambia la tripulación; junto al dosímetro personal de cada astronauta, son útiles para el análisis de datos posvuelo y su análisis se incluye dentro de su historial médico (Barratt *et al.*, 2020; Rose, 1998).

La exposición a radiación electromagnética no ionizante proviene de fuentes naturales como las emisiones solares ultravioletas, rango de luz visible, infrarrojo,

radiofrecuencia de baja intensidad en 2800 MHz, campos magnéticos y los producidos por el hombre, como los equipos de comunicaciones, láser, luces y en general todos los electrónicos que requieren fuente de electricidad. Los límites de exposición adoptados por la NASA pertenecen al Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) C95,1, a pesar de que para 2019 no se especifican los aspectos relacionados con la exposición en el espacio exterior, teniendo el ambiente específico de órbita terrestre baja (IEEE, 2019).

La protección ofrecida a los astronautas ante la presencia de láser debe estar acorde a lo estipulado en ANSI Z136,1 y en la ACGIH para limitar la exposición cutánea y ocular a los pulsos repetidos y a las ondas, al igual que la radiación electromagnética incoherente relajando los límites por un factor de cinco, excepto el cálculo para la exposición en la frecuencia de ultravioleta (ACGIH, 2020; NASA, 2019; Pickett *et al.*, 2007).

Conclusiones

La permanencia humana en el espacio ha ganado momento en los últimos años por el esfuerzo de investigación y desarrollo tecnológico para soportar la vida en otros cuerpos celestes. La decisión de regresar a la Luna para tener presencia continua como plataforma de aprendizaje y dar el siguiente paso al planeta Marte requiere que las tecnologías disponibles evolucionen para uso de recursos *in situ* y que se habilite la posibilidad de extender el tiempo de exploración humana espacial. Sin duda, se necesitará voluntad investigativa de todas las áreas del conocimiento en ambientes análogos, a fin de gestionar todas las variables asociadas a mantener con vida a los astronautas sin afectar significativamente su salud y mantener un rendimiento óptimo durante su misión (Siegel *et al.*, 2022).

La EEI ha servido por décadas como laboratorio y como plataforma análoga para misiones de tipo exploración. Sus sistemas de soporte de vida han sido probados de manera continua en microgravedad. Existe el reto adicional de actualizar los sistemas para exploración del espacio profundo y de garantizar su función

en condiciones de gravedad parcial como la encontrada en la superficie de la Luna y de Marte, donde el ambiente presurizado será diferente a la EEI, generando un medio hipobárico con una mezcla enriquecida de oxígeno (34%) para garantizar el rendimiento físico del astronauta (Ridley *et al.*, 2022).

Además, los ensamblajes tecnológicos tendrán la capacidad de almacenar un intercambiador de condensación de calor con mejor control microbiológico para remover compuestos volátiles orgánicos, y un barredor de dióxido de carbono más eficiente con mayor capacidad de aprovechar el metano producto de la reacción de Sabatier para descomponerlo en hidrógeno adicional y utilizarlo para sintetizar mayor cantidad de agua. Estos experimentos serán lanzados a la EEI en 2024, con el objetivo de evaluar su confiabilidad, eficiencia y que sirvan de plataformas para misiones más largas con mayor independencia de la Tierra (Bagdigian *et al.*, 2015; C. Escobar *et al.*, 2017; Ridley *et al.*, 2022).

Es necesario, entonces, que el ECLSS en misiones de tipo exploración mantenga la habilidad de conservar las condiciones de habitabilidad para la supervivencia y productividad de la tripulación en un amplio rango de condiciones, y que tenga confiabilidad, resiliencia y una sobrevida suficiente para misiones de más de tres años de duración (Bagdigian *et al.*, 2015; C. Escobar *et al.*, 2017, 2019; Jernigan *et al.*, 2018; Ridley *et al.*, 2022). Las emergencias que alteren los parámetros atmosféricos de los hábitats podrían traer consecuencias letales o limitar el rendimiento en una tarea crítica. La distancia a la Tierra y el escaso soporte logístico para una evacuación hacen necesario que el entrenamiento desde las plataformas análogas espaciales sea incorporado y evaluado (Bejarano *et al.*, 2022; Terhorst y Dowling, 2022).

Entre los efectos fisiopatológicos de la falla de los sistemas de control ambiental encontramos: hipoxia, hipercarbia, disbarismos, enfermedad descompresiva, ebullismo, hipoacusia, infecciones, intoxicaciones, estrés térmico, cáncer, enfermedades degenerativas y alteraciones neurocognitivas que impactan negativamente la toma de decisiones en un contexto de exposición extrema (Nicogossian *et al.*, 2016).

Colombia tiene interés en participar en misiones de tipo exploración espacial humana, dado que en 2022 ha firmado los acuerdos Artemisa con la NASA y esto obliga a la academia a incluir dentro de sus programas educativos la doctrina para el entendimiento integral entre el ambiente y el rendimiento humano en el espacio, siendo un aspecto crítico para misiones a la Luna y a Marte. El ser humano debe ser seleccionado y entrenado para mantener un desempeño normal en condiciones de exposición extrema, garantizando el cumplimiento de las misiones asignadas. Además, debe ser preparado para responder en caso de emergencia derivado de un fallo del ECLSS, tal como ha mostrado la historia con el evento de seguridad presentado en Apollo 13, cuando la tripulación estuvo expuesta a un ambiente de cabina hostil por baja temperatura e incremento del dióxido de carbono derivado de la explosión de un tanque de oxígeno requerido para mantener el aire respirable durante su misión a la Luna, lo cual los obligó a regresar a la Tierra de manera exitosa (Lovell y Kluger, 2006).

Referencias

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). (2020). *TLVs and BEIs based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices*. ACGIH.
- Alfano, C. A., Bower, J. L., Cowie, J., Lau, S. y Simpson, R. J. (2018). Long-duration space exploration and emotional health: Recommendations for conceptualizing and evaluating risk. *Acta Astronautica*, 142, 289-299. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.009>
- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J. y Spengler, J. D. (2016). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805-812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Anders, G. y Selim, B. J. (2021). Sleep disordered breathing at high altitude. *Complex sleep breathing disorders: A clinical casebook of challenging patient* (C. Won, ed.; pp. 177-184). Springer.

- Auerbach, P. S., Cushing, T. A. y Harris, N. S. (2016). *Auerbach's wilderness medicine e-book*. Elsevier Health Sciences.
- Bagdigian, R. M., Dake, J., Gentry, G. y Gault, M. (2015). *International Space Station environmental control and life support system mass and crew-time utilization in comparison to a long duration human space exploration mission* [ponencia]. 45th International Conference on Environmental Systems-ICES, 13-17 July, Seattle, Washington. <http://hdl.handle.net/2346/64374>
- Barer, G. R., Howard, P. y Shaw, J. W. (1970). Stimulus — Response curves for the pulmonary vascular bed to hypoxia and hypercapnia. *The Journal of Physiology*, 211(1), 139-155. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1970.sp009271>
- Barratt, M. R., Baker, E. S. y Pool, S. L. (2020). Principles of clinical medicine for space flight. *Principles of clinical medicine for space flight* (M. R. Barrat, Baker E. S y S. L. Pool, eds.). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9889-0>
- Bayt, R. L. y Lueders, K. L. (2016). *ISS crew transportation and services requirements document*. NASA. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170001943/downloads/20170001943.pdf>
- Bejarano, X., Malpica, D., Cortés, D., Campos, C., Buitrago, N., Jiménez, G., Harasymczuk, M., Hettrich, S. y Kolodziejczyk, A. (2022). *Astronaut training and analysis of human performance during the human operational research space analog simulation* [ponencia]. 73rd International Astronautical Congress (IAC).
- Bijlani, S., Stephens, E., Singh, N. K., Venkateswaran, K. y Wang, C. C. C. (2021). Advances in space microbiology. *IScience*, 24(5), 102395. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102395>
- Biswal M, M. K., Gómez-Fernández, D., Das, N. B. y Kumar V, R. (2021). Design study and validation of Mars underground habitat for human settlement on Mars. *AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2021-3725>
- Cameron, P., Little, M. y Mitra, B. (2020). *Textbook of adult emergency medicine* (5.ª ed.; vol. 1). Elsevier.
- Carrasquillo, R. L., Reuter, J. L. Y Philistine, C. L. (1997). *Summary of resources for the International Space Station environmental control and life support system*. SAE Technical Paper.
- Clément, G. (2011). Fundamentals of space medicine. *Space technology library* (2.ª ed.; vol. 17). Microcosm Press; Springer.
- Connolly, D. M., Barbur, J. L., Hosking, S. L. y Moorhead, I. R. (2008). Mild hypoxia impairs chromatic sensitivity in the mesopic range. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 49(2), 820-827. <https://doi.org/10.1167/iovs.07-1004>
- Connolly, D. M. y Hosking, S. L. (2006). Aviation-related respiratory gas disturbances affect dark adaptation: A reappraisal. *Vision Research*, 46(11), 1784-1793. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.10.027>
- Cortright, E. M. (2019). *Apollo expeditions to the Moon: The NASA history: 50th Anniversary Edition*. Courier Dover Publications.
- Creech, S., Guidi, J. y Elburn, D. (2022). Artemis: An overview of NASA's activities to return humans to the Moon. *2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)*. Pages 1-7.
- Davis, J. R., Johnson, R. y Stepanek, J. (2008). *Fundamentals of aerospace medicine* (4.ª ed). Lippincott Williams & Wilkins.
- De Aquino Lemos, V., Antunes, H. K. M., Dos Santos, R. V. T., Lira, F. S., Tufik, S. y De Mello, M. T. (2012). High altitude exposure impairs sleep patterns, mood, and cognitive functions. *Psychophysiology*, 49(9), 1298-1306. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01411.x>
- DeLucas, L. J. (1996). International Space Station. *Acta Astronautica*, 38(4-8), 613-619. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(96\)00056-2](https://doi.org/10.1016/0094-5765(96)00056-2)
- Deplano, R. (2021). The Artemis Accords: Evolution or Revolution in International Space Law? *International & Comparative Law Quarterly*, 70(3), 799-819. <https://doi.org/10.1017/S0020589321000142>
- Eckart, P. (2013). *Spaceflight life support and biospherics* (vol. 5). Springer Science & Business Media.
- Escobar, C., Nabity, J. y Escobar, A. (2019). *Quantifying ECLSS robustness for deep space exploration*. <https://hdl.handle.net/2346/84455>
- Escobar, C., Nabity, J. y Klaus, D. (2017). *Defining ECLSS robustness for deep space exploration*. <http://hdl.handle.net/2346/73061>
- Fortney, S. M., Mikhaylov, V., Lee, S. M., Kobzev, Y., Gonzalez, R. R. y Greenleaf, J. E. (1998). Body temperature and thermoregulation during submaximal exercise after 115-day spaceflight. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 69(2), 137-141. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9491252/>
- Hall, J. E. y Hall, M. E. (2020). *Guyton and Hall textbook of medical physiology*. Elsevier Health Sciences.

- Hapke, J., Ranong, C. N., Brodt, K. y Tan, G. (2003). *Temperature and humidity control by means of a Membrane based Condensing Heat Exchanger (MCHX)*. SAE Technical Paper.
- Horie, M., Kambara, T., Kuroda, E., Miki, T., Honma, Y., Aoki, S. y Morimoto, Y. (2012). Possibility of exacerbation of allergy by lunar regolith. *Journal of University of Occupational and Environmental Health, Japan UOEH*, 34(3), 237-243. <https://doi.org/10.7888/juoeh.34.237>
- Horg, C.-T., Liu, C.-C., Wu, D.-M., Wu, Y.-C., Chen, J.-T., Chang, C.-J. y Tsai, M.-L. (2008). Visual fields during acute exposure to a simulated altitude of 7620 m. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 79(7), 666-669. <https://doi.org/10.3357/asm.2160.2008>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2019). *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8859679>
- Jernigan, M., Gatens, R., Perry, J. y Joshi, J. (2018). *The next steps for environmental control and life support systems development for deep space exploration*. <http://hdl.handle.net/2346/74222>
- Kennedy, A. R. (2014). Biological effects of space radiation and development of effective countermeasures. *Life Sciences in Space Research*, 1, 10-43. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2014.02.004>
- Kourtidou-Papadeli, C. (2022). Effects of spaceflight on the nervous system. *Handbook of Space Pharmaceuticals* (Y. V. Pathak, M. Araújo dos Santos, L. Zea, eds.; pp. 521-553). Springer.
- La Duc, M. T., Kern, R. y Venkateswaran, K. (2004). Microbial Monitoring of Spacecraft and Associated Environments. *Microbial Ecology*, 47(2), 150-158. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-1012-0>
- Lam, C. W., Coleman, M. E. y García, H. D. (1997). *Guidelines for assessing the toxic hazard of spacecraft chemicals and test materials*. NASA-Johnson Space Center.
- Law, J., Young, M., Alexander, D., Mason, S. S., Wear, M. L., Méndez, C. M., Stanley, D., Ryder, V. M. y Van Baalen, M. (2017). Carbon dioxide physiological training at NASA. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 88(10), 897-902. <https://doi.org/10.3357/amhp.4552.2017>
- Lee, P. H. U., Chung, M., Ren, Z., Mair, D. B. y Kim, D. H. (2022). Factors mediating spaceflight-induced skeletal muscle atrophy. *American Journal of Physiology – Cell Physiology*, 332(3). <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00203.2021>
- Ley, W., Wittmann, K. y Hallmann, W. (Eds.) (2009). *Handbook of Space Technology* (vol. 22). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470742433>
- Lovell, J. y Kluger, J. (2006). *Apollo 13*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Man, J., Graham, T., Squires-Donnelly, G. y Laslett, A. L. (2022). The effects of microgravity on bone structure and function. *NPJ Microgravity*, 8(1), 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41526-022-00194-8>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2019). *NASA Spaceflight Human-System Standard. Volume 2: Human factors, habitability, and environmental health*. NASA.
- Newkirk, D. (1990). *Almanac of soviet manned space flight*. Gulf Pub Co.
- Nicogossian, A. E., Williams, R. S., Huntoon, C. L., Doarn, C. R., Polk, J. D. y Schneider, V. S. (2016). *Space physiology and medicine: From evidence to practice* (4.a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6652-3>
- Pagel, J. I. y Choukèr, A. (2016). Effects of isolation and confinement on humans-implications for manned space explorations. *Journal of Applied Physiology*, 120(12), 1449-1457. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00928.2015>
- Pérez-Vara, R., Mannu, S., Pin, O. y Müller, R. (2003). *Overview of European Applications of EcosimPro to ECLSS, CELSS, and ATCS*. SAE Technical Paper.
- Perry, J. L. (2017). *Trace contaminant control for the International Space Station's Node 1 – Analysis, Design, and Verification*. NASA Technical Publication.
- Peterson, L. J. (2013). *Environmental Control and Life Support System (ECLSS) System Engineering Workshop*. BiblioGov.
- Petrassi, F. A., Hodkinson, P. D., Walters, P. L. y Gaydos, S. J. (2012). Hypoxic hypoxia at moderate altitudes: review of the state of the science. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 83(10), 975-984. <https://doi.org/10.3357/asm.3315.2012>
- Pickett, L., Connolly, J., Arch, M., Tillman, B. y Russo, D. (2007). *NASA-STD 3001 and the Human Integration Design Handbook (HIDH): Evolution of NASA-STD-3000*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20070017247>
- Pierson, D. L. (2007). Microbial contamination of spacecraft. *Gravitational and Space Research*, 14(2). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11865864/>
- Polyakov, V. V., Lacota, N. G. y Gundel, A. (2001). Human thermohomeostasis onboard “Mir” and in simulated microgravity studies. *Acta Astronautica*, 49(3-10), 137-143. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(01\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(01)00091-1)

- Raichle, M. E. y Gusnard, D. A. (2002). Appraising the brain's energy budget. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(16), 10237-10239. <https://doi.org/10.1073/pnas.172399499>
- Rainford, D. y Gradwell, D. P. (2016). *Ernsting's aviation and space medicine* (5.ª ed). CRC Press; Taylor & Francis Group.
- Ridley, A. H., Shaw, L. A., Brown, C. A., Garr II, J. D., Gavin, L. L., Hornyak, D. M., Matty, C. M., Toon, K. P. y Caradec, P. A. (2022). *International Space Station as a testbed for exploration environmental control and life support systems-2022 Status* [ponencia]. 51st International Conference on Environmental Systems ICES.
- Robinson, J. A., Waid, M. C., Korth, D., Rucker, M. y Renfrew, R. (2019). *Innovative approaches to using the International Space Station as a Mars-transit analog* [ponencia]. International Astronautical Congress.
- Rodeheffer, C. D., Chabal, S., Clarke, J. M. y Fothergill, D. M. (2018). Acute exposure to low-to-moderate carbon dioxide levels and submariner decision making. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 89(6), 520-525. <https://doi.org/10.3357/AMHP.5010.2018>
- Rose, D. (1998). International space station familiarization. En Progressive Management, *Inside the International Space Station (ISS): NASA International Space Station Familiarization Astronaut Training Manual — Comprehensive Review of ISS Systems*. NASA.
- Ryder, V., McCoy, J. y Hayes, J. (2020). *Spacecraft maximum allowable concentrations for airborne contaminants*. NASA. <https://standards.nasa.gov/standard/jsc/jsc-20584>
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S. y Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 1671-1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- Scully, R. R., Basner, M., Nasrini, J., Lam, C.-W., Hermosillo, E., Gur, R. C., Moore, T., Alexander, D. J., Satish, U. y Ryder, V. E. (2019). Effects of acute exposures to carbon dioxide on decision making and cognition in astronaut-like subjects. *NPJ Microgravity*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s41526-019-0071-6>
- Seedhouse, E. (2020). *Life support systems for humans in space*. Springer.
- Siegel, B., Spry, J. A., Wallace, S. L., Robinson, J. A., Broyan, J. y Mahoney, E. (2022). *Development of a NASA Roadmap for Planetary Protection to prepare for the first Human Missions to Mars* [ponencia]. 44th COSPAR Scientific Assembly, 16-24 July.
- Son, C. H., Zapata, J. L. y Lin, C.-H. (2002). *Investigation of air-flow and accumulation of carbon dioxide in the service module crew quarters*. SAE Technical Paper.
- Stadelmann, K., Latshang, T. D., Tarokh, L., Lo Cascio, C. M., Tesler, N., Stoewhas, A., Kohler, M., Bloch, K. E., Huber, R. y Achermann, P. (2014). Sleep respiratory disturbances and arousals at moderate altitude have overlapping electroencephalogram spectral signatures. *Journal of Sleep Research*, 23(4), 463-468. <https://doi.org/10.1111/jsr.12131>
- Stahn, A. C., Werner, A., Opatz, O., Maggioni, M. A., Steinach, M., Von Ahlefeld, V. W., Moore, A., Crucian, B. E., Smith, S. M., Zwart, S. R., Schlabs, T., Mendt, S., Trippel, T., Koralewski, E., Koch, J., Chouker, A., Reitz, G., Shang, P., Röcker, L., et al. (2017). Increased core body temperature in astronauts during long-duration space missions. *Scientific Reports*, 7(1), 1-8. <https://epub.ub.uni-muenchen.de/50239/>
- Stambaugh, I. C., Baccus, S., Naidis, A. J., Borrego, M., Hanford, A., Eckhardt, B., Allada, R. K. y Yagoda, E. (2013). *Environmental controls and life support system (ECLSS) design for a multi-mission space exploration vehicle (MMSEV)*. 43rd International Conference on Environmental Systems.
- Stapleton, T., Heldmann, M., Schneider, S., O'Neill, J., Samplatsky, D., White, K. y Corallo, R. (2016). *Environmental control and life support for deep space travel*. <http://hdl.handle.net/2346/74271>
- Swenson, E. R. y Bärtsch, P. (2021). The search for a model of high-altitude pulmonary oedema must continue. *Acta Physiologica*, 231(1), e13485. <https://doi.org/10.1111/apha.13485>
- Tanaka, K., Nishimura, N. y Kawai, Y. (2017). Adaptation to microgravity, deconditioning, and countermeasures. *The Journal of Physiological Sciences*, 67(2), 271-281. <https://doi.org/10.1007/s12576-016-0514-8>
- Terhorst, A. y Dowling, J. A. (2022). *Terrestrial analogue research to support human performance on Mars: A review and bibliographic analysis*. <https://downloads.spj-science.org/space/aip/9841785.pdf>
- Thomas, K. S. y McMann, H. J. (2011). *US spacesuits*. Springer Science & Business Media.
- Townsend, L. W. y Fry, R. J. M. (2002). Radiation protection guidance for activities in Low-Earth orbit. *Advances in Space Research*, 30(4), 957-963. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00160-6)
- Turner, C. E., Byblow, W. D. y Gant, N. (2015). Creatine supplementation enhances corticomotor excitability and

cognitive performance during oxygen deprivation. *Journal of Neuroscience*, 35(4), 1773-1780. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3113-14.2015>

Venkat, D., Dhillon, K. y Rowley, J. A. (2021). Effects of high altitude on sleep and respiratory system. *Current Pulmonology Reports*, 10, 103-109.

Virts, T. (2020). *How to astronaut: An insider's guide to leaving planet Earth*. Workman Publishing.

Vogt, C., Monai, M., Kramer, G. J. y Weckhuysen, B. M. (2019). The renaissance of the Sabatier reaction and its applications on Earth and in space. *Nature Catalysis*, 2(3), 188-197. <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0244-4>

Williams, D., Dake, J. y Gentry, G. (2012). *International Space Station environmental control and life support system status for the prior year: 2010-2011* [ponencia]. 42nd International Conference on Environmental Systems.