

REVISTA CIENTÍFICA DE ASTROBIOLOGÍA



ASPAST

Asociación Española de Astrobiología

Revista Científica de Astrobiología

Vol. 2 / N° 2 julio-diciembre, 2025

© Asociación Peruana de Astrobiología
Calle Santa Cruz MZ A Lt 8 Las Flores de Villa
Lima, Peru
aspast@astrobiologia.pe
Depósito Legal N° 2024-08782
ISSN: 3028-9866 (En línea)
doi: 10.69976/aspast.v2n2

Equipo Editorial

Dr. Octavio A. Chon Torres

Director Editorial

Asociación Peruana de Astrobiología / Universidad de Lima

COMITÉ EDITORIAL

Dra. Roxana Yesenia Pastrana Alta

Universidad Nacional de Ingeniería

Med. Vet. César Andreé Murga-Moreno

Universidad Nacional de Cajamarca

Blga. Meissy Montes

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Maricielo Alejandra Vera Riega

Universidad Científica del Sur

Mg. Saby Evelyn Lazarte Oyague

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

COMITÉ CIENTÍFICO

Ph.D. Steven Dick

Former NASA Chief Historian and Former Baruch S. Blumberg NASA/Library of Congress Chair in Astrobiology, Estados Unidos

Ph.D. Margaret Boone Rappaport

Co Founder at The Human Sentience Project, Estados Unidos

Prof. Dr. Jesús Martínez-Frías

Universidad Complutense de Madrid / Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

Dr. Roberto Aretxaga Burgos

Universidad de Deusto, España

Ph.D. Tony Milligan

Department of Theology and Religious Studies, King's College London, Reino Unido

Ph. D. Sun Kwok

University of British Columbia, Canadá

Ph.D. Christopher Corbally

Vatican Observatory, Vaticano

Ph.D. Erik Persson

Lund University, Suecia

Ph.D. David Dunér

Lund University, Suecia

Ph.D. Julián Chela-Flores

The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Italia

Ph.D. Jorge Enrique Bueno Prieto

Director del Instituto de Astrobiología de Colombia, Colombia

Ph.D. Julio Valdivia Silva

Universidad de Ingeniería y Tecnología, Perú

MSc. Holger Saul Perez Montaña

Director de Innovación y Transferencia Tecnológica

Director de Arrhenius Research Institute, Perú

Mg. Jose Luis Solis Toscano

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

EQUIPO TÉCNICO

Edmundo Alfredo Vidal Saenz

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Sharon Helen Jurado Reyes

Universidad Nacional Agraria La Molina

Carlos Eduardo Cetraro Tello

Universidad de Lima

José Antonio Mamani Rojas

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Janette Manuela Pinto Apolinario

Universidad Nacional Federico Villarreal

Duvernlyn Josué Mendoza Villanueva

Universidad Nacional Federico Villarreal

Rossana Maguiño Napurí

Independiente

Aaron Zuñiga Condori

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas

Jehoshua Macedo Bedoya

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Jorge Abraham Hernández Rodríguez

Universidad Privada del Norte

Angel Cristel Chuqui Ogoña

Universidad Privada del Norte

Kleber Victor Bautista Baygorrea

Universidad Nacional de Ingeniería

Rivaldo Carlos Duran Aquino

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Sofia Secibel Casabona Miranda

Universidad Nacional Federico Villarreal

Julio Jesús Reyes Salazar

Universidad Nacional Federico Villarreal

Hanz Juan Salazar Ibáñez

Universidad de Concepción, Chile

Diego Dueñas Parapar

Space Generation Advisory Council,
Austria

Jhann Carlo Reyes Morales

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Filosofía de la Guerra en el Espacio

Miguel Ángel Espinoza Soria¹

<https://orcid.org/0009-0006-7327-3028>

¹Universidad Marcelino Champagnat, Lima, Perú

Recibido: 06/06/2025 • Revisado: 20/07/2025 • Aceptado: 01/08/2025

Resumen

El presente trabajo reflexiona sobre la relevancia de la exploración espacial en un mundo marcado por profundas crisis políticas y sociales. Aunque pueda parecer muy contradictorio invertir tanto tiempo y dinero en Astrobiología o Astronomía, cuando millones de personas viven en condiciones precarias, el estudio del cosmos permite adquirir una perspectiva más amplia y ética sobre la propia existencia humana. A través del pensamiento filosófico y científico, se plantea que conocer el universo también implica una responsabilidad moral con nuestro planeta. Por ello, se abordan desafíos como la militarización del espacio, el egoísmo en la geopolítica y la pérdida de la confianza en la cooperación internacional, resaltando la importancia de recuperar una visión colaborativa y ética de la ciencia. El texto argumenta que la investigación espacial debe orientarse al bien común, combinando rigor intelectual con sensibilidad moral, evitando repetir los viejos errores cometidos en la Tierra. Una renovada mirada al cielo, en vez de alejarnos de nuestra realidad, debería inspirarnos a construir juntos un futuro más justo, pacífico y sostenible para la humanidad.

Palabras clave: Astrobiología, ética, exploración espacial, cooperación internacional, militarización del espacio

Citar como:

Espinoza Soria, M. Á. (2025). Filosofía de la guerra en el espacio. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(2), 1–15. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n2.1>

RESEARCH ARTICLE

Philosophy of Space Warfare

Miguel Ángel Espinoza Soria¹

<https://orcid.org/0009-0006-7327-3028>

¹Universidad Marcelino Champagnat, Lima, Perú

Recibido: 06/06/2025 • Revisado: 20/07/2025 • Aceptado: 01/08/2025

Abstract

This paper reflects on the relevance of space exploration in a world marked by profound political and social crises. While it may seem contradictory to invest so much time and money in Astrobiology or Astronomy when millions of people live in precarious conditions, the study of the cosmos allows us to acquire a broader and more ethical perspective on human existence itself. Through philosophical and scientific thought, it is argued that understanding the universe also implies a moral responsibility toward our planet. Therefore, challenges such as the militarization of space, selfishness in geopolitics, and the loss of trust in international cooperation are addressed, highlighting the importance of recovering a collaborative and ethical vision of science. The text argues that space research should be oriented toward the common good, combining intellectual rigor with moral sensitivity, avoiding repeating the mistakes of the past. A renewed gaze at the sky, instead of distancing us from our reality, should inspire us to build together a more just, peaceful, and sustainable future for humanity.

Keywords: Astrobiology, ethics, space exploration, international cooperation, space militarization

Citar como:

Espinoza Soria, M. Á. (2025). Filosofía de la guerra en el espacio. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(2), 1–15. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n2.1>

Introducción

La exploración del espacio ha sido, desde sus inicios, una manifestación del ingenio humano, del deseo por comprender el universo y por encontrar respuestas a preguntas tan antiguas como profundas: ¿De dónde venimos?, ¿Por qué existimos?, ¿Estamos solos en el cosmos? Sin embargo, en pleno siglo XXI, la investigación espacial se desarrolla en un escenario marcado por tensiones geopolíticas, intereses militares y rivalidades tecnológicas. La carrera espacial contemporánea, lejos de ser un proyecto colaborativo en favor de la humanidad, reproduce lógicas de competencia, vigilancia y hegemonía propias de la guerra. Este texto propone una reflexión filosófica en torno a la militarización del espacio, el egoísmo nacionalista y la pérdida del espíritu de cooperación científica internacional. A partir del pensamiento de autores como Carl Sagan, Stephen Hawking, Hans Jonas y Donna Haraway, se aborda la necesidad urgente de una ética global que oriente la exploración cósmica, evitando trasladar al universo los errores cometidos en la Tierra. Solo una mirada crítica, profundamente humana y consciente de nuestras responsabilidades, puede abrir caminos hacia un futuro espacial verdaderamente pacífico, justo y sostenible.

Con los pies puestos en la Tierra

¿Por qué tenemos que preocuparnos por problemas de allá arriba en el cielo, cuándo tenemos graves problemas aquí en la Tierra? ¿Quién puede elegir estudiar filosofía, Astronomía o Astrofísica cuándo necesitamos más contadores, ingenieros y médicos? (MINTRA, 2025 Informe: Demanda de ocupaciones en Perú. EDO 2025. Gráficos 16 y 17, pp. 9-10). Según el informe completo del comunicado de prensa del Grupo Banco Mundial, del 27 de junio del 2025, en pleno auge de guerras, casi un 40% de la población de las economías con Situaciones Frágiles por Conflictos (SFC), vive en extrema pobreza. La proyección para 2030, es que estas economías representarán cerca del 60% de la población mundial en extrema pobreza, mientras que el año 2024 era el 50%. Estas SFC sufren una carga creciente de hambre: Alrededor de 200 millones de personas se enfrentan actualmente a una inseguridad alimentaria aguda. Ante esta realidad: ¿Qué necesidad tenemos de financiar estudios sobre la posibilidad de vida inteligente en otros lugares del inmenso Universo o la habitabilidad de los exoplanetas más cercanos? (Brookesmith, 1995; Vásquez Monzón, 2021).

Estudiar con esmero el espacio exterior, sus leyes y sus misterios puede hacernos olvidar de la realidad humana cotidiana con sus limitaciones y sus adversidades, sin embargo, dedicarnos solo a estos últimos puede hacernos creer que todo el Universo gira solo en torno al ser humano y a sus problemas, siempre en una clara perspectiva antropocentrista, haciendo que perdamos la consciencia de nuestro real puesto en el cosmos infinito, inmenso e ilimitado. Somos unos seres inteligentes que por una misteriosa conjunción de factores y variables surgió y logró sobrevivir en el tercer planeta del Sistema Solar. Y desde que somos conscientes de esta especialísima realidad no dejamos de preguntarnos: ¿Por qué existimos y para qué vivimos? ¿Qué estamos haciendo para cuidar la vida en nuestro planeta? ¿Tenemos derecho de poner en peligro su existencia y trasladar estos errores a las futuras exploraciones fuera de la Tierra?

Al inicio del Tercer Milenio, aún con todos los aportes realizados en la investigación sobre la existencia de vida inteligente en el Universo, las preguntas que se plantean no admiten respuestas simples; muy por el contrario, el intento de responderlas hace necesaria una visión transdisciplinaria amplia y profunda como la que intenta ofrecer la Astrobiología.

Mi participación en el presente proyecto científico peruano en el campo Astrobiológico, a cargo del Dr. Octavio Chon Torres, hace realidad una inicial curiosidad intelectual de mi niñez, vivida en la sierra de nuestros Andes, en el poblado de Yauli, Junín, a 4,100 m.s.n.m. y con una cercanía de 13 Kms a unas minas explotadas por una compañía minera transnacional. En aquel lugar, por las frías noches, en lo más alto del oscuro cielo se podía observar el brillo de las estrellas con sus titilantes fulgores, mientras que, en los húmedos bordes de los manantiales, pozos y ríos, cientos de luciérnagas reproducían el brillo celestial. La curiosidad intelectual fue motivada inicialmente por las obras de Sagan, Shklovskii, DeGrasse Tyson y finalmente Hawking, con quienes pude llegar a entender el espíritu que animaba aquella precoz intuición infantil: Acercarse al conocimiento de las estrellas y otros cuerpos celestes, llevaba a preguntarse si había vida inteligente fuera de nuestro planeta y al mismo tratar de comprender mejor la propia realidad humana. En el fondo era ir tomando consciencia de que el mismo polvo estelar que produce las inmensas explosiones solares es causa del origen de las conexiones neuronales de nuestra mente y es el germen de nuestras inteligencias sentientes, conscientes y espirituales. Es comprobar que la lejana belleza de la blanca luz que resplandece en las infinitas estrellas se reproduce en la maravillosa y vital luminiscencia de las luciérnagas. Es comprender que la regularidad del movimiento de los cuerpos celestes se replica en el pulso milagroso de la vida inteligente en el universo.

Para quien desee contemplar la maravilla del Universo con la mirada del filósofo, Descartes (2019) tiene unas palabras: “Es el espíritu igualmente el que se representa la idea de la luz cada vez que la acción afecta a nuestro ojo”, porque “la fuerza de la luz puede ser aumentada o disminuida por las diversas disposiciones de los cuerpos que se encuentran en los lugares por donde pasa” (pp. 120. 229). Entonces serán, por un lado, la preparación intelectual y , por el otro, la disposición espiritual, los que guiarán los ojos del observador curioso, del filósofo, del científico, quienes buscan nuevas respuestas a las antiguas preguntas por el origen o por el principio fundamental del universo (Arjé), como los tres filósofos de Mileto: Tales (Agua), Anaximandro (Ápeiron) y Anaxímenes (Aire); por el sentido de la vida, como Aristóteles (Felicidad), Nietzsche (Amor al destino) y Sartre (Acciones libres); por el puesto del hombre en el cosmos, como Tomás de Aquino, Scheler, Cassirer; por sus deberes y responsabilidades frente a la protección de nuestro planeta y de la humanidad presente y futura, como Haeckel, Jonas y Naess. Sin embargo, al inicio de este Tercer Milenio, tiempo en el que Estados Unidos, China, India y otros países más, retomaron con mayor vigor, investigaciones y exploraciones en el espacio exterior, se activaron, de manera paralela desconfianzas y prejuicios que se creían superados. Sobre todo, en el caso de utilizar el espacio exterior como laboratorio armamentista para probar misiles antisatélites (Blinder, 2012, pp. 133-145).

Justificación filosófica

En el campo de la investigación científica internacional, una posible causa de la falta de amistosa disposición para cooperar en proyectos comunes de investigación espaciales, podría estar en el uso que se hace de la información obtenida o de la falta de comunicación, sobre todo, si se considera a la información como insumo necesario para crear conocimiento que permita evaluar, seleccionar, decidir y realizar acciones morales. Si esto es correcto, según Floridi, como se cita en Hernández Antón (2014), un agente racional tomará acertadas decisiones racionales usando la mejor información sobre la realidad elegida, por

lo tanto, buscará obtener la mayor cantidad de información posible sobre aquel objeto de conocimiento, calculando el curso de esta acción y de sus consecuencias. Sócrates estaría de acuerdo en afirmar que un agente bien informado es más probable que actúe desde una perspectiva moral. Entonces, es posible que las grandes potencias comprometidas en esta carrera de la investigación espacial quieran mantener una posición hegemónica, que marque el ritmo del avance y que controle a la competencia. Cuando esto ya no es posible, surgen las dudas y la desconfianza.

Sin embargo, existen circunstancias en las que la falta de información no impide que un agente pueda conseguir objetivos morales más deseables y correctos, como proteger los derechos a la privacidad y al anonimato, o cuando los juicios imparciales requieren de evaluaciones sin sesgos, porque, pregunta Floridi, si estar informado de todo sería siempre la situación más deseable para un juez imparcial o un investigador objetivo. Aquí, surge la ética de la información como aquella reflexión filosófica que aborda temas como la disponibilidad, la accesibilidad y la confiabilidad en el uso de la información necesaria antes de la toma de decisiones. Debe tenerse en cuenta que, el agente racional que toma decisiones no solo consume información, sino que también la produce, siendo muy necesaria la evaluación moral de aquella desde la ética, para evitar que en la publicidad y en la propaganda política, se mezcle desinformación intencionada, calumnias y mentiras o “se viole la privacidad o la confidencialidad de la información” (Hernández, 2014).

Otra de las posibles causas de esta falta de la necesaria práctica de la comunicación responsable, en los proyectos comunes de investigación espacial internacional, es la vigencia y el imperio de dos prácticas nefastas de nuestro tiempo: el excepcionalismo y el individualismo. Para Haraway (2019), estos clichés propios de la ideología y la economía política occidentales también se hacen presentes en las ciencias naturales y sociales. Surge la pregunta obligada: ¿Cómo podrían estar ausentes en un contexto tan competitivo, como son los centros de investigación espacial, en medio de un ambiente de creciente hostilidad y de confrontación internacional, como los que se viven desde los comienzos del siglo XXI? (p. 63).

Para explicar esta nueva tendencia mundial, Donna J. Haraway (2019) hace acopio del aporte de Katie King y M. Beth Dempster para explicar con el término *simpoiesis* aquellos “sistemas que son producidos de manera colectiva, que no tienen límites espaciales o temporales, en donde estos sistemas son evolutivos y muestran un gran potencial para sorprendentes cambios”. Mientras que con el término *autopoiesis* define a los “sistemas que funcionan como unidades autónomas, autoproducidas y autodefinidas, con limitaciones espaciales y temporales”, y que tienden a “un control centralizado, homeostático y predecible” (p. 63). Haraway afirma que ni en la biología, ni en la filosofía podrían encontrar apoyo aquellos organismos independientes y cerrados en sí mismos, si antes no cambian a entornos de unidades interactivas, que trabajen con reglas compartidas para buscar objetivos comunes. Por lo tanto, ni el individualismo, ni el neoliberalismo, generados por la *autopoiesis*, son recomendables como insumos válidos para crear cultura o producir ciencia en la actualidad, porque llevan a la humanidad por las vías de la autodestrucción asegurada (2019, p. 64). Estas afirmaciones tienen asidero en las políticas y acciones actuales que guían a las agencias de investigación espacial, quienes cambiaron la amistosa colaboración entre equipos internacionales, por la mutua desconfianza y el aislamiento entre sus propios muros.

Szocik y Lindberg (2017), ahondan en los oscuros orígenes biológicos del individualismo y afirman que los humanos se unen para realizar diversas acciones sociales conjuntas, desde protestas hasta campañas benéficas, porque a diferencia de los primates no humanos,

logran moderar fuerzas eliminatorias y egoístas de selección endogrupal. Estas conductas muestran que las fuerzas de selección endogrupal son contrapesadas por las de la selección intergrupala. Aunque el altruismo es posible entre los humanos, se considera un fenómeno costoso y antinatural, porque incluso en contextos religiosos, el altruismo no es norma de pensamiento o intención, sino acto aislado, pues implica un sacrificio que contraviene la inclinación natural humana. Además, en el mundo natural, el altruismo no existe, porque no hay evidencia de especies diseñadas para beneficiar a otras (p.16). Comprobado este entorno .egoísta"natural humano, algunos teóricos consideran que la cooperación humana no surgió por selección natural, sino como un castigo sobrenatural, vinculado a creencias religiosas. La cooperación fue crucial en la evolución humana, facilitando la transición de grupos pequeños a sociedades complejas (p.17).

Hasta aquí se puede reconocer que la cooperación entre seres humanos es un fenómeno único, basado en un equipamiento biológico y cognitivo especializado, como el lenguaje y las teorías de la mente, que posibilitan detectar y sancionar el egoísmo, incluso en ausencia del infractor, porque los seres humanos poseen habilidades cognitivas avanzadas que les permiten identificar conductas moralmente incorrectas sin ser testigos directos. En este sentido, el argumento de D. P. Johnson, citado por Szocik y Lindberg (2017), es vigente porque la evolución del lenguaje y las teorías de la mente identificaron al egoísmo como una conducta costosa, propiciando la cooperación. Porque los seres humanos forman unidades cooperativas mediante la selección de individuos con características afines, lo que fortalece las relaciones sociales estables. Así, la reciprocidad se ve favorecida por un equilibrio entre movilidad social baja y alta, impidiendo la explotación. Una interpretación distinta ofrece M. Nowak, citado por Szocik y Lindberg (2017), quien afirma que la cooperación es un principio de la selección natural, reforzada por patrones como la generosidad, el perdón y la esperanza de reciprocidad, en donde, las emociones morales, como el sentido de culpabilidad, son mecanismos más eficaces que el castigo para promover comportamientos a favor de las relaciones sociales (pp. 20-21).

Algo de todo lo hasta aquí expuesto deberá servir para entender la creciente ola de egoísmo que reina en ámbitos que por su tradición se mostraron respetuosos, objetivos y racionales, como son los centros de investigación científica espacial, en donde la proverbial apertura de sus integrantes a la cooperación internacional y al intercambio de conocimientos era norma común aceptada y practicada. Útil será regresar por los antiguos cauces pacíficos que orientaban las buenas prácticas científicas en el pasado, recuperando la perspectiva ética y los valores, como el espíritu de búsqueda de la verdad, de la fuerza de la voluntad, del ejercicio de la bondad, del compromiso por la paz y de la contemplación de la belleza, propio del observador, del científico, del astrónomo, si se desea un futuro promisorio, sin guerras, para la humanidad.

Militarización del espacio

Desde una perspectiva económica-armamentística, el comprobado desarrollo progresivo de estrategias militares espaciales por parte de los Estados Unidos, se hizo patente un día antes del inicio de la conferencia de Potsdam, Alemania. El 16 de julio de 1945, la explosión de la primera bomba atómica en Álamo Gordo, Nuevo México, acompañaba las graves decisiones de los tres países grandes, Estados Unidos, Reino Unido y la Unión Soviética, que se dividían el dominio y control de Europa. Estados Unidos, el 06 de agosto hacía estallar la bomba de uranio sobre Hiroshima y el 09 de agosto la bomba

de plutonio sobre Nagasaki, y con ello consolidó su posición hegemónica no solo sobre Europa, sino sobre todo el Occidente, frente a la influencia de la Unión Soviética. El Plan Marshall y la Doctrina Truman fueron dos políticas estadounidenses de contención del socialismo comunista en el mundo que dio inicio a la Guerra Fría, desde 1947 hasta 1975, y a la carrera de ambos bloques por construir misiles con ojivas nucleares (Romero, 2018, pp. 101-113. 115-143). A finales de los años 70, en los Estados Unidos se alternan programas atómicos que plantean profundos y serios interrogantes sobre la moralidad del uso del poder destructivo de las bombas atómicas y de las políticas de seguridad que se suponen las respaldan. Así, por ejemplo, el gobierno de Ford abandona la doctrina MAD (Destrucción Mutua Asegurada), Reagan instaura la “Guerra de las Galaxias” o SDI (Iniciativa de Defensa Estratégica) de Reagan, luego Bush ejecuta la NMD (Defensa Nacional Antimisiles) y finalmente se muestra la postura flexible de Obama. El intento de lograr la “invulnerabilidad” mediante la superioridad tecnológica rompe con la lógica del equilibrio del terror (MAD), que, paradójicamente, garantizaba cierta estabilidad al evitar el primer uso nuclear (Rivera Alejo, 2013). Bajo el prisma kantiano, que afirma el respeto absoluto de la dignidad de todo ser humano debido a su naturaleza racional, se ejerce una crítica radical a esta búsqueda unilateral de seguridad, porque es moralmente cuestionable ignorar la universalidad del principio ético y los derechos legítimos de otros seres humanos y de otras naciones a vivir en un espacio compartido y pacífico (Kant, 2018). Además, se plantean dilemas sobre la legitimidad del uso de la ciencia y la tecnología: ¿Debe el conocimiento científico estar al servicio del poder hegemónico y la guerra o debe servir para la cooperación internacional y la paz? En este mismo sentido, Habermas (1999), afirma que, según Horkheimer y Adorno, este evidente deseo de dominio de la naturaleza, mediante el uso de la ciencia, no es una simple metáfora, sino la manifestación de la lógica de la represión y del dominio sobre las cosas y sobre los hombres, reducidos a simples cosas. Es el dominio de un sujeto que convierte a otros sujetos en objetos, es decir los cosifica, quitándoles su dignidad, al utilizarlos como simples medios para el logro de sus intereses particulares, y que a sí mismo “se convierte en objeto que repite una misma estructura de ejercicio de poder” (p. 483).

Asimismo, la militarización del espacio abre un debate sobre el concepto de libertad y justicia global. Al reservarse Estados Unidos el derecho a restringir el acceso al espacio a sus adversarios, se posiciona como juez y parte en un bien común que, en principio, pertenece a toda la humanidad (Rivera Alejo, 2013). Esta visión contradice el principio de justicia distributiva de Rawls (2006), pues crea un orden desigual donde sólo una potencia detenta el control estratégico total. El comportamiento de China, aunque reactivo, también refleja un problema ético: en lugar de apostar por el desarrollo compartido, opta por capacidades asimétricas para contrarrestar el dominio estadounidense en un posible conflicto, como el que podría surgir por Taiwán. El espacio, entendido en la visión filosófica de Hannah Arendt (2009), como aquel lugar para la acción humana libre y creativa, corre el riesgo de convertirse en un campo más de confrontación y dominio, alejándose de su potencial como espacio común para el progreso colectivo. Veamos a continuación algunos ejemplos concretos. Avi Loeb (2025), reconocido astrofísico, jefe del proyecto Galileo y director fundador de la Iniciativa Black Hole de la Universidad de Harvard, hizo una afirmación que, aunque suena exagerada, revela una gran realidad: “La militarización del espacio bloquea la accesibilidad a los datos de observación de la última generación de telescopios necesarios para identificar posibles objetos interestelares”. Según Loeb (2021), desde 1959, año en que se hizo el primer lanzamiento de la primera nave espacial Luna 1, el espacio alrededor de la Tierra se ha sobrellenado de satélites de fabricación humana. Muchos

pertenecen al Programa de Apoyo a la Defensa (DSP) de la Fuerza Espacial de los Estados Unidos (EEUU) y sirven como sistemas de alerta temprana, con satélites geoestacionarios, a 35,786 Kms sobre la superficie de la Tierra, con la capacidad de identificar lanzamientos espaciales y lanzamientos de misiles, detonaciones nucleares y meteoritos incandescentes, mediante sensores infrarrojos y detectores de gases calientes, contrastando la Tierra con el fondo del espacio. Otros satélites mejoran la capacidad de las misiones de seguridad nacional, comunicación, inteligencia, reconocimiento, vigilancia de fronteras, del clima y acciones de emergencia.

Para Loeb (2025), en estos últimos 25 años, los 2,700 satélites activos y las constelaciones de satélites que los acompañan, han sobrecargado la Exósfera o espacio exterior de la Tierra, transformándola en un área no solo muy disputada sino también muy contaminada por la basura espacial. En este espacio, todos los países poseedores de alta tecnología aeroespacial desarrollan sistemas de contramedidas frente a las del Departamento de Defensa de los EEUU. Así, por ejemplo: Si en el año 1985, EEUU destruyó el satélite de una tonelada (Solwind) con un arma antisatélite; en noviembre del 2021, Rusia hizo lo mismo y disparó un arma antisatélite de ascenso directo para destruir uno de sus propios satélites, creando con la explosión más de 1,500 piezas de desechos metálicos que vagan en la órbita terrestre. En la guerra de Ucrania, pequeños satélites proporcionan, a la OTAN y a Rusia, acceso a internet de alta velocidad, a comunicaciones de respaldo, a imágenes de alta calidad y recopilación de inteligencia geoespacial. Por su parte, China emplea cientos de satélites con capacidades de vigilancia y guerra electrónica para interceptar las comunicaciones satelitales, la navegación y posicionamiento temporal, el sistema de posicionamiento global y los sistemas de vigilancia y reconocimiento (Yaniz, 2023; Fojón, 2022; Raffaini, 2021). Por todo lo expuesto, se puede afirmar con toda propiedad que el espacio exterior cercano a la Tierra está actualmente saturado de activos militares. En tal clima de gran tensión militar, toda la información científica obtenida por los telescopios astronómicos que inspeccionan el espacio exterior, también puede revelar el inventario de satélites utilizados por el gobierno de los EEUU con fines de seguridad nacional. Por ello, afirma Loeb (2025): “El gobierno estadounidense quiere eliminar información confidencial sobre sus activos espaciales de la base pública de datos de estos telescopios para que la información no esté disponible para sus adversarios”. Ante la pregunta: ¿Podría perderse datos científicos valiosos sobre nuestro vecindario cósmico mientras el gobierno estadounidense elimina parte de los datos disponibles para los científicos? Loeb responde: “Uno podría preocuparse de que los Fenómenos Anómalos No Identificados (UAP), potencialmente vinculados a artefactos tecnológicos extraterrestres que llegan cerca de la Tierra, puedan ser eliminados de los datos. Mientras los UAP tengan características de vuelo que excedan dramáticamente las tecnologías humanas, podrían no ser eliminados de los datos. En la búsqueda de vehículos extraterrestres, los miembros de mi equipo de investigación en el Proyecto Galileo buscarán UAP y objetos interestelares en los datos públicos”. Este deseo de ocultar y eliminar información altamente confidencial y secreta es consecuencia de la confrontación bipolar por el dominio del espacio exterior que enfrentó a EEUU y Rusia durante el siglo XX. Hoy, avanzado ya el siglo XXI se ha convertido en una competencia multipolar o multilateral entre varios países que tiene como nuevos protagonistas a EEUU, Europa, Rusia, China, India y Japón, al frente de un nuevo conglomerado aeroespacial. Por su parte, China, desde el 2008, lidera la Organización de Cooperación Espacial Asia-Pacífico que incluye a países tan distantes como Bangladesh, Irán, Mongolia, Pakistán, Perú, Tailandia y Turquía. Además, China asesora y colabora en diversos campos de la investigación espacial con Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, México y Venezuela (Álvarez Calderón et al, 2020; Frenkel

y Blinder, 2020).

Pero también, la inicial acción de China, hizo que Australia, Israel, Filipinas e Indonesia activaran programas espaciales. Este contexto multipolar en el ámbito espacial, en donde se reproducen las alianzas y rivalidades de las complejas interacciones geopolíticas actuales, hacen necesarios los acuerdos multilaterales que definan la dirección de la investigación espacial, la cooperación en los campos científicos-tecnológicos, la gestión sostenible de la basura espacial, la mitigación de riesgos relacionados con la actividad espacial, pero sobre todo, los impedimentos a las posibilidades de utilización armamentística, en la industria militar y a los fines orientados para la guerra (Sepúlveda Estrada y Sepúlveda Estrada, 2024, pp. 4-6).

Y de toda esta realidad contradictoriamente humana surge la Paradoja del cosmos armado: Anhelamos encontrar vida inteligente más allá de la Tierra, mientras colmamos la órbita con instrumentos de guerra. Escudriñamos el cielo con telescopios buscando señales, pero bloqueamos datos por temor a revelar nuestros arsenales. Invocamos la ciencia como puente hacia lo desconocido, mientras la convertimos en herramienta de control y dominio. Queremos dialogar con civilizaciones extraterrestres avanzadas, pero en nuestro planeta nos cosificamos, nos vigilamos, nos destruimos. El espacio exterior, símbolo de libertad y creación, es hoy tribunal de poder, propiedad y exclusión. Preguntamos si estamos solos en el universo, cuando ni siquiera sabemos convivir en este mundo adverso. Buscamos alguna posibilidad de vida en algún exoplaneta cercano, mientras ponemos en peligro nuestra propia en el único hogar habitable conocido. Somos una especie profundamente contradictoria, muy capaz para imaginar otras formas de inteligencia, pero enemiga de su propia inteligencia.

Perspectiva ética

Por los datos de la Historia Universal se puede comprobar que, en los seres humanos el espíritu de colaboración pacífica podría ser superado, muy rápidamente, por el espíritu de confrontación bélica y el deseo de adelantarse, eliminando a quienes considera hostiles o enemigos. De ahí la trágica vigencia de la sentencia latina de Flavio Vegecio Renato: “Igitur qui desiderat pacem, praeparet bellum” (Quien desee la paz, se debe preparar para la guerra). Desde Hobbes (2016) los seres humanos están plena y totalmente convencidos de que el estado natural de la humanidad es la condición de guerra continua de unos hombres contra otros. Según Morris (2022), las guerras estarían justificadas porque produjeron sociedades más grandes, lideradas por gobiernos más fuertes, capaces de imponer la paz y crear las condiciones para la prosperidad. Estas teorías, tanto la del filósofo inglés como la del historiador estadounidense, muestran y sustentan las posiciones hegemónicas o supremacistas de sus respectivos países.

Por lo tanto, sea que sorprenda o no, es posible afirmar que también la investigación en el espacio extraterrestre y la consecuente exploración, será el escenario donde se reproduzcan las estrategias de defensa y de seguridad que aplican los ejércitos en la Tierra. En estas condiciones la defensa del espacio extraterrestre puede ser pasiva o activa. Mientras que la defensa pasiva está conformada por los sistemas electrónicos, cibernéticos, logísticos, críticos, analíticos y preparativos como satélites de observación-vigilancia, telecomunicaciones y geolocalización; la defensa activa incluye todos los sistemas ofensivos como armamento, misiles, vehículos militares, sensores, radares, disuasivos, protectores, blindajes, destructores y resistencia para el cumplimiento de la misión, integrados electrónicamente tanto en el

ámbito físico como en el ámbito ciberespacial. (Sepúlveda Estrada y Sepúlveda Estrada, 2024).

Carl Sagan (2002), el reconocido astrónomo y astrofísico estadounidense, al mismo tiempo cosmólogo, astrobiólogo, escritor y el más famoso divulgador científico del siglo XX, recordaba con ironía el interés de los seres humanos por comunicarse con inteligencias extraterrestres, sin haber mejorado la comunicación con las inteligencias terrestres de otros seres humanos con diversas culturas e idiomas diferentes, con los grandes simios, los delfines y las ballenas. Afirmaba Sagan que, si en verdad existieran seres inteligentes en aquellos planetas de las estrellas próximas a nuestro sistema solar, estos ya nos habrían descubierto con sus grandes radiotelescopios, porque desde hace menos de 50 años el silencio anterior, de más de miles de millones de años, se cambió por potentísimas, variadas y múltiples ondas de radio, televisión y radar. El haz del radar proyectado al cielo es mayor al tamaño de los planetas y muchas de estas señales viajan muy lejos, fuera del sistema solar, hacia el espacio interestelar. La mayoría de estas permanentes transmisiones de radar tienen objetivos militares, porque de manera ininterrumpida rastrean los cielos, temiendo constantemente un lanzamiento de misiles con cabezas nucleares, un mal augurio con quince minutos de adelanto del fin de la civilización humana.

Para Stephen Hawking (2010), el más famoso físico teórico del siglo XXI, las posibilidades de encontrar vida en otros sistemas estelares en estadios parecidos a los de los seres humanos son muy pequeñas, pero es probable que la vida extraterrestre sea o mucho más primitiva o mucho más avanzada. Y si es más avanzada ya habrían llegado a la Tierra, y no habría sido como en las películas de ciencia ficción, en donde los seres humanos levantan la victoriosa bandera de barras y estrellas, en un final feliz. Luego, no han llegado hasta ahora los extraterrestres o no han tomado contacto con los seres humanos, porque siendo una especie muy avanzada, conocerían de nuestra existencia, por medios controlados por supertelecomandos, y que hasta ahora estarían dejando que nos cocinemos en nuestra propia salsa de miseria primitiva.

Sin embargo, es dudoso que ellos pudieran ser tan considerados con formas inferiores de vida como la nuestra. Para confirmarlo a escala humana pregunta Hawking: “¿Acaso nosotros nos preocupamos de cuántos insectos o gusanos aplastamos?” La comparación es dura y brutal, pero esa sería la triste realidad. Además, el que los seres humanos se consideren seres inteligentes, producto final de un proceso evolutivo, no garantiza su supervivencia, porque “las bacterias se las arreglan muy bien sin inteligencia, y nos sobrevivirán si nuestra llamada inteligencia nos lleva a exterminarnos en una guerra nuclear” (2010). De manera que, la militarización del espacio sería inútil para enfrentarnos a seres de otros mundos y defendernos de ellos, solo sirve para mantener la postura hegemónica y supremacista de algunos países que se aíslan y se niegan a colaborar con los demás, amenazando no solo las pacíficas relaciones internacionales y la investigación espacial conjunta, sino también la frágil existencia de la vida en nuestro planeta.

En este escenario cargado de tensiones entre colaboración y confrontación, la llamada Paradoja de Fermi cobra un valor profundamente simbólico y filosófico. Nacida de una conversación con los físicos Teller, York y Konopinski, fue formulada por el físico Enrico Fermi en el año 1950, justamente en Los Álamos, cuando era director asociado del Proyecto Manhattan, para el desarrollo de la bomba atómica. La Paradoja de Fermi, que se basa en la ecuación de Drake para calcular el número de civilizaciones dentro de nuestra propia galaxia que estarían emitiendo señales al espacio, plantea una inquietante contradicción: si el universo es tan vasto y antiguo, y si hay miles de millones de estrellas con planetas potencialmente habitables, ¿por qué no hemos tenido contacto con civilizaciones extrate-

restres? Una de las posibles respuestas apunta directamente a la conducta autodestructiva de las civilizaciones inteligentes. Tal vez, como la nuestra, tienden a desarrollar la tecnología más rápido que la sabiduría ética, conduciéndose al colapso final antes de poder establecer contacto interestelar. O tal vez, las civilizaciones que han logrado sobrevivir y evolucionar han comprendido que revelarse a especies agresivas y bélicas, como la humana, representa un riesgo innecesario. Este silencio cósmico podría ser, entonces, un espejo de nuestras propias fallas: un universo que nos observa, pero elige no responder. Si queremos romper ese silencio, primero debemos demostrarnos entre los seres humanos ser dignos de ser escuchados, desarrollando no solo avances científicos, sino también una conciencia planetaria ética y pacífica que priorice la vida y la cooperación por encima del dominio y la destrucción (Maccone, 2010).

Según Hans Jonas (2014), después de realizar un inicial análisis de la acción humana transformadora sobre nuestro planeta, se puede comprobar que el desarrollo científico y tecnológico logrado por la humanidad hasta la actualidad es, al mismo, una promesa y una amenaza para su propia existencia y para la vida sobre la Tierra. El hombre ha buscado dominar la naturaleza para asegurar la felicidad de la especie humana, pero, lo que ha conseguido es amenazar el equilibrio de los ecosistemas. El imperativo categórico kantiano en su primera versión enuncia: “Obra de tal modo que puedas querer también que tu máxima se convierta en ley universal”, podría formularse en versión actual de la siguiente forma: “Obra de tal modo que los efectos de tu acción sean compatibles con la permanencia de una vida humana auténtica en la Tierra”, y esto obliga y hace responsable al ser humano para emplear su razón coherentemente, para proteger y cuidar la vida humana en el planeta y fuera de él. Por ello, no es lógico ni ético sacrificar la existencia de las generaciones humanas futuras por cuidar y defender la vida y existencia de las presentes, como tampoco sacrificar a las presentes en favor de la vida y existencia de las futuras. De ahí que, los proyectos de investigaciones espaciales deben recobrar el espíritu de concordia, de confianza mutua para trabajar juntos en cooperación internacional, buscando la sobrevivencia de la humanidad aquí y ahora, como en cualquier punto del universo al que podamos llegar.

Cooperación internacional

Neil DeGrasse Tyson, el más reconocido astrofísico de Estados Unidos, doctor en Astrofísica por la Universidad de Columbia, divulgador científico y sucesor de Carl Sagan, nació en East Bronx, el mismo mes de octubre de 1958 en que se fundó la NASA. Él recuerda que, mientras las graves situaciones políticas y sociales mantenían a la sociedad estadounidense en el atolladero de la segregación racial, las luchas por el reconocimiento de los derechos civiles y la desastrosa guerra con Vietnam, de manera paralela, la NASA mantenía un admirable, exigente y sostenido trabajo científico de investigaciones, proyectos y misiones bajo los nombres de Mercury, Gemini y Apolo que tenían por objetivo llegar a la Luna (DeGrasse Tyson, 2016; Slade & Gonzáles, 2018). Como Astrofísico profesional, investigó en diversas universidades, asesoró a empresas estadounidenses y fue convocado para formar una comisión de expertos que debían analizar el futuro de la industria aeroespacial estadounidense que sufría un difícil momento. Así, emprendió viajes para estudiar el clima económico de las empresas de la competencia mundial y luego asesorar tanto al Congreso estadounidense, como a la industria aeroespacial, en la recuperación del liderazgo.

Después de haber visitado muchos países de Europa Occidental llegaron a Moscú y

conocieron la Ciudad de las Estrellas (Zvionznyi Gorodok), cerca de 40 Kms al noroeste de la capital rusa, el emblemático Centro de Entrenamiento para Cosmonautas 'Yuri Gagarin'. Aquí, después de las presentaciones de rigor y habiendo logrado un clima de confianza y distensión, el director ruso del centro comenzó a evocar con nostalgia los años de frenética investigación y exploración aeroespacial. DeGrasse Tyson dice que la conexión emocional fue inmediata, pues a ambos les brillaban los ojos al compartir los mismos intereses científicos, y le hizo pensar cómo sería este nuestro mundo si todos los países estuvieran orientados al mismo objetivo: "Imaginé una conexión mutua en un plano más elevado, más allá de los conflictos militares y económicos, más allá de las guerras. Me preguntaba por qué dos países con unos sueños comunes tan profundos sobre la presencia de seres humanos en el espacio, habían sido adversarios durante tanto tiempo en aquel mundo posterior a la Segunda Guerra Mundial" (DeGrasse Tyson, 2016).

Nadie podrá negar la importancia de la colaboración política, científica y tecnológica entre los investigadores de distintas nacionalidades en el campo de la investigación aeroespacial. El 19 de noviembre del 2024, cumplió 26 años la Estación Espacial Internacional-EEI (ISS-International Space Station), como un proyecto conjunto de las cinco agencias espaciales más importantes: NASA (EEUU), ROSCOSMOS (Rusia), ESA (Europa), JAXA (Japón) y CSA (Canadá). Desde 1998, fecha en que empezó su construcción a 400 Kms de altitud, participaron 16 países: EEUU, Rusia; Japón, Canadá, Brasil, Francia, Alemania, España, Italia, Holanda, Noruega, Bélgica, Dinamarca, Suecia, Suiza y Reino Unido (NASA, 2010). Desde noviembre del 2000 hasta abril de 2021, visitaron la estación espacial 244 astronautas, cosmonautas, científicos y algunos turistas de 19 naciones diferentes, varios de ellos en más de dos ocasiones. Y hasta el año 2018 se había gastado en la construcción y mantenimiento de la Estación Espacial Internacional más de 150 billones de dólares (Launius, 2019, pp. 232-245).

¿Por qué motivos se puede gastar o invertir grandes cantidades del dinero de los fondos estatales para financiar proyectos extremadamente grandes y caros a lo largo de la historia? DeGrasse Tyson dice que pueden ser tres las justificaciones: Primero, El Honor a los dioses y reyes, por un profundo respeto y temor; segundo, La Promesa de beneficio económico, porque no quiero morir pobre; tercero, La guerra, porque no quiero morir. En este punto recuerda el discurso del presidente John F. Kennedy al Congreso de los EEUU, el 25 de mayo de 1961, semanas después de que la URSS llevará a Yuri Gagarin al espacio. Su discurso fue una reacción y un llamado a los EEUU: "Creo que este país debería comprometerse a lograr el objetivo, antes que acabe esta década, de llevar un hombre a la Luna y traerlo de vuelta a la Tierra sano y salvo". Sin embargo, líneas antes había dicho: "Si queremos ganar la batalla que hoy se libra en todo el mundo entre la libertad y la tiranía, los espectaculares logros obtenidos en el espacio en las últimas semanas deberían hacernos ver con claridad, como hizo el Sputnik en 1957, el impacto que tiene esta aventura en la mente de todos los hombres que intentan decidir qué camino tomar". Para DeGrasse Tyson esta exhortación fue un claro y verdadero grito de guerra (2016).

Grito de guerra que hoy sigue resonando para quienes comparten posturas belicistas o políticas supremacistas, pero si realmente queremos asegurar un futuro verdaderamente próspero y justo para toda la humanidad, no debemos medir nuestro progreso únicamente por conseguir logros tecnológicos o conquistas en el espacio, sino por nuestra capacidad para mantener la paz, honrar los tratados internacionales y fomentar la cooperación global. Las hazañas en la órbita terrestre, aunque impresionantes, no deben eclipsar la urgente necesidad de colaboración pacífica entre todas las naciones. La verdadera batalla no se libra entre libertad y tiranía, sino entre una visión del mundo basada en la confrontación y otra

fundamentada en el entendimiento mutuo. Es en el respeto al derecho internacional y en el trabajo en conjunto donde se encuentra el camino más sólido hacia un desarrollo duradero y compartido. La historia ha demostrado que los avances más significativos surgen no de la competencia hostil, sino del diálogo, el intercambio de saberes y la solidaridad entre los pueblos. En este contexto, la búsqueda de vida inteligente extraterrestre, una de las ramas más fascinantes de la Astrobiología, puede ser vista también como una poderosa herramienta de acercamiento entre naciones. Preguntarnos si estamos solos en el universo no es solo una inquietud científica, sino también una interrogante profundamente humana que trasciende fronteras, ideologías y credos. La posibilidad de descubrir otras formas de vida inteligente nos obliga a reflexionar sobre nuestro lugar en el cosmos y, por tanto, sobre cómo nos relacionamos entre nosotros en la Tierra. En efecto, los proyectos internacionales como SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence), o las misiones conjuntas a Marte y otros planetas, han unido a científicos de distintas culturas en un propósito común que requiere cooperación, confianza y respeto mutuo. Esta sinergia científica no solo impulsa el conocimiento, sino que ofrece un modelo concreto de diplomacia constructiva y colaboración pacífica. Así, la investigación Astrobiológica, al fomentar redes globales de trabajo y compartir datos abiertamente, fortalece los lazos entre países y siembra las bases para una cultura de paz. Si algún día llegamos a detectar señales de otra inteligencia en el universo, lo habremos hecho no como bloques enfrentados, sino como una especie unida por el deseo de entender la verdad y de vivir bien en paz y unidad. En ese sentido, mirar al cielo en busca de otros seres inteligentes nos debería ayudar, de forma concreta y práctica, aunque paradójica, a reconciliarnos aquí en la Tierra, como seres inteligentes y pacíficos.

Conclusión

A pesar de las múltiples urgencias sociales y económicas que enfrenta la humanidad, la exploración espacial y el estudio del universo no son lujos innecesarios, sino una vía esencial y necesaria para comprender nuestro lugar en el cosmos y reflexionar sobre nuestro presente y futuro. La Astrobiología, como disciplina nueva y transdisciplinaria, nos invita a mirar más allá del horizonte terrestre para entender mejor la vida y sus condiciones. El conocimiento del universo no debe alejarnos de nuestros deberes éticos y humanos, sino potenciar nuestra conciencia sobre la fragilidad de la existencia.

La cooperación internacional, que alguna vez fue símbolo de progreso en proyectos como la Estación Espacial Internacional, hoy se ve amenazada por la desconfianza, la militarización del espacio y el predominio del individualismo. Es urgente recuperar una visión ética, crítica y cooperativa, que privilegie la paz, el bien, la verdad y la vida por encima de la hegemonía y el dominio tecnológico. Como señalaba Carl Sagan, antes de buscar vida inteligente fuera del planeta, deberíamos mejorar nuestras relaciones dentro de él. Solo un espíritu científico abierto, guiado por la responsabilidad moral y la voluntad colectiva, podrá garantizar que nuestras exploraciones no repitan los antiguos errores cometidos en la Tierra, sino que abran caminos esperanzadores hacia un futuro compartido y sustentable.

El progreso del género humano no debería evaluarse únicamente por los avances tecnológicos o las conquistas espaciales circunscritos a cada país. Los seres humanos ya saben que la presencia del egoísmo en la investigación científica y la competencia excluyente impiden el diálogo pacífico y frenan la colaboración científica global, porque los logros individuales o nacionales no pueden prevalecer sobre la necesidad de cooperación entre los

pueblos.

Así pues, la verdadera disyuntiva no es entre libertad y tiranía, sino entre una lógica de confrontación y otra de entendimiento mutuo. Por ello, solo el respeto al derecho internacional y el trabajo científico compartido permiten un desarrollo sostenible. En este contexto, la Astrobiología, con su visión integradora y prospectiva de la investigación espacial, abre para toda la humanidad, presente y futura, una nueva oportunidad para el desarrollo de un trabajo científico respetuoso, dialogante, mancomunado y genuinamente colaborativo. Este es nuestro deber, nuestra responsabilidad, nuestra misión, y nuestro legado de cara a las generaciones venideras, pues ellos, la historia y el futuro, nos juzgarán por nuestras acciones presentes.

Referencias

- Álvarez Calderón, C. E., Molano Balbuena, Á., Corredor Gutiérrez, C. G., y Zorrilla, M. F. (2020). *El espacio exterior, escenario de competencia o cooperación en América del Sur: los casos de Argentina, Brasil, México y Venezuela*. Escuela Superior de Guerra. <https://www.researchgate.net/publication/339050008>
- Arendt, H. (2009). *La condición humana*. Paidós.
- Brookesmith, P. (1996). *Documentos UFO. Catálogo completo*. LIBSA.
- DeGrasse Tyson, N. (2016). *Crónicas del Espacio. Ante la última frontera*. Paidós.
- Descartes, R. (2019). *El mundo o el tratado de la luz*. Alianza Editorial.
- Frenkel, A., y Blinder, D. (2019). Geopolítica y cooperación espacial: China y América del Sur. *Desafíos*, 32(1), 1–30.
<http://dx.doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/desafios/a.766>
- Grupo Banco Mundial. (2025). *La pobreza extrema aumenta rápidamente en las economías afectadas por conflictos e inestabilidad*.
<https://www.worldbank.org/en/research/publication/fragile-and-conflict-affected-situations-vulnerabilities>
- Haraway, D. J. (2019). *Seguir con el problema. Generar parentesco en el Chthuluceno*. Ediciones Consoni.
- Hawking, S. (2010). *El universo en una cáscara de nuez*. Crítica/Planeta.
- Hernández Antón, I. (2014). Floridi: Información y filosofía. *THÉMATA. Revista de Filosofía*, 49, 127–142. <https://doi.org/10.12795/Themata.2014.i49.07>
- Hobbes, T. (2016). *Leviatán o la materia, forma y poder de un estado eclesiástico y civil*. Alianza Editorial.
- Iberdrola. (s.f.). *Basura espacial: ¿ha llegado el momento de empezar a cuidar el cosmos?* Recuperado el 10 de enero de 2025 de
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/basura-espacial>
- Jonas, H. (2014). *El principio de responsabilidad. Ensayo de una ética para la civilización tecnológica*. Herder.
- Kant, I. (2018). *Hacia la paz perpetua*. Fondo de Cultura Económica.
- Launius, R. D. (2019). *Historia de la exploración espacial. Del mundo antiguo al futuro extraterrestre*. Grijalbo.
- Loeb, A. (2021). *Extraterrestre. La humanidad ante el primer signo de vida inteligente más allá de la Tierra*. Editorial Planeta.
- Loeb, A. (2025, 9 de enero). Guerra en el espacio. Las agencias de espionaje de EEUU obstaculizan la búsqueda de civilizaciones interestelares. *El Confidencial*.

- https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2025-01-09/pentagono-busqueda-evidencia-civilizaciones-interstelares_4038655/
- Maccone, C. (2010). The Statistical Fermi Paradox. *JBIS*, 63, 222–239.
<https://www.researchgate.net/profile/Claudio-Maccone/publication/258402267>
- Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo. (2025). *Informe: Demanda de ocupaciones en Perú. Encuesta de Demanda Ocupacional (EDO 2025)*.
- Morris, I. (2022). *Guerra, ¿para qué sirve? El papel de los conflictos en la civilización*. Ático de los Libros.
- National Aeronautics and Space Administration. (2010). *Reference Guide to the International Space Station*. Library of Congress.
- Rawls, J. (2006). *Teoría de la justicia*.
- Rivera Alejo, J. (2013). *La militarización del espacio. Un desafío a la seguridad internacional y un reto para el Derecho internacional* [Tesis de Grado]. Universidad Complutense de Madrid.
- Romero García, E. (2018). *Breve historia de la Guerra Fría*. Nowtilus.
- Sagan, C. (2002). *COSMOS*. Planeta.
- Sagan, C., y Shklovskii, I. S. (2019). *Vida inteligente en el Universo*. Editorial Reverte.
- Sepúlveda Estrada, J., y Sepúlveda Estrada, N. (2024). Enfoque crítico sobre la Carrera Espacial y la geopolítica global frente al Derecho Espacial Contemporáneo. *Iuris Dictio*, 33. <http://doi.org/10.18272/iu.i33.3205>
- Slade, S., y Gonzáles, T. (2018). *Cuenta atrás. 2979 días para llegar a la Luna*. Ediciones Oberon.
- Szocik, K., y Lindberg, S. (2017). Selfishness and Cooperation: Challenge for Social Life. *Studia Humana*, 6(3), 15–23. <https://doi.org/10.1515/SH-2017-0019>
- Vásquez Monzón, C. (2021). *Detección, dinámica y habitabilidad de exoplanetas y exosatélites* [Tesis de Doctorado]. Universidad de Santiago de Compostela.
- Vegecio Renato, F. (s.f.). *Sobre las instituciones militares*.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Inferencia bayesiana en Ciencias Exoplanetarias con JWST

Waldir Chara Ccallo^{1,2}

<https://orcid.org/0009-0006-4406-2782>

¹Programa de maestría en Estadística, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú

²Asociación Peruana de Astrobiología, Perú

Email: 243337@unsaac.edu.pe

Recibido: 08/12/2025 • Revisado: 20/12/2025 • Aceptado: 25/12/2025

Resumen

La puesta en operación del James Webb Space Telescope (JWST) ha transformado el estudio de atmósferas exoplanetarias mediante observaciones espectroscópicas de precisión. Este avance ha intensificado la necesidad de marcos analíticos capaces de gestionar la complejidad, degeneración e incertidumbre inherentes a los nuevos datos. En este contexto, la inferencia bayesiana se ha consolidado como el marco fundamental para la caracterización atmosférica, la conexión con la estructura interna y la evaluación de habitabilidad. Este artículo revisa la evolución reciente de este enfoque, sustentada en un análisis bibliométrico del periodo 2016–2025 que evidencia un crecimiento sustancial en su adopción para la caracterización química y física de exoplanetas. Se sintetizan las aplicaciones más relevantes en la era del JWST, desde la recuperación atmosférica y su acoplamiento con modelos del interior planetario, hasta los marcos probabilísticos para la detección de biofirmas, discutiendo finalmente las limitaciones metodológicas y las perspectivas futuras del campo.

Palabras clave: Inferencia Bayesiana, JWST, Atmósferas Exoplanetarias, Estructura Interna, Astrobiología.

Citar como:

Chara Ccallo, W. (2025). Inferencia bayesiana en Ciencias Exoplanetarias con JWST. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(2), 16–41. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n2.2>

RESEARCH ARTICLE

Bayesian inference in exoplanetary science with JWST

Waldir Chara Ccallo¹²

<https://orcid.org/0009-0006-4406-2782>

¹Programa de maestría en Estadística, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú

²Asociación Peruana de Astrobiología, Perú

Email: 243337@unsaac.edu.pe

Recibido: 08/12/2025 • Revisado: 20/12/2025 • Aceptado: 25/12/2025

Abstract

The operation of the James Webb Space Telescope (JWST) has transformed the study of exoplanetary atmospheres through precision spectroscopic observations. This advancement has intensified the need for analytical frameworks capable of managing the complexity, degeneracy, and uncertainty inherent in the new data. In this context, Bayesian inference has established itself as the fundamental framework for atmospheric characterization, the connection to internal structure, and the assessment of habitability. This article reviews the recent evolution of this approach, supported by a bibliometric analysis of the 2016–2025 period that demonstrates substantial growth in its adoption for the chemical and physical characterization of exoplanets. Key applications in the JWST era are synthesized, ranging from atmospheric retrieval and its coupling with planetary interior models to probabilistic frameworks for biosignature detection, finally discussing methodological limitations and future perspectives of the field.

Keywords: Bayesian Inference, JWST, Exoplanet Atmosphere, Internal structure, Astrobiology

Cite as:

Chara Ccallo, W. (2025). Inferencia bayesiana en Ciencias Exoplanetarias con JWST. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(2), 16–41. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n2.2>

1. Introducción

Si bien el diseño original del Telescopio Espacial James Webb (JWST) se cimentó en cuatro pilares científicos, abarcando desde la reionización y el ensamblaje de galaxias hasta la formación estelar y el origen de la vida (Gardner et al., 2006), su capacidad operativa ha trascendido estos límites logrando ser así una herramienta más en la caracterización exhaustiva de más de 5000 exoplanetas conocidos (Menzel et al., 2023).

Esta expansión estratégica ha impulsado de manera decisiva el estudio de las atmósferas exoplanetarias, abriendo una etapa en la que es posible delimitar con rigurosidad y confiabilidad las composiciones atmosféricas, propiedades de aerosoles, estructuras térmicas, pérdida de masa y efectos tridimensionales, superando el legado del Hubble o Spitzer (Kempton & Knutson, 2024; Rigby et al., 2023). No obstante, este salto en resolución y sensibilidad (McElwain et al., 2023), viene acompañada de desafíos donde los espectros presentan degeneraciones (Bloot et al., 2023; Lueber et al., 2024), la instrumentación introduce estructuras complejas de ruido (Chevallard et al., 2019; Galan et al., 2024), y los modelos físicos disponibles incorporan incertidumbres asociadas tanto a condiciones atmosféricas como a procesos dinámicos (Blecic et al., 2017; Feng et al., 2016).

En este escenario, los métodos estadísticos tradicionales resultan insuficientes para representar adecuadamente la complejidad y la incertidumbre estructural presentes en los datos del JWST (Sandles et al., 2022). Durante la última década, la inferencia bayesiana ha ganado un protagonismo creciente en la ciencia exoplanetaria, pero es en el periodo reciente (2022 a la actualidad) cuando, por ejemplo, las redes bayesianas y modelos probabilísticos articulados se consolidan como marcos analíticos centrales (fig. 1). Un análisis bibliométrico del periodo 2016–2025 muestra que el término Bayesian Networks es el descriptor metodológico más frecuente, y que su presencia está relacionada a uno de los dos grandes campos que surgieron de este análisis bibliométrico, los estudios de atmósferas e interiores exoplanetarios, reforzando la importancia de éste enfoque.

El presente artículo examina la consolidación de la inferencia bayesiana como el nuevo estándar metodológico en las ciencias exoplanetarias. Su contribución se distingue por las tres razones siguientes: primero, se documenta empíricamente este cambio de paradigma mediante el análisis bibliométrico mencionado; segundo, se demuestra cómo el marco bayesiano permite acoplar consistentemente los datos espectrales con modelos atmosféricos e interior planetario; y tercero, sistematizamos el uso de la Evidencia Bayesiana como el criterio de decisión crítico para la astrobiología y la evaluación de falsos positivos en la era del JWST.

Para abordar estos objetivos, la revisión se estructura de la siguiente manera: inicialmente, se detalla la metodología de revisión sistemática empleada, a continuación, se contextualizan las capacidades observacionales y los productos de datos del JWST. Posteriormente, se establecen los fundamentos teóricos de la inferencia bayesiana en este contexto, seguidos de una revisión de sus aplicaciones prácticas en la caracterización atmosférica y del interior planetario. Finalmente, se discuten las implicaciones directas para la astrobiología y se presentan las conclusiones y perspectivas futuras.

2. Metodología y tendencias bibliométricas

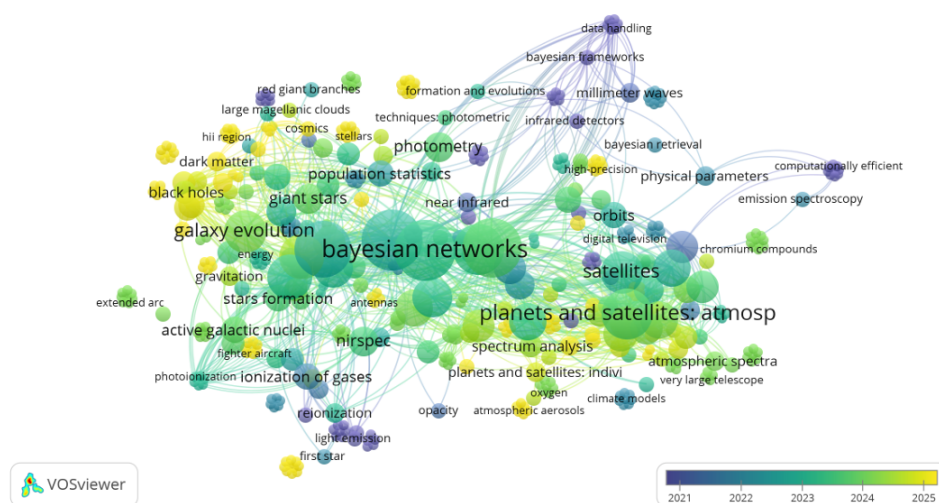
Para fundamentar el enfoque de esta revisión, se realizó un análisis bibliométrico cuantitativo complementado con una revisión narrativa del estado del arte, utilizando el

paquete *bibliometrix* en R. El corpus de estudio comprende 103 documentos recuperados de la base de datos de Scopus (período 2016–2025) indexados en revistas como *Astronomy & Astrophysics*, *Astrophysical Journal*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

Si bien la terminología bayesiana no siempre figura explícitamente en los títulos, el análisis de las *Keywords Plus* (términos derivados algorítmicamente de las referencias citadas) revela una realidad en el que los métodos probabilísticos son la base metodológica del campo. De hecho, estos descriptores aparecen con mayor frecuencia entre los términos estructurales de la literatura revisada, mostrando evidencia que la inferencia bayesiana a menudo está presente en la práctica, incluso cuando no figura en el título del artículo.

Figura 1

Mapa bibliométrico de co-ocurrencia de términos (VOSviewer)



Nota. Los clústeres visualizan la interconexión entre la instrumentación del JWST, la caracterización atmosférica y los modelos de análisis de datos. La centralidad de los nodos refleja la consolidación de técnicas de inferencia en la interpretación de espectros.

El análisis temporal muestra un crecimiento anual compuesto del 35%, con un punto de inflexión positiva en el año 2022, correlacionado directamente con la liberación de los primeros datos del JWST. De acuerdo a la topología de la red (Figura 1), la producción científica existente se agrupa en dos grandes dominios: (1) cosmología y alto corrimiento al rojo, y (2) física exoplanetaria. Este segundo dominio, que es el foco de la presente revisión, presenta la mayor convergencia con la astrobiología, aglutinando descriptores como *PLANETS AND SATELLITES: ATMOSPHERES*, *PLANETS AND SATELLITES: COMPOSITION* y *PLANETS AND SATELLITES: GASEOUS PLANETS*.

El hallazgo más significativo para los fines de esta revisión se observa en el mismo cuadro, en la columna *Keywords-Plus* (ID), en la que el término *Bayesian networks* corresponde al descriptor metodológico dominante. Esto confirma empíricamente la transición de la comunidad desde estimaciones puntuales hacia modelos bayesianos estructurados, necesarios en la gestión de la degeneración entre parámetros atmosféricos (nubes, metalicidad) y del interior (masa, radio, ecuación de estado).

Tabla 1*Palabras clave más relevantes*

Author Keywords (DE)	Art.	Keywords Plus (ID)	Art.
PLANETS AND SATELLITES: ATMOSPHERES	19	BAYESIAN NETWORKS	20
GALAXIES: HIGH-REDSHIFT	12	STARS	20
PLANETS AND SATELLITES: COMPOSITION	12	SPACE TELESCOPES	19
TECHNIQUES: SPECTROSCOPIC	11	GALAXIES	18
GALAXIES: EVOLUTION	10	JAMES WEBB SPACE TELESCOPE	15
METHODS: DATA ANALYSIS	10	PLANETS AND SATELLITES: ATMOSPHERES	15
PLANETS AND SATELLITES: GASEOUS PLANETS	8	COSMOLOGY	12
METHODS: STATISTICAL	7	GALAXIES: HIGH REDSHIFT	12
DISTANCE SCALE	6	REDSHIFT	12
COSMOLOGY: OBSERVATIONS	5	GALAXY EVOLUTION	11

Desde una perspectiva geográfica, la producción científica denota una densa red de colaboración internacional, con una tasa de coautoría superior al 65 % (Tabla 5). Se identifican nodos de influencia consolidados en Estados Unidos, Reino Unido, Países Bajos e Italia, centros que actualmente lideran el desarrollo de códigos de recuperación atmosférica (*retrieval*) y modelos de habitabilidad. En consecuencia, la evidencia bibliométrica respalda la premisa central de esta revisión: la inferencia bayesiana ha superado el rol de una herramienta auxiliar para consolidarse como el marco analítico estándar indispensable en la interpretación de la complejidad y riqueza de los datos proporcionados por el JWST.

3. JWST: Datos y capacidades

El JWST proporciona una amplia variedad de datos de alta calidad que resultan fundamentales para la caracterización atmosférica de exoplanetas (Felix et al., 2025; Kempton & Knutson, 2024). Su capacidad de observación ha realizado una transformación en este campo gracias a la combinación de una amplia cobertura espectral, que abarca aproximadamente desde 0,7 μm hasta 28 μm , y una sensibilidad excepcional que permite detectar señales débiles procedentes de atmósferas distantes (Rocchetto et al., 2016).

La información obtenida proviene, en gran medida, de observaciones espectroscópicas (Kempton & Knutson, 2024). Este tipo de medición permite descomponer la luz recibida en sus diferentes longitudes de onda, lo que facilita identificar firmas espectrales asociadas a moléculas, aerosoles y procesos físicos presentes en la atmósfera del exoplaneta. A partir de estos datos es posible inferir su composición química, su estructura térmica y, en algunos casos, propiedades adicionales como la presencia de nubes o la eficiencia en el transporte de energía.

3.1 Tipos de espectros observacionales

El JWST proporciona dos tipos principales de espectros, obtenidos durante el tránsito o el eclipse del planeta:

- **Espectros de Transmisión** (*Transmission Spectra*): Representan la técnica más utilizada para caracterizar atmósferas exoplanetarias (Barkaoui et al., 2025; Lin et al., 2021; Lueber et al., 2024; Rocchetto et al., 2016; Roy-Perez et al., 2025; Schleich et al., 2024). El principio funciona de manera similar a observar una luz a través de un filtro: cuando el planeta pasa frente a su estrella (tránsito), una fracción de la luz estelar logra atravesar o “filtrarse” por el borde de la atmósfera planetaria, una región conocida como el terminador (Schleich et al., 2024). Al analizar esta luz transmitida, es posible detectar qué longitudes de onda han sido absorbidas por moléculas específicas o bloqueadas por nubes y neblinas, revelando así la composición química del aire (Roy-Perez et al., 2025; Schleich et al., 2024).
- **Espectros de Emisión** (*Emission Spectra*): A diferencia de la transmisión (que filtra luz), esta técnica mide la radiación térmica o “calor” que emite el propio planeta. Estos datos se obtienen durante un eclipse secundario, el momento en que el planeta pasa por detrás de su estrella. Al comparar la luz total del sistema antes del eclipse (estrella + planeta) con la luz recibida cuando el planeta está oculto (solo estrella), se puede aislar la señal emitida por el lado diurno del exoplaneta. Aunque las fuentes indican que el análisis se ha centrado históricamente en datos de WFC3+Spitzer, el JWST está diseñado para mejorar sustancialmente la obtención de estos espectros (Feng et al., 2016).
- **Espectros Resueltos en el Tiempo** (*Time-Resolved Spectra*): Esta modalidad implica la adquisición continua de datos a lo largo de un intervalo temporal para mapear variaciones dinámicas. Aunque frecuentemente se basan en la medición de flujo térmico (emisión), se distinguen analíticamente por capturar la evolución del sistema, ya sea a través de curvas de fase orbitales o monitoreo de rotación. Un ejemplo paradigmático es el estudio del objeto VHS 1256 b con NIRSpec IFU y MIRI MRS, donde se logró identificar variabilidad atmosférica vinculada a nubes de silicatos en movimiento (Lueber et al., 2024).

3.2 Instrumentos y cobertura espacial

Los datos del JWST se obtienen a través de sus cuatro instrumentos principales, cada uno contribuyendo a diferentes rangos del espectro infrarrojo. Estos son resumidos de mejor manera en el cuadro A.

Tabla 2*Instrumentos del JWST, modos de observación y características detectadas*

Instrumento	Modos de Observación Clave	Rango de Longitud de Onda	Tipos de Características Detectadas
NIRSpec	PRISM (baja resolución, $R \sim 30\text{--}300$) (Lin et al., 2021; Roy-Perez et al., 2025)	0.5–5.5 μm (Lueber et al., 2024; Roy-Perez et al., 2025)	Características espectrales de moléculas clave (por ejemplo, H_2O , CO_2 , CH_4 , SO_2 , entre otras) en una sola banda espectral amplia (Lueber et al., 2024).
	Modos con redes de difracción (G395H, G140M, G395M)	2.7–5.2 μm (G395H) (Felix et al., 2025; Roy-Perez et al., 2025)	Espectroscopía de resolución media para detecciones más precisas y cuantitativas de gases atmosféricos (Duan et al., 2024).
NIRISS	SOSS/GR700XD (espectroscopía sin rendija)	0.6–2.8 μm (Bar-kaoui et al., 2025; Felix et al., 2025; Lueber et al., 2024)	Utilizado principalmente en observaciones de tránsito para la detección de moléculas atmosféricas (Felix et al., 2025).
NIRCam	Grism LW (F322W2, F444W)	0.6–5.0 μm (cámara/fotometría) (Rocchetto et al., 2016)	Utilizado para fotometría y espectroscopía mediante grism en el infrarrojo cercano (por ejemplo, 2.5–5.0 μm) (Rocchetto et al., 2016).
MIRI	LRS (Low Resolution Spectrometer)	5.0–10.0 μm (Bar-kaoui et al., 2025; Feng et al., 2016; Rocchetto et al., 2016)	Crucial para restringir las propiedades de nubes, neblinas y sólidos (por ejemplo, PAH) en el infrarrojo medio (Arenales-Lope et al., 2025; Roy-Perez et al., 2025).
	MRS (Medium Resolution Spectrometer)	5–28 μm (Vasist et al., 2025)	Utilizado en objetos fríos (por ejemplo, enanas marrones) y potencialmente en planetas gigantes para obtener una caracterización completa del infrarrojo medio (Vasist et al., 2025).

3.3 Datos clave en atmosferas planetarias

La caracterización detallada de las atmósferas de exoplanetas depende fundamentalmente de la calidad y la cobertura de los datos observacionales. Estos datos constituyen la entrada principal, por ejemplo, para los algoritmos de recuperación, permitiendo validar los modelos teóricos y restringir la composición química con una precisión inédita. A continuación se describen los insumos observacionales utilizados en estos estudios:

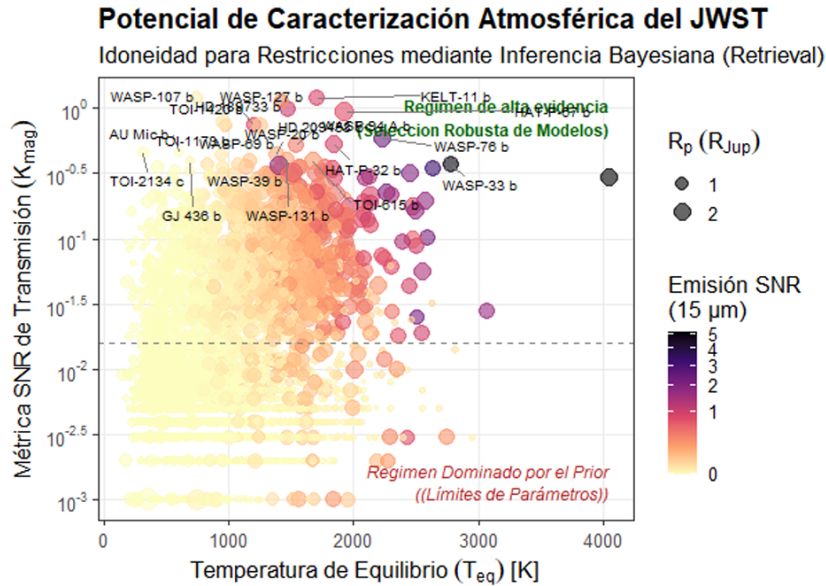
- **Espectros del Programa ERS (Early Release Science):** Conjuntos de datos

públicamente disponibles que sirven como referencias fundamentales, como los espectros de WASP-39 b medidos con *NIRCam*, *NIRISS*, *NIRSpec G395H* y *NIRSpec PRISM*. Estos datos cubren colectivamente 0.5–5.5 μm (Lueber et al., 2024).

- **Mediciones de Abundancias Moleculares:** Los espectros permiten restringir la abundancia de gases atmosféricos clave, incluyendo H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , NH_3 , HCN , H_2S , SO_2 , Na y K (Bachmann et al., 2025; Lueber et al., 2024; Rocchetto et al., 2016).
- **Ejemplo de Detección:** El espectro de WASP-39b permitió la detección de CO_2 a través de su banda a 4.4 μm , usando *NIRSpec-G395H* (Wilkinson et al., 2024).
- **Restricciones de Estructura Térmica (p-T):** Los datos permiten la recuperación de los perfiles de Presión-Temperatura de la atmósfera, con la capacidad de medir la temperatura estratosférica con una precisión de 30–50 K con solo 10 tránsitos (en el caso de TRAPPIST-1e) (Lin et al., 2021).
- **Restricciones de Aerosoles/Nubes:** El amplio rango espectral de *NIRSpec PRISM* es ideal para constreñir la dependencia de la extinción de aerosoles con la longitud de onda (propiedades físicas de las nubes) (Roy-Perez et al., 2025).
- **Datos Sintéticos de Alta Calidad:** Los modelos de ruido del JWST (ej. usando *PANDEXO*) se utilizan para generar espectros sintéticos de alta calidad (ej. $R \approx 100,000$ para TRAPPIST-1e) para probar y validar los métodos de *retrieval* bayesiano (Arenales-Lope et al., 2025; Feng et al., 2016; Lin et al., 2021). La distribución de la calidad de estos datos reales y su idoneidad para el análisis estadístico robusto se ilustra en la Figura 2, donde se destaca la sinergia entre los modos de transmisión y emisión.

Figura 2

Paisaje de observabilidad atmosférica con el JWST



Nota. Distribución de candidatos exoplanetarios en función de su temperatura de equilibrio (T_{eq}) y su métrica de espectroscopía de transmisión (SNR). El tamaño de los puntos escala con el radio planetario (R_p) y el color indica el potencial para espectroscopía de emisión complementaria (MIRI $15\ \mu\text{m}$). Las regiones anotadas distinguen entre el régimen dominado por la verosimilitud (alto SNR), ideal para la selección de modelos bayesianos, y el régimen dominado por el *prior* (bajo SNR). Datos simulados representativos basados en la población de exoplanetas confirmados.

La Figura 2 sintetiza la capacidad del JWST para restringir modelos atmosféricos. Se observa que solo un subconjunto de la población (cuadrante superior) ofrece el contenido de información suficiente para romper degeneraciones complejas sin depender excesivamente de los priors, aspecto importante para la inferencia bayesiana, que se discutirá en las próximas secciones.

3.4 Datos combinados

Un recurso importante en el análisis atmosférico consiste en combinar los nuevos espectros del JWST con observaciones históricas para ampliar la cobertura y mejorar la relación señal-ruido. Frecuentemente, se integran datos del *JWST/NIRCam* con registros anteriores del *HST/WFC3* (en el rango de $1.1\text{--}1.7\ \mu\text{m}$) para obtener un panorama más completo, una estrategia que ha demostrado ser eficaz en el estudio de gigantes gaseosos como HD 209458 b (Bachmann et al., 2025). De igual forma, las observaciones espaciales se complementan con espectros de alta resolución obtenidos desde tierra, utilizando instrumentos como el *VLT/X-shooter* para analizar objetos subestelares (Lueber et al., 2024). Esta capacidad de unir diferentes conjuntos de datos permite a los investigadores ir más allá de la simple identificación molecular, facilitando el cálculo de la composición elemental (metalicidad Z y ratio C/O) necesaria para vincular lo que observamos en la atmósfera con los modelos de formación planetaria (Bardet et al., 2025; Lueber et al., 2024; Rocchetto et al., 2016; Wilkinson et al., 2024).

4. Fundamentos de métodos bayesianos en exoplanetas y atmósferas planetarias

En la era del JWST, la caracterización atmosférica se ha trasladado de un régimen de ajuste de parámetros (χ^2) a uno de mapeo de densidades de probabilidad. Por ejemplo, dado un conjunto de datos espectrales D y un modelo físico M con parámetros θ , la inferencia bayesiana actualiza nuestro conocimiento previo ($\pi(\theta)$) a través de la función de verosimilitud ($L(\theta)$) para obtener la distribución posterior $P(\theta|D, M)$ (Bloot et al., 2023). Si bien los fundamentos axiomáticos son bien conocidos, su aplicación en exoplanetas presenta desafíos específicos que han dictado la evolución de los algoritmos de muestreo.

Más allá de la estimación de parámetros, el desafío central con datos de alta fidelidad es la selección de modelos, para responder a preguntas como: ¿Requiere el espectro observado nubes complejas, perfiles térmicos no isotérmicos o química de desequilibrio? La respuesta yace en la Evidencia Bayesiana (Z), definida como la integral de la verosimilitud sobre todo el espacio de parámetros prior (Bloot et al., 2023):

$$Z = \int L(D|\theta, M)\pi(\theta|M)d\theta$$

Esta cantidad actúa como una métrica de parsimonia automática, penalizando modelos con dimensionalidad excesiva que no mejoran significativamente el ajuste (Navaja de Ockham). La comparación entre dos modelos competidores, M_1 y M_2 , se cuantifica mediante el Factor de Bayes: $B_{12} = Z_1/Z_2$ (Felix et al., 2025; Lueber et al., 2024; Roy-Perez et al., 2025). En el contexto de la astrobiología, este factor es la herramienta estándar para determinar la significancia de detección de una molécula, comparando la evidencia de un modelo con la especie química de interés frente a un “modelo nulo” sin ella (Bachmann et al., 2025; Lueber et al., 2024).

La necesidad de calcular Z ha impulsado el abandono progresivo de los métodos tradicionales de Monte Carlo vía Cadenas de Markov (MCMC) en favor del Muestreo Anidado o *Nested Sampling* (Felix et al., 2025; Feng et al., 2016; Schleich et al., 2024). Algoritmos como *MultiNest* se han establecido como el estándar en códigos de recuperación modernos como *TauREx 3* (Schleich et al., 2024; Zingales et al., 2022), *Poseidon* (Lin et al., 2021), *ARCiS* (Kaeufer et al., 2024; Min et al., 2020) o *BeAR* (Felix et al., 2025), debido a su capacidad para:

- Calcular la Evidencia Bayesiana (Z) directamente, facilitando la selección de modelos (“A Sub-Neptune and a Non-Transiting Neptune-Mass Companion Unveiled by ESPRESSO Around the Bright Late-f Dwarf HD 5278 (TOI-130),” 2021; Felix et al., 2025; Lin et al., 2021; Lueber et al., 2024).
- Muestrear eficientemente distribuciones posteriores multimodales y degeneradas, comunes en espectros con nubes o especies químicas superpuestas (“A Sub-Neptune and a Non-Transiting Neptune-Mass Companion Unveiled by ESPRESSO Around the Bright Late-f Dwarf HD 5278 (TOI-130),” 2021; Kaeufer et al., 2024; Rocchetto et al., 2016).
- Generar muestras para el Promedio Bayesiano de Modelos (BMA), permitiendo inferencias robustas que marginalizan la incertidumbre estructural del modelo físico (Bachmann et al., 2025).

5. Aplicaciones en exoplanetas y atmósferas planetarias

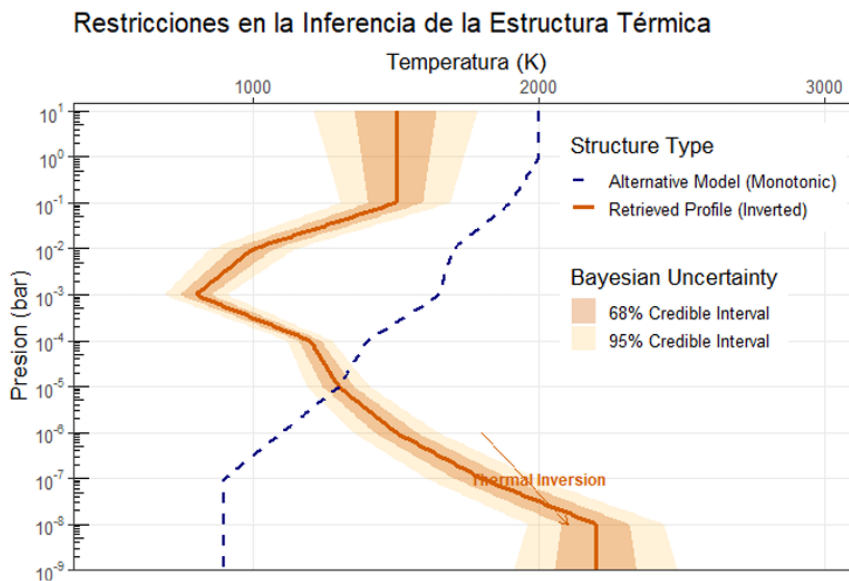
Como se mencionó en la sección 3, el uso de la inferencia bayesiana se ha convertido en el estándar para interpretar los datos exoplanetarios, especialmente ante el volumen y la complejidad de las observaciones proporcionadas por instrumentos como el JWST. A continuación, se examinan las aplicaciones principales de estas técnicas, que abarcan desde el modelamiento de atmósferas, la inferencia de la composición interna, así como su consecuente refinamiento de los parámetros dinámicos del sistema.

5.1 Caracterización y modelado de atmósferas

La caracterización atmosférica conforma el dominio principal donde la inferencia bayesiana resuelve el problema inverso de determinar las propiedades físicas y químicas a partir de espectros de transmisión observados (Lin et al., 2021; Lueber et al., 2024; Rocchetto et al., 2016; Schleich et al., 2024). Este proceso integra la reconstrucción térmica, el modelado de opacidades por aerosoles y el inventario químico multidimensional.

Figura 3

Aplicación de inferencia bayesiana en la recuperación de la estructura térmica



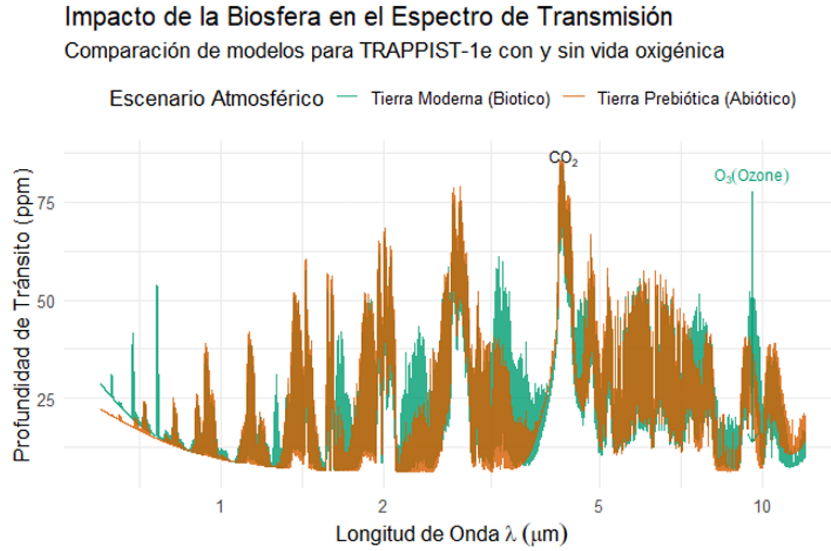
Nota. Ejemplo de resultados de un *retrieval* atmosférico donde se comparan dos posibles arquitecturas P-T. El análisis favorece más al perfil con inversión térmica (línea sólida naranja) sobre un modelo de enfriamiento monótono (línea punteada azul). Las bandas sombreadas (1σ y 2σ) cuantifican la incertidumbre en la temperatura recuperada en función de la presión, demostrando la capacidad del método para distinguir estructuras complejas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos sintéticos de Schleich et al. (2024).

El análisis inicia con la determinación de la estructura termoquímica vertical. Puesto que la temperatura varía con la presión, los métodos bayesianos exploran parametrizaciones desde aproximaciones isotérmicas hasta perfiles flexibles multipunto, centrándose en la detección robusta de inversiones térmicas (Bardet et al., 2025; Bleic et al., 2017; Feng et al., 2016; Kempton & Knutson, 2024; Lueber et al., 2024; Min et al., 2020; Rocchetto et

al., 2016; Schleich et al., 2024; Zingales et al., 2022). Para evitar el sobreajuste mediante estructuras no reales, se utiliza la Evidencia Bayesiana ($\ln Z$) como filtro matemático, tal como se ilustra en la Figura 3, permitiendo discernir objetivamente entre modelos de enfriamiento simple y estructuras con inversión (Lueber et al., 2024; Schleich et al., 2024).

Figura 4

Impacto de la biosfera en el espectro de transmisión de TRAPPIST-1e

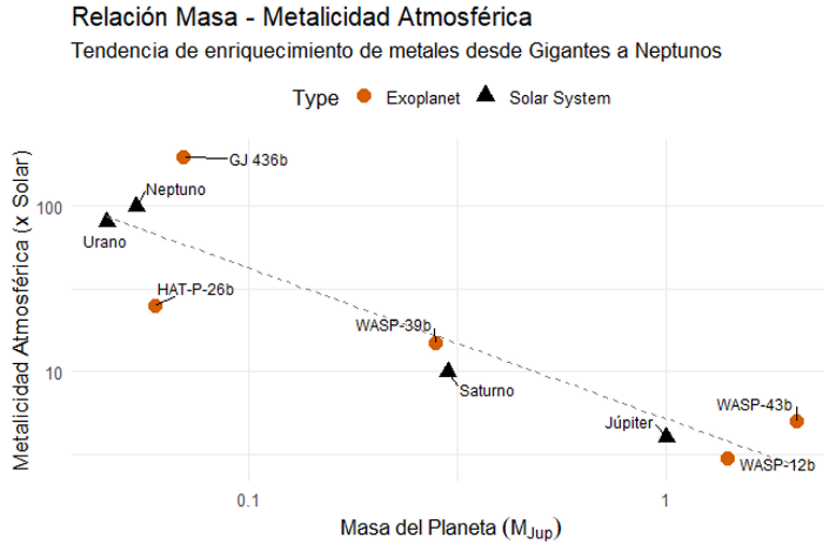


Nota. Comparación de modelos espectrales sintéticos entre un escenario de Tierra Moderna (biótico, línea verde) y una Tierra Prebiótica (abiótico, línea naranja/marrón). Aunque ambos modelos comparten características profundas de CO_2 y vapor de agua, la presencia de una biosfera oxigénica introduce características de absorción únicas, notablemente la banda de Ozono (O_3) cerca de $9.6 \mu\text{m}$. La detección de estas bioseñales requiere que el análisis bayesiano descarte la hipótesis nula (modelo prebiótico) con alta evidencia estadística. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de Lin et al. (2021).

Por otra parte, el modelado de nubes y aerosoles se encuentra naturalmente vinculado al perfil térmico, además son estos los que frecuentemente opacan los espectros. La inferencia bayesiana restringe propiedades microfísicas críticas como la presión de la cima de las nubes (P_{cloud}) (Arenales-Lope et al., 2025; Lin et al., 2021; Schleich et al., 2024), la eficiencia de sedimentación (f_{sed}) y la dependencia de la opacidad con la longitud de onda (Arenales-Lope et al., 2025; Roy-Perez et al., 2025). El cálculo del Factor de Bayes facilita la selección objetiva entre arquitecturas de aerosoles, determinando si los datos requieren prescripciones complejas (nubes no grises o leyes de potencia) o si modelos de nubes grises uniformes son estadísticamente suficientes (Arenales-Lope et al., 2025; Lueber et al., 2024; Roy-Perez et al., 2025).

Figura 5

La relación Masa-Metalicidad en exoplanetas y el Sistema Solar



Nota. Gráfico que muestra el enriquecimiento de elementos pesados (metalicidad relativa al Sol) en función de la masa planetaria. Los puntos negros representan a los gigantes del Sistema Solar, mientras que los puntos naranjas son exoplanetas con abundancias restringidas mediante espectroscopía de transmisión y retrievals bayesianos. La tendencia inversa indica que los planetas de menor masa acretan proporcionalmente más sólidos durante su formación. Fuente: Elaborado con datos adaptados de Wakeford et al. (2017).

Al mismo tiempo, se cuantifican las abundancias químicas (VMR) de especies mayoritarias (H_2O , CH_4 , CO , CO_2) y absorbentes ópticos (Arenales-Lope et al., 2025; Bardet et al., 2025; Gasman et al., 2022; Kempton et al., 2018; Lin et al., 2021; Lueber et al., 2024). La alta sensibilidad del JWST ha permitido expandir este análisis hacia la química de disequilibrio y estructuras multidimensionales. Se evalúa cómo procesos cinéticos, como la mezcla vertical o la fotodisociación, alteran la metalicidad y el ratio C/O respecto al equilibrio termoquímico estándar (Bardet et al., 2025; Kempton & Knutson, 2024). Paralelamente, herramientas avanzadas como *TauREx 2D* permiten reconstruir la atmósfera en 2D o 3D, corrigiendo los sesgos de los modelos unidimensionales en Júpiteres calientes y detectando gradientes térmicos día-noche (Bardet et al., 2025; Blečić et al., 2017; Feng et al., 2016; Kempton & Knutson, 2024; Zingales et al., 2022). Esta precisión es vital para casos como el de TRAPPIST-1e, donde la discriminación entre escenarios bióticos y abióticos depende de diferencias espectrales sutiles en bandas como la del ozono (O_3), indistinguibles sin un tratamiento riguroso de la química y la física atmosférica.

Por último, las abundancias recuperadas permiten derivar ratios elementales y la metalicidad (Z y C/O), que son parámetros que actúan como trazadores de la historia de formación (Bardet et al., 2025; Kempton & Knutson, 2024; Lueber et al., 2024; Min et al., 2020; Vasist et al., 2025). Es importante destacar que la posición de un exoplaneta en el diagrama Masa-Metalicidad es un resultado derivado tras marginalizar sobre los parámetros mencionados anteriormente (nubes, temperatura). En el caso de HAT-P-26b (Wakeford et al., 2017), este enfoque probabilístico fue determinante para romper la degeneración entre una atmósfera de alta metalicidad nubosa y una de baja metalicidad despejada, revelando

la diversidad en los procesos de acreción planetaria.

5.2 Estructura interna y composición

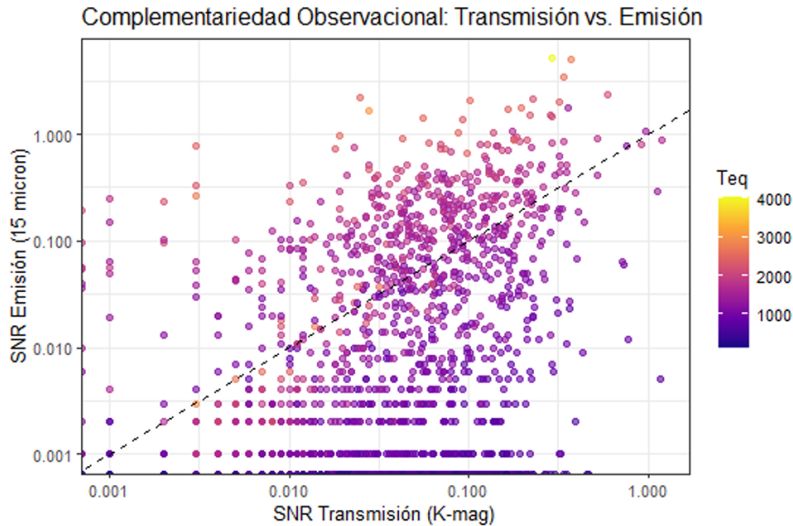
En este subcampo, la inferencia bayesiana se utiliza para romper las degeneraciones innatas a la determinación de la estructura interna de los exoplanetas.

1. **Recuperación de parámetros internos:** A partir de mediciones observacionales (masa, radio, temperatura de equilibrio y metalicidad atmosférica), se utilizan códigos interiores (como *CEPAM*) y un marco bayesiano para restringir parámetros internos como la fracción de masa del núcleo y la fracción global de elementos pesados (metalicidad *bulk*).
2. **Modelado autoconsistente Atmósfera-Interior:** El modelado combinado (por ejemplo, *HADES*) utiliza la inferencia bayesiana para realizar recuperaciones “atmósfera-interior” auto-consistentes, permitiendo restringir la metalicidad y la temperatura intrínseca (T_{int}) del planeta.

Sin embargo, la aplicabilidad de este enfoque dual se limita por la disponibilidad de datos de alta calidad en ambas geometrías de observación. Se observa que solo un subconjunto de candidatos posee un SNR suficiente tanto en transmisión (*NIRSpec/NIRISS*) como en emisión térmica (*MIRI*) para restringir simultáneamente la metalicidad envolvente y la temperatura intrínseca, rompiendo así las degeneraciones que limitan a los modelos de geometría única.

Figura 6

Sinergia observacional para el modelado atmósfera-interior



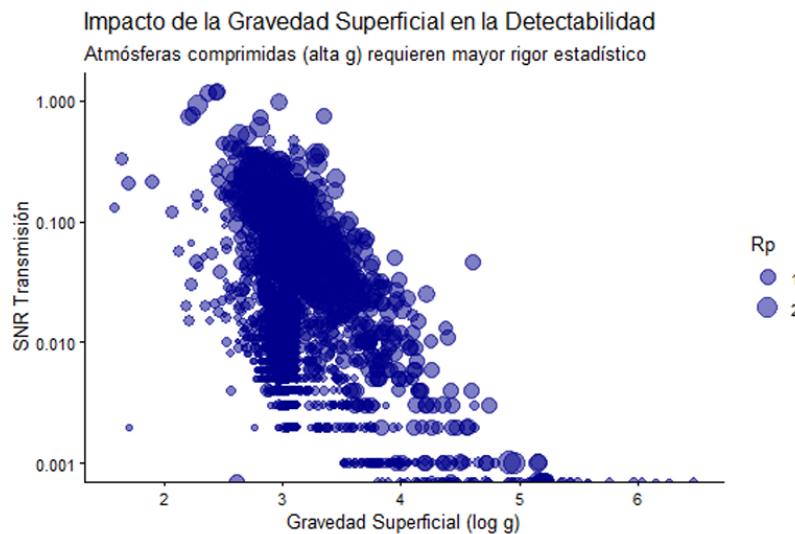
Nota. Comparación de la calidad de señal (SNR) en transmisión (eje Y) frente a emisión térmica a $15\ \mu\text{m}$ (eje X, escala de color). Los objetivos en la región brillante representan los candidatos óptimos para retrievals conjuntos, permitiendo una caracterización global que vincula la química atmosférica con la termodinámica del interior profundo. Fuente: Elaboración propia basada en datos de la Exoplanet Atmosphere Observability Table (EAOT) del archivo MAST (NASA Exoplanet Archive, 2025), que implementa las métricas de espectroscopía de transmisión definidas por Kempton et al. (2018).

3. **Comparación de modelos interiores:** Se utiliza la evidencia bayesiana para comparar diferentes modelos de estructura interna, como aquellos con envolturas homogéneas frente a inhomogéneas (con gradientes de metales).
4. **Estructura de planetas terrestres y sub-neptunos:** La inferencia bayesiana se aplica para cuantificar las distribuciones de propiedades atmosféricas (masa, radio, enriquecimiento en moléculas pesadas) para planetas terrestres y super-Tierra, lo que es esencial para interpretar las atmósferas desgasificadas en el contexto de modelos geofísicos interiores.

Sin embargo, este análisis enfrenta un obstáculo físico fundamental: la compresión atmosférica. Existe una correlación inversa crítica entre la gravedad superficial ($\log g$) y la calidad de la señal de transmisión. Para los objetivos de alta gravedad (super-tierras rocosas), la amplitud de las características espectrales disminuye drásticamente, situando a menudo la señal en el límite del ruido instrumental. En este régimen, el uso de factores de Bayes para la selección de modelos se vuelve indispensable para evitar falsos positivos atmosféricos.

Figura 7

El desafío de la gravedad superficial en la espectroscopía de transmisión



Nota. La relación entre la gravedad superficial planetaria ($\log g_p$) y la métrica de SNR de transmisión revela una disminución significativa de la detectabilidad para planetas compactos y masivos (derecha). El tamaño de los puntos indica el radio planetario. Los métodos bayesianos son críticos en la región de alta gravedad ($\text{SNR} < 0,01$) donde la información espectral es escasa.

5.3 Parámetros del sistema y modelado dinámico

Aunque relacionados con la órbita, estos parámetros son cruciales para la caracterización atmosférica y de interiores:

1. **Análisis de Velocidad Radial y Tránsitos**

La inferencia bayesiana (usando MCMC o *Nested Sampling*) se utiliza para estimar los parámetros orbitales (periodo P , tiempo de conjunción T_0 , inclinación i , excentricidad e) y los parámetros físicos del planeta (radio R_p , masa M_p , gravedad $\log g$) a partir de curvas de luz y mediciones de RV .

2. Selección de Modelos del sistema

El Factor de Bayes se emplea rutinariamente para la selección de modelos, por ejemplo, para determinar si los datos favorecen un modelo con dos planetas frente a uno con un solo planeta, o para comparar diferentes configuraciones orbitales (circulares vs. excéntricas).

6. Discusión

La implementación de métodos bayesianos en la caracterización de atmósferas e interiores exoplanetarios, analizada en la Sección 5, sobrepasa la mejora estadística incremental y se constituye como un marco analítico indispensable en la era del JWST. Ante la disponibilidad de datos de alta fidelidad, la capacidad para cuantificar incertidumbres y resolver degeneraciones paramétricas se establece como un requisito crítico para la evaluación rigurosa de la habitabilidad. A continuación, se examinan las implicaciones de este cambio metodológico en la búsqueda de vida fuera del Sistema Solar.

6.1 Del régimen limitado por fotones al limitado por el modelo

La detección de biofirmas potenciales (ej. O_3 , CH_4 , N_2O) en atmósferas terrestres opera frecuentemente en el límite de la relación señal-ruido instrumental. La inferencia de abundancias químicas y relaciones de mezcla (VMR) mediante marcos bayesianos resulta esencial para la mitigación del riesgo de falsos positivos. A diferencia de los métodos de ajuste por mínimos cuadrados (χ^2), el enfoque bayesiano genera distribuciones posteriores completas para las abundancias moleculares, lo que aporta dos ventajas fundamentales para la astrobiología:

1. **Definición de Límites Superiores:** Permite restringir estadísticamente la abundancia máxima de especies no detectadas, pero biológicamente relevantes, integrando esta información en los modelos de habitabilidad en lugar de omitirla.
2. **Evaluación de Modelos Competitivos:** El cálculo de la evidencia bayesiana ($\ln Z$) cuantifica objetivamente si la inclusión de una biofirma mejora la capacidad explicativa del modelo frente a hipótesis alternativas, como el ruido instrumental o la contaminación estelar.

6.2 Evaluación probabilística de habitabilidad y clasificación planetaria

La interpretación de la habitabilidad a partir de datos del JWST no es inmediata, a pesar de su alta precisión. Como se discutió previamente, las mediciones de masa y radio presentan una degeneración inherente, dado que composiciones internas divergentes pueden converger en densidades medias idénticas. La inferencia bayesiana permite trascender

esta caracterización básica, restringiendo las propiedades atmosféricas e internas que determinan el potencial biológico (“A Sub-Neptune and a Non-Transiting Neptune-Mass Companion Unveiled by ESPRESSO Around the Bright Late-f Dwarf HD 5278 (TOI-130),” 2021; Felix et al., 2025).

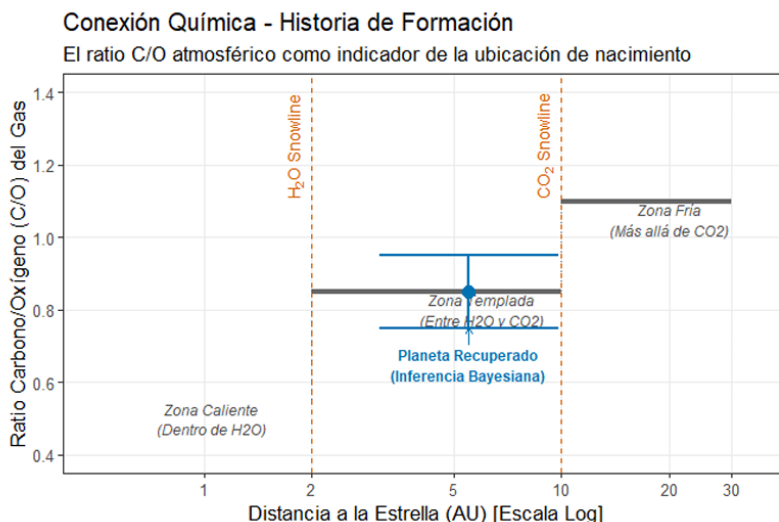
Esta capacidad de discriminación es crítica en el estudio de planetas de baja masa (Sub-Neptunos), donde la densidad por sí sola no permite distinguir entre un *mundo de agua*, un *planeta oceánico* o un cuerpo rocoso con envoltura de H_2/He . Para resolver esta ambigüedad, es necesario recurrir a la caracterización atmosférica detallada. Específicamente, la recuperación bayesiana de una alta abundancia de H_2O en el espectro de transmisión facilita el descarte estadístico de interiores secos, permitiendo la reclasificación del objeto como candidato a mundo de agua (“A Sub-Neptune and a Non-Transiting Neptune-Mass Companion Unveiled by ESPRESSO Around the Bright Late-f Dwarf HD 5278 (TOI-130),” 2021; Kempton & Knutson, 2024).

Consecutivamente, el análisis se extiende a la geofísica planetaria. En el marco de la conexión atmósfera-interior, los modelos bayesianos integran la información observada (masa, radio, temperatura de equilibrio, metalicidad) para inferir parámetros no observables, como la fracción de masa del núcleo y la distribución de elementos pesados (Bloot et al., 2023). Estas restricciones son esenciales en la evaluación de la actividad geológica, que al haberlas combinado con modelos geofísicos, se ha determinado que el vulcanismo y la degasificación de CO_2 son viables incluso en los regímenes tectónicos de *tapa estancada*. Este resultado tiene implicaciones directas para la habitabilidad a largo plazo, dado que la Zona Habitable (HZ) depende de la regulación climática mediante el ciclo carbonato-silicato y la disponibilidad de gases de efecto invernadero (Dorn et al., 2018).

Por último, la evaluación de la habitabilidad actual debe contextualizarse en la historia evolutiva. La inferencia bayesiana es esencial para precisar la metalicidad y el ratio C/O (Kempton & Knutson, 2024; Lueber et al., 2024; Vasist et al., 2025). Estos trazadores químicos funcionan como restricciones observacionales para las teorías de formación, indicando la región de origen en el disco protoplanetario y la eficiencia de acreción de sólidos (Bardet et al., 2025; Kempton & Knutson, 2024; Rocchetto et al., 2016). Comprender el origen de los volátiles mediante estos ratios es indispensable para validar si las condiciones actuales son propicias para la vida o el remanente de una evolución estéril (Kempton & Knutson, 2024).

Figura 8

Conexión entre la química atmosférica y la historia de formación



Nota. Diagrama esquemático que vincula el ratio Carbono/Oxígeno (C/O) actual con la distancia de formación en el disco protoplanetario. Las líneas verticales marcan las “líneas de nieve” donde el H₂O y el CO₂ se condensan, creando variaciones escalonadas en la composición del gas (línea gris). El punto azul representa un exoplaneta cuyo ratio C/O ha sido recuperado mediante inferencia bayesiana, permitiendo restringir su lugar de nacimiento y diferenciar entre formación *in situ* o migración desde regiones externas ricas en hielos. Adaptado del modelo de fraccionamiento de Oberg et al. (2011).

6.3 Detección de biofirmas y química de desequilibrio

El enfoque bayesiano constituye una herramienta metodológica central para abordar la detección de vida mediante la identificación de desequilibrios termodinámicos. Algoritmos como el muestreo anidado (*MultiNest*) y el Factor de Bayes son indispensables en la validación de la detección de especies moleculares y la cuantificación de su significancia estadística frente a hipótesis nulas abióticas (Gasman et al., 2022; Lin et al., 2021; Roy-Perez et al., 2025).

La aplicación rigurosa de estas herramientas permite diferenciar escenarios evolutivos en sistemas de la Zona Habitable, como TRAPPIST-1e. Las simulaciones de recuperación atmosférica sugieren que la sensibilidad del JWST es suficiente para distinguir entre una “Tierra Moderna” (con flujos biogénicos) y una “Tierra Prebiótica”, resolviendo la ambigüedad espectral (Lin et al., 2021). En este análisis, la abundancia de metano (CH₄) actúa como diagnóstico primario, donde las restricciones bayesianas permiten la discriminación entre un origen biológico y geológico, al realizar el análisis en el contexto del inventario atmosférico global (Gasman et al., 2022; Lin et al., 2021).

No obstante, la búsqueda de pares de desequilibrio clásicos como O₂ + CH₄ o O₃ + CH₄ presenta desafíos observacionales notables (Kempton & Knutson, 2024). Los análisis de recuperabilidad indican que la detección de ozono (O₃) requeriría un número elevado de tránsitos para alcanzar una significancia robusta (> 3σ). Ante esta limitación, los métodos bayesianos favorecen estrategias de detección escépticas, identificando combinaciones alternativas como N₂O y ozono, que ofrecen perspectivas de detección más favorables en el infrarrojo medio (Lin et al., 2021).

Adicionalmente, la caracterización abarca marcadores de procesos dinámicos y geológicos. La inferencia bayesiana permite también delimitar la presencia de hidrocarburos (C_2H_2 , C_2H_4) y especies de azufre (SO_2 , CS_2) (Felix et al., 2025). La cuantificación de estas especies no solo indica una química de desequilibrio, sino que confirma la existencia de actividad volcánica activa, un factor determinante para el mantenimiento de ciclos biogeoquímicos a escalas de tiempo geológico (Kempton & Knutson, 2024).

6.4 Robustez estadística y control de falsos positivos

La fiabilidad de las inferencias en astrobiología se fundamenta en la corrección de la interpretación espectral. Sin embargo, los métodos de recuperación enfrentan riesgos de sesgo sistemático por simplificación de modelos. Los planetas calientes, al ser objetos tridimensionales con altos contrastes térmicos día-noche, requieren tratamientos más complejos. Los análisis bayesianos demuestran que la imposición de modelos unidimensionales (1D) en estos casos conduce a estimaciones erróneas en parámetros clave, como la abundancia de metano (CH_4) (Feng et al., 2016; Zingales et al., 2022). Un sesgo en la composición química distorsiona la comprensión integral del sistema planetario (Rocchetto et al., 2016; Schleich et al., 2024).

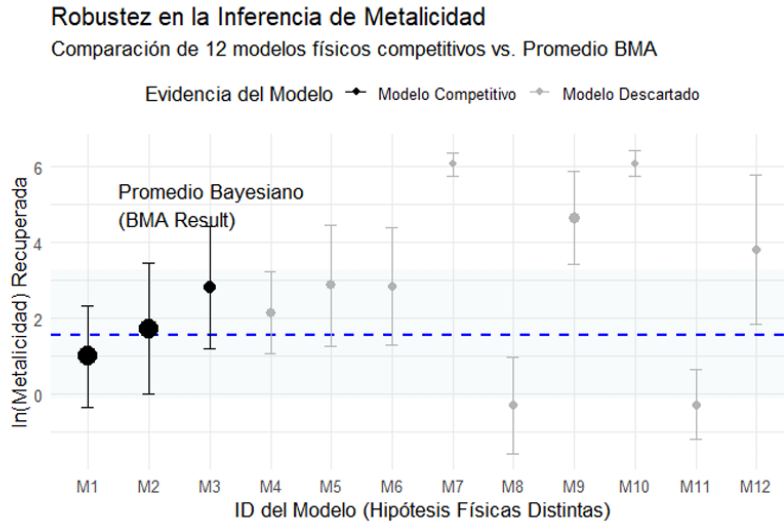
Esta propagación de incertidumbre afecta la química atmosférica. Asumir equilibrio químico, ignorando la cinética de fotodisociación o mezcla vertical, altera las mediciones de metalicidad (Z) y el ratio C/O (Bardet et al., 2025). Dado que estos ratios son los únicos testigos de la historia de formación, errores en el modelado atmosférico conducen a conclusiones incorrectas sobre la estructura del manto y el núcleo (Kempton & Knutson, 2024). Una imprecisión en la metalicidad, por tanto, impide inferir mecanismos de reciclaje tectónico o volcánico, que son esenciales para la habitabilidad.

Para garantizar la integridad de las inferencias, se adoptan criterios de selección de modelos rigurosos. El Factor de Bayes implementa el principio de parsimonia, penalizando la complejidad innecesaria y asegurando que la introducción de parámetros adicionales esté justificada por los datos (Kaeufer et al., 2024; Lueber et al., 2024).

Asimismo, para mitigar el error estructural del modelo (ej. microfísica de nubes incorrecta), se recurre al Promedio Bayesiano de Modelos (BMA). Esta técnica integra múltiples hipótesis físicas ponderadas por su evidencia. El resultado proporciona una estimación de consenso que marginaliza las incertidumbres estructurales, permitiendo que los trazadores químicos observados reflejen la geofísica real del exoplaneta y no los artefactos derivados de asunciones teóricas (Lin et al., 2021; Wilkinson et al., 2024).

Figura 9

Análisis de robustez mediante Promedio Bayesiano de Modelos (BMA)



Nota. Comparación de la metalicidad recuperada ($\ln Z$) para 12 modelos atmosféricos distintos aplicados al mismo set de datos. El tamaño de los puntos es proporcional al peso del modelo (W_q), derivado de su Criterio de Información Bayesiano (BIC). Aunque los modelos individuales varían, el BMA (línea discontinua púrpura y banda de error) proporciona una estimación de consenso robusta ($Z \approx 4,8 \times \text{Solar}$), integrando la incertidumbre estructural del modelo.

7. Conclusiones

El análisis de la literatura reciente indica que la aplicación de métodos bayesianos a los datos del JWST ha conducido a un cambio de paradigma en la ciencia exoplanetaria. La alta fidelidad espectral actual no solo exige un incremento sustancial en la complejidad de los modelos físicos para mitigar sesgos sistemáticos, sino que ha hecho viable, por primera vez, la vinculación estadística robusta entre la atmósfera y la estructura interna planetaria.

La integración de la inferencia bayesiana ha permitido superar las barreras tradicionales impuestas por la degeneración inherente a las mediciones de masa y radio. La espectroscopía de transmisión se ha consolidado como un mecanismo para restringir la metalicidad y la temperatura intrínseca (T_{int}), parámetros que, al incorporarse como *priors* informativos, permiten estimar la masa del núcleo con una precisión antes no posible. El análisis de *WASP-39b* es un buen ejemplo de este avance, donde el acoplamiento de datos espectrales reveló una fracción de elementos pesados en el interior cercana al 45%, resultado que es inaccesible mediante fotometría convencional (Wilkinson et al., 2024). Al mismo tiempo, en la población de sub-Neptunos, el análisis bayesiano resulta indispensable para resolver la ambigüedad entre escenarios de “mundos oceánicos” y “planetas rocosos” con envolturas de H/He , utilizando la restricción del peso molecular medio como discriminante crítico (Barkaoui et al., 2025).

Por otra parte, la sensibilidad del JWST ha evidenciado que las simplificaciones heredadas de la instrumentación previa introducen sesgos inaceptables en la interpretación física. Las recuperaciones atmosféricas confirman que la asunción de perfiles de presión-temperatura ($p-T$) isotérmicos induce errores sistemáticos en las abundancias químicas, lo que obliga a adoptar parametrizaciones flexibles para evitar el sobreajuste en espectros de

alta relación señal-ruido (Schleich et al., 2024). Esta necesidad de complejidad se prolonga a la geometría y la química; en planetas ultra calientes, los modelos unidimensionales (1D) ignoran la heterogeneidad térmica día-noche, sesgando así las temperaturas recuperadas. Esto ha impulsado la implementación de códigos 2D como *TauREx 2D* (Zingales et al., 2022). Asimismo, la incorporación de química de desequilibrio ha demostrado alterar drásticamente las estimaciones de metalicidad y ratios C/O respecto al equilibrio termoquímico, que es un requisito crítico para evitar inferencias erróneas sobre la historia de formación planetaria derivadas de procesos fotoquímicos (Bardet et al., 2025).

En el ámbito astrobiológico, el análisis bayesiano se establece como el filtro estadístico primario para evaluar la detectabilidad de biomarcadores, aunque los resultados requieren una interpretación conservadora. Las simulaciones para sistemas como TRAPPIST-1e señalan que la detección de especies como el ozono (O_3) presenta una dificultad extrema, requiriendo tiempos de integración prolongados, aunque combinaciones agnósticas de N_2O y O_3 ofrecen perspectivas estadísticas más favorables (Lin et al., 2021). Pese a estas limitaciones, el JWST mantiene la capacidad de diferenciar entre escenarios de “Tierra prebiótica” y “Tierra moderna” mediante la cuantificación precisa de CH_4 y CO_2 (Lin et al., 2021). Adicionalmente, la técnica ha validado su utilidad para refutar clasificaciones tempranas; en TOI-270 d, la inferencia bayesiana reveló una química compleja rica en azufre (CS_2 , SO_2), desafiando su categorización como “mundo hiceánico” habitable (Felix et al., 2025), al mismo tiempo que confirma la viabilidad de detectar hidrocarburos prebióticos bajo las configuraciones instrumentales adecuadas (Gasman et al., 2022).

Sin embargo, la aplicación de la estadística bayesiana conlleva sus desafíos metodológicos. La evidencia de detección (Factor de Bayes) muestra sensibilidad ante decisiones de procesamiento de datos, como el agrupamiento espectral (*binning*), que puede inducir falsos positivos en la identificación molecular, sugiriendo la preferencia por análisis a resolución nativa (Felix et al., 2025). Del igual manera, la selección de modelos basados puramente en criterios estadísticos no garantiza una corrección física adecuada por defecto. En atmósferas como la de *WASP-39b*, ciertos modelos de nubes pueden ser favorecidos numéricamente pero a la vez introducir opacidades continuas no reales que enmascaran las señales de especies como H_2O y SO_2 (Lueber et al., 2024). En conclusión, la operación del JWST ha transformado la caracterización exoplanetaria, por ejemplo desde una búsqueda de especies aisladas a una ciencia de física atmosférica detallada, donde la robustez estadística constituye el soporte fundamental para diferenciar estados evolutivos y contextos geoquímicos globales.

A. Resumen de datos

Tabla 3

Información principal sobre los datos bibliométricos

Parámetro	Valor
Período temporal	2016 : 2025
Fuentes (Revistas, Libros, etc.)	15
Documentos	103
Tasa de crecimiento anual%	35.11
Edad promedio de documentos	2.03
Citas promedio por documento	20.04
Citas promedio por año por documento	6.108
Referencias	1

Tabla 4

Tipos de documentos y contenidos

Descripción	Cantidad
Tipos de Documentos	
Artículo	99
Ponencia de conferencia	2
Revisión	2
Contenidos de Documentos	
Keywords Plus (ID)	458
Palabras clave del autor (DE)	152

Tabla 5

Autores y colaboración

Parámetro	Valor
Autores	1087
Apariciones de autores	1463
Autores de documentos de un solo autor	1
Documentos de un solo autor	1
Documentos por autor	0.0948
Co-autores por documento	14.2
Colaboraciones internacionales%	65.05

Tabla 6*Fuentes más relevantes*

Fuente	Artículos
ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS	35
ASTROPHYSICAL JOURNAL	21
MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY	17
ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS	9
ASTRONOMICAL JOURNAL	8
ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES	2
PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING	2
UNIVERSE	2
ENTROPY	1
JOURNAL OF COSMOLOGY AND ASTROPARTICLE PHYSICS	1

Referencias

- A sub-neptune and a non-transiting neptune-mass companion unveiled by ESPRESSO around the bright late-f dwarf HD 5278 (TOI-130). (2021). *Astronomy and Astrophysics*, 648. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040034>
- Arenales-Lope, R., Molaverdikhani, K., Dubey, D., Ercolano, B., Grübel, F., y Rab, C. (2025). *Polycyclic aromatic hydrocarbons in exoplanet atmospheres: A detectability study*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 536, 1555–1578. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae2619>
- Bachmann, N., Kreidberg, L., Mollière, P., Deming, D., y Tsai, S. M. (2025). *Osiris revisited: Confirming a solar metallicity and low c/o in HD 209458 b*. *Astronomy and Astrophysics*, 700. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202555577>
- Bardet, D., Changeat, Q., Venot, O., y Panek, E. (2025). *Re-analysis of ten hot-jupiter atmospheres with disequilibrium chemistry retrieval*. *Astronomy and Astrophysics*, 699. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202453518>
- Barkaoui, K., Korth, J., Gaidos, E., Agol, E., Parviainen, H., Pozuelos, F. J., Palle, E., Narita, N., Grimm, S., Brady, M., Bean, J. L., Morello, G., Rackham, B. V., Burgasser, A. J., Grootel, V. V., Rojas-Ayala, B., Seifahrt, A., Marfil, E., Passegger, V. M., ... Zúñiga-Fernández, S. (2025). *TOI-2015 b: A sub-neptune in strong gravitational interaction with an outer non-transiting planet*. *Astronomy and Astrophysics*, 695. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452916>
- Blecic, J., Dobbs-Dixon, I., y Greene, T. (2017). *The implications of 3D thermal structure on 1D atmospheric retrieval*. *The Astrophysical Journal*, 848, 127. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8171>
- Bloot, S., Miguel, Y., Bazot, M., y Howard, S. (2023). *Exoplanet interior retrievals: Core masses and metallicities from atmospheric abundances*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 523, 6282–6292. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1873>

- Chevallard, J., Curtis-Lake, E., Charlot, S., Ferruit, P., Giardino, G., Franx, M., Maseda, M. V., Amorin, R., Arribas, S., Bunker, A., Carniani, S., Husemann, B., Jakobsen, P., Maiolino, R., Pforr, J., Rawle, T. D., Rix, H. W., Smit, R., y Willott, C. J. (2019). *Simulating and interpreting deep observations in the hubble ultra deep field with the JWST/NIRSpec low-resolution 'prism'*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 483, 2621–2640. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2426>
- Dorn, C., Noack, L., y Rozel, A. B. (2018). *Outgassing on stagnant-lid super-earths*. Astronomy and Astrophysics, 614. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731513>
- Duan, Q., Conselice, C. J., Li, Q., Harvey, T., Austin, D., Ormerod, K., Trussler, J., y Adams, N. (2024). *Adding value to JWST spectra and photometry: Stellar population and star formation properties of spectroscopically confirmed JADES and CEERS galaxies at $z > 7$* . Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 529, 4728–4744. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae872>
- Felix, L., Kitzmann, D., Demory, B. O., y Mordasini, C. (2025). *Competing chemical signatures in the atmosphere of TOI-270 d: Inference of sulfur and carbon chemistry*. Astronomy and Astrophysics, 701. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202555194>
- Feng, Y. K., Line, M. R., Fortney, J. J., Stevenson, K. B., Bean, J., Kreidberg, L., y Parmentier, V. (2016). *The impact of non-uniform thermal structure on the interpretation of exoplanet emission spectra*. The Astrophysical Journal, 829, 52. <https://doi.org/10.3847/0004-637x/829/1/52>
- Galan, A., Caminha, G. B., Knollmüller, J., Roth, J., y Suyu, S. H. (2024). *El gordo needs el anzuelo: Probing the structure of cluster members with multi-band extended arcs in JWST data*. Astronomy and Astrophysics, 689. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202449876>
- Gardner, J. P., Mather, J. C., Clampin, M., Doyon, R., Greenhouse, M. A., Hammel, H. B., Hutchings, J. B., Jakobsen, P., Lilly, S. J., Long, K. S., Lunine, J. I., Mccaughrean, M. J., Mountain, M., Nella, J., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Rix, H.-W., Smith, E. P., Sonneborn, G., ... Wright, G. S. (2006). *The james webb space telescope*. Space Science Reviews, 123(4), 485–606. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-8315-7>
- Gasman, D., Min, M., y Chubb, K. L. (2022). *Investigating the detectability of hydrocarbons in exoplanet atmospheres with JWST*. Astronomy and Astrophysics, 659. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141468>
- Kaeufer, T., Woitke, P., Kamp, I., Kanwar, J., y Min, M. (2024). *Disentangling the dust and gas contributions of the JWST/MIRI spectrum of sz 28*. Astronomy and Astrophysics, 690. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450891>
- Kempton, E. M.-R., Bean, J. L., Louie, D. R., et al. (2018). *A Framework for Prioritizing the TESS Planetary Candidates for Atmospheric Characterization*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 130(993), 114401. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aadced>
- Kempton, E. M.-R., y Knutson, H. A. (2024). *Transiting exoplanet atmospheres in the era of JWST*. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 90(1), 411–464. <https://doi.org/10.2138/rmg.2024.90.12>
- Lin, Z., Macdonald, R. J., Kaltenegger, L., y Wilson, D. J. (2021). *Differentiating modern and prebiotic earth scenarios for TRAPPIST-1e: High-resolution transmission spectra and predictions for JWST*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 505, 3562–3578. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1486>
- Lueber, A., Novais, A., Fisher, C., y Heng, K. (2024). *Information content of JWST spectra of WASP-39b*. Astronomy and Astrophysics, 687. <https://doi.org/10.1051/0004->

6361/202348802

- McElwain, M. W., Feinberg, L. D., Perrin, M. D., Clampin, M., Mountain, C. M., Lallo, M. D., Lajoie, C.-P., Kimble, R. A., Bowers, C. W., Stark, C. C., Acton, D. S., Atkinson, C., Barinek, B., Barto, A., Basinger, S., Beck, T., Bergkoetter, M. D., Bluth, M., Boucarut, R. A., ... Zielinski, T. P. (2023). *The james webb space telescope mission: Optical telescope element design, development, and performance*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 135(1047), 058001. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/acada0>
- Menzel, M., Davis, M., Parrish, K., Lawrence, J., Stewart, A., Cooper, J., Irish, S., Mosier, G., Levine, M., Pitman, J., Walsh, G., Maghami, P., Thomson, S., Wooldridge, E., Boucarut, R., Feinberg, L., Turner, G., Kalia, P., y Bowers, C. (2023). *The design, verification, and performance of the james webb space telescope*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 135(1047), 058002. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/acbb9f>
- Min, M., Ormel, C. W., Chubb, K., Helling, C., y Kawashima, Y. (2020). *The ARCIS framework for exoplanet atmospheres: Modelling philosophy and retrieval*. Astronomy and Astrophysics, 642. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937377>
- NASA Exoplanet Archive. (2025). *Transiting planets table (Versions Version: 2025-12-01 10:15)*. NExScI-Caltech/IPAC. <https://doi.org/10.26133/NEA37>
- Oberg, K. I., Murray-Clay, R., y Bergin, E. A. (2011). *The effects of snowlines on c/o in planetary atmospheres*. Astrophysical Journal Letters, 743(1), L16. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/743/1/L16>
- Rigby, J., Perrin, M., McElwain, M., Kimble, R., Friedman, S., Lallo, M., Doyon, R., Feinberg, L., Ferruit, P., Glasse, A., Rieke, M., Rieke, G., Wright, G., Willott, C., Colon, K., Milam, S., Neff, S., Stark, C., Valenti, J., ... Zonak, S. (2023). *The science performance of JWST as characterized in commissioning*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 135(1046), 048001. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/acb293>
- Rocchetto, M., Waldmann, I. P., Venot, O., Lagage, P.-O., y Tinetti, G. (2016). *Exploring biases of atmospheric retrievals in simulated JWST transmission spectra of hot jupiters*. The Astrophysical Journal, 833, 120. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/1/120>
- Roy-Perez, J., Pérez-Hoyos, S., Barrado-Izagirre, N., y Chen-Chen, H. (2025). *The role of cloud particle properties in the WASP-39b transmission spectrum based on JWST/NIRSpec observations*. Astronomy and Astrophysics, 694. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450142>
- Sandles, L., Curtis-Lake, E., Charlot, S., Chevallard, J., y Maiolino, R. (2022). *Bayesian hierarchical modelling of the m^* -SFR relation from $1 < z < 6$ in ASTRO-DEEP*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 515(2), 2951–2969. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1999>
- Schleich, S., Saikia, S. B., Changeat, Q., Güdel, M., Voigt, A., y Waldmann, I. (2024). *Knobs and dials of retrieving JWST transmission spectra i. The importance of p–t profile complexity*. Astronomy and Astrophysics, 690. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202451845>
- Vasist, M., Mollière, P., Kühnle, H., Patapis, P., Absil, O., Louppe, G., Lagage, P.-O., Waters, L. B. F. M., Güdel, M., Henning, Th., Vandenbussche, B., Barrado, D., Decin, L., Pye, J. P., Tremblin, P., y Whiteford, N. (2025). *Panchromatic characterization of the Y0 brown dwarf WISEP J173835.52+273258.9 using JWST/MIRI*.

- Astronomy & Astrophysics. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202554282>
- Wakeford, H. R., Sing, D. K., Kataria, T., Deming, D., Nikolov, N., Lopez, E. D., Tremblin, P., Amundsen, D. S., Lewis, N. K., Mandell, A. M., Fortney, J. J., Knutson, H., Benneke, B., y Evans, T. M. (2017). *HAT-p-26b: A neptune-mass exoplanet with a well-constrained heavy element abundance*. *Science*, 356(6338), 628–631. <https://doi.org/10.1126/science.aah4668>
- Wilkinson, C., Charnay, B., Mazevet, S., Lagrange, A. M., Chomez, A., Squicciarini, V., Panek, E., y Mazoyer, J. (2024). *Breaking degeneracies in exoplanetary parameters through self-consistent atmosphere-interior modelling*. *Astronomy and Astrophysics*, 692. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348945>
- Zingales, T., Falco, A., Pluriel, W., y Leconte, J. (2022). *Toward a multidimensional analysis of transmission spectroscopy: III. Modeling 2D effects in retrievals with TauREx*. *Astronomy and Astrophysics*, 667. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243492>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

El papel dual de los biofilms en la exploración espacial

Victor Stephen Santos-Linares^{1,2}

<https://orcid.org/0009-0009-0379-7469>

Julio César Tineo-Pérez^{2,3}

<https://orcid.org/0009-0007-2989-3438>

Jehoshua Macedo-Bedoya^{1,2,3}

<https://orcid.org/0009-0008-7958-5318>

¹Laboratorio de Ecología Tropical y Análisis de Datos, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

²Red de Investigadores en Biodiversidad, Ecología y Conservación (RIBEC), Perú

³Asociación Peruana de Astrobiología, Perú

E-mail: jehoshua.macedo@unmsm.edu.pe

Recibido: 30/11/2025 • Revisado: 20/12/2025 • Aceptado: 24/12/2025

Resumen

Las comunidades microbianas adheridas a superficies representan un componente inevitable de los hábitats espaciales y muestran respuestas fisiológicas particulares bajo condiciones de microgravedad, incluyendo un aumento en la complejidad estructural y en la tolerancia al estrés. Estas características incrementan los riesgos asociados a la degradación de materiales, la alteración de sistemas críticos y la salud de las tripulaciones en entornos cerrados. Sin embargo, dichas propiedades también abren oportunidades para su aprovechamiento en procesos de reciclaje, producción de materiales y mantenimiento de sistemas autosuficientes durante misiones de larga duración. Este trabajo analiza de forma sintética esta dualidad funcional, resaltando la importancia de estrategias de control y uso dirigido en el contexto de la exploración humana más allá de la Tierra.

Palabras clave: Comunidades microbianas, hábitats espaciales, microgravedad, reciclaje biológico, sistemas autosuficientes.

Citar como:

Santos-Linares, V. S., Tineo-Pérez, J. C., y Macedo-Bedoya, J. (2025). El papel dual de los biofilms en la exploración espacial. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(2), 42–55. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n2.3>

RESEARCH ARTICLE

The dual role of biofilms in space exploration

Victor Stephen Santos-Linares^{1,2}

<https://orcid.org/0009-0009-0379-7469>

Julio César Tineo-Pérez^{2,3}

<https://orcid.org/0009-0007-2989-3438>

Jehoshua Macedo-Bedoya^{1,2,3}

<https://orcid.org/0009-0008-7958-5318>

¹Laboratorio de Ecología Tropical y Análisis de Datos, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

²Red de Investigadores en Biodiversidad, Ecología y Conservación (RIBEC), Perú

³Asociación Peruana de Astrobiología, Perú

E-mail: jehoshua.macedo@unmsm.edu.pe

Recibido: 30/11/2025 • Revisado: 20/12/2025 • Aceptado: 24/12/2025

Abstract

Microbial communities attached to surfaces constitute an unavoidable component of space habitats and exhibit distinctive physiological responses under microgravity conditions, including increased structural complexity and enhanced stress tolerance. These characteristics elevate the risks associated with material degradation, disruption of critical systems, and crew health in confined environments. However, such properties also create opportunities for their exploitation in recycling processes, material production, and the maintenance of self-sustaining systems during long-duration missions. This work provides a concise analysis of this functional duality, highlighting the importance of control strategies and targeted applications in the context of human exploration beyond Earth.

Keywords: Biological recycling; microbial communities; microgravity; self-sustaining systems; space habitats.

Cite as:

Santos-Linares, V. S., Tineo-Pérez, J. C., y Macedo-Bedoya, J. (2025). El papel dual de los biofilms en la exploración espacial. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(2), 42–55.

<https://doi.org/10.69976/aspast.v2n2.3>

Introducción

Los biofilms han acompañado a la microbiología desde sus inicios. Antonie van Leeuwenhoek, en el siglo XVII, describió por primera vez comunidades microbianas organizadas al observar el sarro dental bajo sus lentes artesanales (Donato, 2018). Aunque su hallazgo pasó desapercibido durante siglos, constituye la primera evidencia documentada de la existencia de biofilms (Guerrero, 2023). No fue sino hasta mediados del siglo XX que diversos estudios demostraron que muchas bacterias crecen y se comportan de manera distinta cuando están adheridas a superficies, lo que impulsó una nueva forma de entender la vida microbiana (Heukelekian y Heller, 1940; Percival et al., 2011).

Con el avance de la microscopía electrónica durante las décadas de 1960 y 1970, se logró caracterizar la estructura tridimensional de los biofilms y reconocer la relevancia de su matriz extracelular, lo que marcó un cambio conceptual decisivo en su estudio (Donlan, 2002; Hall-Stoodley y Stoodley, 2009). Investigadores como Characklis y Costerton consolidaron la visión moderna de los biofilms como una comunidad microbiana autoorganizada y firmemente adherida a superficies (Characklis, 1973; Costerton et al., 1978). Además, se evidenció que su resistencia, reforzada por la matriz polimérica extracelular (EPS), les permite persistir incluso en condiciones extremas (Branda et al., 2005). A medida que la humanidad expande su presencia más allá de la superficie terrestre, estos ecosistemas microscópicos viajan con nosotros, transformando los hábitats espaciales en sistemas cerrados y biológicamente activos, como lo demuestran numerosos estudios realizados en la Estación Espacial Internacional (La Duc et al., 2004; Zea et al., 2017; Urbaniak et al., 2022).

Esta inevitable transferencia de vida microbiana ha puesto en evidencia una paradoja biológica central para el futuro de la exploración espacial: los biofilms son, al mismo tiempo, un contaminante peligroso y un recurso biotecnológico. Por un lado, su capacidad para adherirse a superficies, promover la biocorrosión y actuar como reservorios de patógenos representa un riesgo permanente para la integridad estructural de las naves y para la salud de las tripulaciones (Yadav, 2018; Marra et al., 2024). Por otro lado, su eficiencia metabólica y notable resistencia ofrecen oportunidades únicas para fortalecer la autonomía espacial, facilitando la reutilización de recursos in situ (ISRU), el soporte vital bioregenerativo (BLSS) y la protección frente a la radiación (Niederdorfer et al., 2017; Philipp et al., 2024). Esta dualidad convierte a los biofilms en un elemento clave para las misiones espaciales de larga duración. Más allá de describir su comportamiento en microgravedad, este trabajo examina cómo su presencia influye tanto en la operación de sistemas espaciales cerrados como en el desarrollo de estrategias biotecnológicas orientadas a incrementar la autonomía fuera de la Tierra. Además, se abordan los principales desafíos asociados a su control, así como su potencial aplicación en sistemas de soporte vital regenerativos y en la utilización de recursos locales, aportando un marco de análisis que permite considerar a los biofilms no solo como un riesgo, sino también como un componente funcional en el diseño de futuras misiones espaciales.

Metodología

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva orientada a analizar la doble función de los biofilms en el contexto de la exploración espacial. Para ello, se consultaron bases de datos académicas como Google Scholar, PubMed, Scopus y Web of Science.

La búsqueda de artículos científicos, tesis, revisiones y otros documentos relevantes se realizó mediante términos específicos como “biofilms”, “matriz polimérica extracelular”, “microgravedad” y “biotecnología espacial”. Los documentos seleccionados fueron evaluados críticamente y su contenido se sintetizó en un formato coherente que permitiera abordar tanto los riesgos como las aplicaciones potenciales de los biofilms en misiones espaciales de larga duración. Asimismo, se establecieron criterios de inclusión y exclusión para asegurar la pertinencia, calidad y enfoque temático de la literatura analizada.

Formación y respuesta fisiológica de los biofilms en condiciones de microgravedad

Los biofilms son comunidades microbianas cuya formación depende de la adhesión celular, la señalización química y las condiciones fisicoquímicas del entorno. En microgravedad, estos procesos experimentan cambios profundos. La ausencia de sedimentación y convección altera la forma en que los microorganismos se aproximan a las superficies, favoreciendo patrones de adhesión distintos a los observados en la Tierra (Zea et al., 2020). Estudios realizados en plataformas de microgravedad simulada y en la Estación Espacial Internacional han mostrado que especies como *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* o *Candida albicans* desarrollan biofilms más gruesos, con mayor biomasa y arquitecturas más irregulares que en condiciones normales de gravedad (Kim et al., 2013; Satoh et al., 2011; Hupka et al., 2023). Asimismo, se ha documentado que la microgravedad modifica la expresión génica relacionada con la síntesis de EPS, incrementando la producción de polisacáridos y proteínas estructurales que densifican la matriz y aumentan su capacidad protectora (Ali et al., 2023).

La microgravedad también afecta la motilidad microbiana y la dinámica de los gradientes químicos. En ausencia de convección, los gradientes de nutrientes y desechos se vuelven más estables y definidos, lo que genera microambientes marcados dentro del biofilm y acelera la diferenciación celular (Justiniano, 2023). Este fenómeno favorece la formación de microcolonias más robustas y estructuras tridimensionales complejas, lo que podría estar asociado a la ausencia de una referencia gravitacional definida. Además, la microgravedad promueve la agregación celular en suspensión, un paso previo a la adhesión y al establecimiento del biofilm sobre superficies inertes de hábitats espaciales como polímeros, metales o componentes de sistemas de soporte vital (Zea et al., 2020).

En conjunto, la evidencia disponible indica que los incrementos en el grosor, la biomasa y la complejidad estructural de los biofilms en microgravedad no son uniformes entre microorganismos ni plataformas experimentales. Estudios comparativos han mostrado que bacterias modelo como *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli* presentan respuestas más consistentes, con biofilms más densos y organizados, mientras que otros taxones exhiben variabilidad significativa en función de las condiciones de cultivo y del sistema experimental empleado (Nickerson et al., 2000; Wilson et al., 2007). Asimismo, los resultados obtenidos en experimentos de vuelo espacial tienden a diferir de aquellos generados en plataformas de microgravedad simulada, lo que sugiere que factores asociados al entorno orbital, como la radiación y el confinamiento, contribuyen de manera decisiva a la arquitectura del biofilm (Crabbé et al., 2010; Kim et al., 2022). Estas discrepancias resaltan incertidumbres persistentes relacionadas con la extrapolación entre plataformas y la duración limitada de muchos estudios, subrayando la necesidad de diseños experimentales comparativos y estandarizados para evaluar de forma robusta el comportamiento de los biofilms en el

espacio.

Riesgos asociados a biofilms en el espacio

Los biofilms que se desarrollan en entornos espaciales representan una potencial amenaza que involucra riesgos estructurales, operacionales y sanitarios (Figura 1). La adhesión microbiana a estructuras metálicas, polímeros y elastómeros utilizados en naves y estaciones espaciales estimula procesos de degradación inducida microbiológicamente (Klintworth et al., 1999; Horneck et al., 2010). Estos procesos comprometen la integridad y confiabilidad de sistemas críticos, incluidos los circuitos de agua potable, control ambiental, generación de energía y ventilación (Novikova et al., 2006; Marra et al., 2024). Estudios realizados en vuelos espaciales y en microgravedad simulada han demostrado que tanto bacterias como hongos forman matrices extracelulares densas en comparación con condiciones terrestres, acelerando el deterioro de materiales en la Estación Espacial Internacional (Checinska Sielaff et al., 2019; Hupka et al., 2023).

Desde el punto de vista sanitario, los biofilms incrementan el riesgo para la tripulación a través de al menos dos mecanismos complementarios. En primer lugar, funcionan como reservorios persistentes de microorganismos oportunistas, algunos de los cuales muestran incrementos en la virulencia, resistencia al estrés y tolerancia a antimicrobianos en condiciones de microgravedad (Zea et al., 2017; Urbaniak et al., 2022). En segundo lugar, la estructura tridimensional del biofilm y la abundante producción de EPS reducen la eficacia de los procedimientos de limpieza y desinfección, un problema particularmente crítico en entornos cerrados donde el uso de biocidas está restringido por su toxicidad para la tripulación y su compatibilidad con los materiales (La Duc et al., 2004).

Estudios han demostrado que microorganismos cultivados en microgravedad presentan cambios en la expresión génica, incluyendo respuesta al estrés oxidativo y aumentando la resistencia, lo que sugiere que los protocolos de higiene convencionales no son directamente extrapolables al contexto espacial (Wilson et al., 2002; Zea et al., 2017). Este riesgo se ve incrementado por la disfunción del sistema inmune inducida por el vuelo espacial, caracterizada por alteraciones en la respuesta inflamatoria, disminución de la actividad de células NK y cambios en la microbiota humana, lo que incrementa la susceptibilidad de los astronautas a infecciones oportunistas durante misiones prolongadas (Crucian et al., 2018; Justiniano et al., 2023).

Adicionalmente, la presencia de biofilms complica la gestión y estabilidad de los sistemas biológicos cerrados empleados para el soporte vital, como los sistemas de reciclaje de agua, filtros de CO₂ y módulos de cultivo vegetal (Mora et al., 2019). La heterogeneidad microambiental generada dentro de los biofilms, con gradientes marcados de oxígeno, pH y nutrientes puede alterar los procesos biogeoquímicos previstos, reducir la eficiencia metabólica de los consorcios microbianos diseñados y favorecer la proliferación de especies no deseadas (Cortesão et al., 2020). Estas alteraciones tienen implicancias directas para la resiliencia, eficiencia y autonomía de misiones de larga duración, particularmente en escenarios de exploración y asentamiento extraplanetario donde la capacidad de mantenimiento y reemplazo de componentes es limitada (Berliner et al., 2021).

Figura 1



Nota. Riesgos estructurales, operacionales y sanitarios de los biofilms en sistemas espaciales (Imagen generada por IA).

Los biofilms como herramientas biotecnológicas

Los biofilms constituyen un potencial recurso biotecnológico para incrementar la autonomía y sostenibilidad de las misiones espaciales de larga duración (Verseux et al., 2016). Sus propiedades emergentes, como la cooperación metabólica, la eficiencia en el uso de recursos y la estabilidad funcional en condiciones extremas, los posicionan como candidatos viables para aplicaciones que van más allá de su consideración tradicional como contaminantes (Cortese et al., 2020; Cockell et al., 2022). En entornos espaciales cerrados, donde el reabastecimiento desde la Tierra es limitado, estas características resultan particularmente relevantes para el desarrollo de sistemas biológicos integrados.

Los biofilms también desempeñan un papel central en el reciclaje de recursos y la gestión de sistemas bioregenerativos de soporte vital (Godia et al., 2002; Hendrickx et al., 2006). Comunidades microbianas organizadas en biofilms pueden ser integradas en biorreactores para la depuración de aguas residuales, la conversión de desechos orgánicos en nutrientes reutilizables y la regulación de flujos de carbono y nitrógeno (Hendrickx et al., 2006; Menezes et al., 2015; Verseux et al., 2016). En entornos espaciales cerrados, la estabilidad funcional de estos biofilms es especialmente relevante, ya que su estructura multicelular amortigua fluctuaciones ambientales y permite una mayor resiliencia frente a perturbaciones físicas y químicas en comparación con cultivos planctónicos (McLean et al., 2001; Flemming et al., 2016; Zea et al., 2020).

Adicionalmente, los biofilms ofrecen oportunidades significativas para el desarrollo de sistemas agrícolas y de producción de alimentos en el espacio (Huang et al., 2018; De Micco et al., 2022). Determinados consorcios bacterianos y fúngicos pueden mejorar la disponibilidad de nutrientes, aumentar la retención de agua en sustratos artificiales y suprimir patógenos vegetales, contribuyendo a la eficiencia de sistemas de cultivo en microgravedad o gravedad reducida (Cortese et al., 2020). Estos biofilms funcionales podrían integrarse en sistemas de agricultura espacial como componentes clave para

sostener la producción de alimentos frescos en misiones prolongadas (Paradiso et al., 2014).

Desde una perspectiva más amplia, los biofilms también constituyen modelos experimentales valiosos para la ingeniería ecológica en ambientes extraterrestres (Menezes et al., 2015). Su capacidad para establecer gradientes microambientales internos (por ejemplo, oxígeno, pH y nutrientes) permite el diseño de ecosistemas microbianos controlados, adaptados a condiciones extremas y capaces de cumplir funciones específicas de manera simultánea (Cockell et al., 2022, Sepe et al., 2025).

En conjunto, estas aplicaciones evidencian que el aprovechamiento biotecnológico de los biofilms en el espacio implica un delicado balance entre funcionalidad y control. Su implementación exitosa requiere considerar no solo su rendimiento biológico, sino también requisitos operativos como la estabilidad a largo plazo, las necesidades de monitoreo, la compatibilidad con materiales y los riesgos asociados a su proliferación no controlada. Con el fin de integrar estas aplicaciones en un marco operativo común y facilitar su evaluación en el contexto del diseño de misiones espaciales, se presenta una síntesis comparativa de las principales áreas de aplicación, junto con sus requisitos operativos críticos y los riesgos asociados (Tabla 1).

Tabla 1
Aplicaciones potenciales de biofilms en misiones espaciales y principales desafíos operativos

Aplicación	Descripción	Requisito Operativo	Riesgo Asociado	Estado / Concreto	Referencias
Biomíneralización y Biofabricación	Uso de consorcios microbianos para precipitar minerales y crear materiales o consolidar regolitos.	Control preciso de la actividad metabólica y de la adhesión de los biofilms al sustrato.	Biocorrosión de materiales estructurales adyacentes; crecimiento descontrolado.	Experimental (análogos terrestres). Ej.: Uso de <i>Sporosarcina pasteurii</i> para cementar arena marciana.	Dhami et al. (2013); Dikshit et al. (2022)
Reciclaje en sistemas BLSS	Degradación de residuos orgánicos por biofilms en biorreactores para regenerar nutrientes y agua.	Monitoreo continuo de la eficiencia y composición de la comunidad para evitar disfunciones.	Obstrucción de tuberías y filtros; producción de metabolitos tóxicos (ej. amoníaco).	Implementación parcial. Ej.: El bucle de desechos microbianos en el sistema MELiSSA (ESA).	Schuerger (1998); Lasseur et al. (2010); De Micco et al. (2023)
Agricultura Espacial y Rizobiotomas	Biofilms rizosféricos que mejoran la disponibilidad de nutrientes y protegen raíces en cultivos.	Mantener equilibrio entre especies benéficas y patógenas; evitar exceso de biomasa.	Escape de microorganismos fitopatógenos; formación de biopelículas en tanques.	En estudio en la ISS. Ej.: Experimento Rhizosphere para estudiar interacciones planta-microbio.	Massa et al. (2017); Larkin et al. (2021); Morrison et al. (2021)
Protección Biológica Contra Radiación	Uso de biopelículas densas como escudo complementario para atenuar radiación ionizante.	Garantizar viabilidad a largo plazo y adhesión estable; validar eficacia del blindaje.	Degradación de la capacidad de blindaje por muerte microbiana; liberación de esporas.	Conceptual. Ej.: Estudios de <i>D. radiodurans</i> sobre su resistencia a la radiación.	Mastroleo et al. (2009); Guo et al. (2023); Gouveia et al. (2025)

Nota. Aplicaciones potenciales de biofilms en misiones espaciales y principales requisitos operativos y riesgos asociados.

Biofilms y protección planetaria: implicaciones operativas

La presencia inevitable de biofilms en misiones espaciales introduce desafíos directos para la protección planetaria, particularmente en contextos de exploración robótica y humana de cuerpos potencialmente habitables. Más allá de la preocupación general por la contaminación biológica, los biofilms representan un riesgo específico debido a su elevada resistencia ambiental, su capacidad de persistencia y su tolerancia a condiciones de estrés como radiación, desecación y limitación de nutrientes, lo que puede reducir la eficacia de los protocolos tradicionales de esterilización y control de biocarga (Nicholson et al., 2009; Venkateswaran et al., 2014; Mora et al., 2019). En este contexto, su manejo requiere criterios operativos que consideren no solo la presencia de microorganismos viables, sino también su organización en comunidades estructuradas y metabólicamente activas.

Desde una perspectiva aplicada, la protección planetaria frente a biofilms implica decisiones explícitas entre estrategias de mitigación y de uso dirigido. En fases sensibles de una misión o en componentes expuestos al entorno externo, la mitigación debe priorizar la contención física, la limitación del crecimiento y el monitoreo continuo de la actividad microbiana, con el objetivo de minimizar el riesgo de liberación accidental y contaminación hacia otros cuerpos celestes (Rummel et al., 2014; Kminek et al., 2017). Por el contrario, en aplicaciones biotecnológicas controladas, como los sistemas de soporte vital bioregenerativo o procesos de biofabricación, los biofilms podrían emplearse de manera dirigida siempre que se establezcan protocolos claros de confinamiento, seguimiento y respuesta ante desviaciones funcionales. Esta aproximación permite integrar los principios de protección planetaria no solo como una restricción normativa, sino como un marco operativo que orienta decisiones de diseño, monitoreo y gestión del riesgo biológico en misiones espaciales de larga duración, en concordancia con las recomendaciones internacionales del COSPAR (Rummel et al., 2014; Berliner et al., 2021).

Conclusiones

Las comunidades microbianas adheridas a superficies en entornos espaciales constituyen un componente inevitable de los sistemas cerrados asociados a la exploración humana más allá de la Tierra. Su capacidad de formar biofilms más complejos y resistentes bajo condiciones de microgravedad incrementa los riesgos de degradación de materiales, alteraciones en sistemas críticos y efectos adversos sobre la salud de las tripulaciones. Al mismo tiempo, estas propiedades confieren a los biofilms un potencial significativo para su aplicación en procesos bioregenerativos, reciclaje de recursos y producción in situ, convirtiéndolos en elementos funcionales para misiones de larga duración. En este contexto, el desafío central no radica en su eliminación, sino en comprender y gestionar su interacción con materiales espaciales, su respuesta a protocolos de limpieza en microgravedad, su evolución fisiológica durante el vuelo y su integración controlada en sistemas como biorreactores de soporte vital y consorcios microbianos funcionales. Todo ello debe abordarse dentro de un marco operativo que combine eficiencia tecnológica, bioseguridad y principios de protección planetaria, permitiendo pasar de una gestión reactiva de los biofilms a una aproximación predictiva y orientada al diseño de futuras arquitecturas espaciales.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses entre ellos ni con terceros.

Referencias

- Ali, A., Zahra, A., Kamthan, M., Husain, F. M., Albalawi, T., Zubair, M., Alatawy, R., Abid, M., y Noorani, M. S. (2023). *Microbial Biofilms: Applications, Clinical Consequences, and Alternative Therapies*. Microorganisms, 11(8), 1934. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11081934>
- Berliner, A. J., Hilzinger, J. M., Abel, A. J., McNulty, M., Makrygiorgos, G., y Cumbers, J. (2021). *Towards a biomanufactory on Mars*. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 8, 120. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.711550>
- Branda, S. S., Vik, S., Friedman, L., y Kolter, R. (2005). *Biofilms: the matrix revisited*. Trends in Microbiology, 13(1), 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2004.11.006>
- Characklis, W. G. (1973). *Attached microbial growths—II. Frictional resistance due to microbial slimes*. Water Research, 7, 1249–1258. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(73\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(73)90002-X)
- Checinska Sielaff, A., Urbaniak, C., Mohan, G. B. M., Stepanov, V. G., Tran, Q., Wood, J. M., ... y Venkateswaran, K. (2019). *Characterization of the total and viable bacterial and fungal communities associated with the International Space Station surfaces*. Microbiome, 7(1), 50. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0666-x>
- Cockell, C. S. (2022). *Bridging the gap between microbial limits and extremes in space: space microbial biotechnology in the next 15 years*. Microbial Biotechnology, 15(1), 29–41. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13927>
- Cortese, M., et al. (2020). *Fungal biotechnology in space: Why and how?* Applied Microbiology and Biotechnology, 104, 7409–7421. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29541-7_18
- Costerton, J. W., Geesey, G. G., y Cheng, K. J. (1978). *How bacteria stick*. Scientific American, 238(1), 86–95. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0178-86>
- Crabbé, A., Pycke, B., Van Houdt, R., Monsieurs, P., Nickerson, C., Leys, N., y Cornelis, P. (2010). *Response of Pseudomonas aeruginosa PAO1 to low shear modelled microgravity involves AlgU regulation*. Environmental Microbiology, 12(6), 1545–1564. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2010.02184.x>
- Crucian, B., Babiak-Vazquez, A., Johnston, S., Pierson, D. L., Ott, C. M., y Sams, C. (2018). *Immune system dysregulation during spaceflight*. Frontiers in Immunology, 9, 1437. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.01437>
- De Micco, V., Amitrano, C., Mastroleo, F., Aronne, G., Battistelli, A., Carnero-Diaz, E., ... y Leys, N. (2023). *Plant and microbial science and technology as cornerstones to Bioregenerative Life Support Systems in space*. npj Microgravity, 9(1), 69.
- Dhami, N. K., Reddy, M. S., y Mukherjee, A. (2013). *Biomining of calcium carbonates and their engineered applications: a review*. Frontiers in Microbiology, 4, 314. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00314>
- Dikshit, R., Gupta, N., Dey, A., Viswanathan, K., y Kumar, A. (2022). *Microbial induced calcite precipitation can consolidate martian and lunar regolith simulants*. Plos One, 17(4), e0266415. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266415>
- Donato, V. (2018). *El mundo de los biofilms*. Editorial Autores de Argentina.
- Donlan, R. M. (2002). *Biofilms: Survival mechanisms of clinically relevant microorganisms*. Clinical Microbiology Reviews, 15(2), 167–193. <https://doi.org/10.1128/CMR.15.2.167-193.2002>
- Flemming, H. C., Wingender, J., Szewzyk, U., Steinberg, P., Rice, S. A., y Kjelleberg, S. (2016). *Biofilms: An emergent form of bacterial life*. Nature Reviews Microbiology, 14(10), 869–879.

- 14(9), 563–575. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.94>
- Gódia, F., Albiol, J., Montesinos, J. L., Pérez, J., Creus, N., Cabello, F., Mengual, X., y Montras, A. (2002). *MELISSA: A loop of interconnected bioreactors to develop life support in space*. Journal of Biotechnology, 99(3), 319–330. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00222-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00222-5)
- Gouveia, A. G., Taoufiq, A., Antunes, W., y Romão, C. V. (2025). *Metal-induced biofilm formation by radiation resistant bacteria Deinococcus radiodurans and Deinococcus indicus*. Extremophiles, 29(3), 38.
- Guerrero, A. C. (2023). *Images and the development of the microbial biofilm concept* (Doctoral dissertation). Arizona State University.
- Guo, Q., Zhan, Y., Zhang, W., Wang, J., Yan, Y., Wang, W., y Lin, M. (2023). *Development and regulation of the extreme biofilm formation of Deinococcus radiodurans R1 under Extreme environmental conditions*. International Journal of Molecular Sciences, 25(1), 421.
- Hall-Stoodley, L., y Stoodley, P. (2009). *Evolving concepts in biofilm infections*. Cellular Microbiology, 11(7), 1034–1043. <https://doi.org/10.1111/j.1462-5822.2009.01323.x>
- Hendrickx, L., De Wever, H., Hermans, V., Mastroleo, F., Morin, N., Wilmotte, A., Janssen, P., y Mergeay, M. (2006). *Microbial ecology of the closed artificial ecosystem MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative): reinventing and compartmentalizing the Earth's food and oxygen regeneration system for long-haul space exploration missions*. Research in Microbiology, 157(1), 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2005.06.014>
- Heukelekian, H., y Heller, A. (1940). *Relation between Food Concentration and Surface for Bacterial Growth*. Journal of Bacteriology, 40(4), 547–558. <https://doi.org/10.1128/jb.40.4.547-558.1940>
- Horneck, G., Klaus, D. M., y Mancinelli, R. L. (2010). *Space microbiology*. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 74(1), 121–156.
- Huang, B., Li, D. G., Huang, Y., y Liu, C. T. (2018). *Effects of spaceflight and simulated microgravity on microbial growth and secondary metabolism*. Military Medical Research, 5(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s40779-018-0162-9>
- Hupka, M., Kedia, R., Schauer, R., Shepard, B., Granados-Presa, M., Vande Hei, M., Flores, P., y Zea, L. (2023). *Morphology of Penicillium rubens Biofilms Formed in Space*. Life, 13(4), 1001. <https://doi.org/10.3390/life13041001>
- Justiniano, Y. A. V., Goeres, D. M., Sandvik, E. L., Kjellerup, B. V., Sysoeva, T. A., Harris, J. S., y HerrNeckar, L. E. (2023). *Mitigation and use of biofilms in space for the benefit of human space exploration*. Biofilm, 5, 100102. <https://doi.org/10.1016/j.bioflm.2022.100102>
- Kim, W., Tengra, F. K., Young, Z., Shong, J., Marchand, N., Chan, H. K., Pangule, R. C., Parra, M., Dordick, J. S., y Plawsky, J. L. (2013). *Spaceflight promotes biofilm formation by Pseudomonas aeruginosa*. PLoS ONE, 8(4), e62437. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062437>
- Kim, J. K., Yun, H., Yeom, C. H., Kim, E. J., Kim, W., Lee, C. S., Kim, B. G., y Jeong, H. J. (2022). *Flow cytometry-based rapid detection of Staphylococcus aureus and Pseudomonas aeruginosa using fluorescent antibodies*. RSC Advances, 12(53), 34660–34669. <https://doi.org/10.1039/d2ra05694a>
- Klintworth, R., Reher, H. J., Viktorov, A. N., y Bohle, D. (1999). *Biological induced corrosion of materials II: new test methods and experiences from MIR station*. Acta Astronautica, 44(7-12), 569–578. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(99\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(99)00069-7)

- Kminek, G., Conley, C., Hipkin, V., y Yano, H. (2017). *COSPAR's planetary protection policy*. Space Research Today, 200, 12-25.
- La Duc, M. T., Kern, R., y Venkateswaran, K. (2004). *Microbial monitoring of spacecraft and associated environments*. Microbial Ecology, 47(2), 150-158.
- Larkin, E., Schuerger, A., Barker, R., Lee, J. A., Haveman, N., Enciso, J. F., ... y Espinoza, J. L. (2021). *Ground and Flight-Based Plant Microbial Interaction Research and Related Space Crop Production Applications*.
- Lasseur, C., Brunet, J., De Weever, H., Dixon, M., Dussap, G., Gódia, F., ... y Van Der Straeten, D. (2010). *MELiSSA: the European project of closed life support system*. Gravitational and Space Research, 23(2).
- Marra, D., Ferraro, R., y Caserta, S. (2024). *Biofilm contamination in confined space stations: Reduction, coexistence or an opportunity?* Frontiers in Materials, 11, 1374666. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1374666>
- Massa, G., Dufour, N., Carver, J., Hummerick, M., Wheeler, R., Morrow, R. y Smith, T. (2017). *VEG-01: Veggie Hardware Validation Testing on the International Space Station*. Open Agriculture, 2(1), 33-41. <https://doi.org/10.1515/opag-2017-0003>
- Mastroleo, F., Van Houdt, R., Leroy, B., Benotmane, M. A., Janssen, A., Mergeay, M., Vanhavere, F., Hendrickx, L., Wattiez, R., y Leys, N. (2009). *Experimental design and environmental parameters affect Rhodospirillum rubrum S1H response to space flight*. The ISME Journal, 3(12), 1402–1419. <https://doi.org/10.1038/ismej.2009.74>
- McLean, R. J., Cassanto, J. M., Barnes, M. B., y Koo, J. H. (2001). *Bacterial biofilm formation under microgravity conditions*. FEMS Microbiology Letters, 195(2), 115–119. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2001.tb10507.x>
- Menezes, A. A., Cumbers, J., Hogan, J. A., y Arkin, A. P. (2015). *Towards synthetic biological approaches to resource utilization on space missions*. Journal of the Royal Society Interface, 12, 20140715. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0715>
- Mora, M., Wink, L., Kögler, I., Mahnert, A., Rettberg, P., Schwendner, P., Demets, R., Cockell, C., Alekhova, T., Klingl, A., Krause, R., Zolotarief, A., Alexandrova, A., y Moissl-Eichinger, C. (2019). *Space Station conditions are selective but do not alter microbial characteristics relevant to human health*. Nature Communications, 10(1), 3990. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11682-z>
- Morrison, M. D., Thissen, J. B., Karouia, F., Mehta, S., Urbaniak, C., Venkateswaran, K., Smith, D. J., y Jaing, C. (2021). *Investigation of Spaceflight Induced Changes to Astronaut Microbiomes*. Frontiers in Microbiology, 12, 659179. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.659179>
- Nickerson, C. A., Ott, C. M., Mister, S. J., Morrow, B. J., Burns-Keliher, L., y Pierson, D. L. (2000). *Microgravity as a novel environmental signal affecting Salmonella enterica serovar Typhimurium virulence*. Infection and Immunity, 68(6), 3147–3152. <https://doi.org/10.1128/IAI.68.6.3147-3152.2000>
- Nicholson, W. L., Schuerger, A. C., y Setlow, P. (2009). *The solar UV environment and bacterial spore UV resistance: Considerations for planetary protection and Earth-to-Mars transport by natural processes*. Mutation Research/Reviews in Mutation Research, 571(1–2), 249–264. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2004.10.001>
- Niederdorfer, R., Besemer, K., Battin, T. J., y Peter, H. (2017). *Ecological strategies and metabolic trade-offs of complex environmental biofilms*. NPJ Biofilms and Microbiomes, 3, 21. <https://doi.org/10.1038/s41522-017-0029-y>
- Novikova, N., De Boever, P., Poddubko, S., Deshevaya, E., Polikarpov, N., Rakova, N., Coninx, I., y Mergeay, M. (2006). *Survey of environmental biocontamination on*

- board the International Space Station. *Research in Microbiology*, 157(1), 5–12. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2005.07.010>
- Paradiso, R., De Micco, V., Buonomo, R., Aronne, G., Barbieri, G., y De Pascale, S. (2014). *Soilless cultivation of soybean for Bioregenerative Life-Support Systems: a literature review and the experience of the MELiSSA Project - Food characterisation Phase I*. *Plant Biology*, 16 Suppl 1, 69–78. <https://doi.org/10.1111/plb.12056>
- Percival, S. L., Malic, S., Cruz, H., y Williams, D. W. (2011). *Introduction to biofilms*. En *Biofilms and veterinary medicine* (pp. 41–68). Springer.
- Philipp, L. A., Bühler, K., Ulber, R., y Gescher, J. (2024). *Beneficial applications of biofilms*. *Nature Reviews Microbiology*, 22(5), 276–290. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00985-0>
- Rummel, J. D., Beaty, D. W., Jones, M. A., Bakermans, C., Barlow, N. G., Boston, P. J., ... Viso, M. (2014). *A new analysis of Mars “special regions”: Findings of the second MEPAG Special Regions Science Analysis Group (SR-SAG2)*. *Astrobiology*, 14(11), 887–968. <https://doi.org/10.1089/ast.2014.1227>
- Schuerger, A. C. (1998). *Microbial contamination of advanced life support (ALS) systems poses a moderate threat to the long-term stability of space-based bioregenerative systems*. *Life Support & Biosphere Science*, 5(3), 325–337.
- Satoh, K., et al. (2011). *Fungal contamination in the International Space Station Kibo module*. *Microbiology and Immunology*, 55, 611–618.
- Sepe, F., Costanzo, E., Ionata, E., y Marcolongo, L. (2025). *Biotechnological Potential of Extremophiles: Environmental Solutions, Challenges, and Advancements*. *Biology*, 14(7), 847. <https://doi.org/10.3390/biology14070847>
- Urbaniak, C., Morrison, M. D., Thissen, J. B., Karouia, F., Smith, D. J., Mehta, S., ... y Venkateswaran, K. (2022). *Microbial Tracking-2, a metagenomics analysis of bacteria and fungi onboard the International Space Station*. *Microbiome*, 10(1), 100. <https://doi.org/10.1186/s40168-022-01293-0>
- Venkateswaran, K., Vaishampayan, P., Cisneros, J., Pierson, D. L., Rogers, S. O., y Perry, J. (2014). *International Space Station environmental microbiome—Microbial inventories of ISS filter debris*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(14), 6453–6466. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5650-6>
- Verseux, C., Baqué, M., Lehto, K., de Vera, J. P. P., Rothschild, L. J., y Billi, D. (2016). *Sustainable life support on Mars—the potential roles of cyanobacteria*. *International Journal of Astrobiology*, 15(1), 65–92. <https://doi.org/10.1017/S147355041500021X>
- Wilson, J. W., Ott, C. M., Ramamurthy, R., Porwollik, S., McClelland, M., Pierson, D. L., y Nickerson, C. A. (2002). *Low-Shear modeled microgravity alters the Salmonella enterica serovar typhimurium stress response in an RpoS-independent manner*. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(11), 5408–5416. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.11.5408-5416.2002>
- Wilson, J. W., Ott, C. M., Höner zu Bentrup, K., Ramamurthy, R., Quick, L., Porwollik, S., Cheng, P., McClelland, M., Tsapraillis, G., Radabaugh, T., Hunt, A., Fernandez, D., Richter, E., Shah, M., Kilcoyne, M., Joshi, L., Nelman-Gonzalez, M., Hing, S., Parra, M., Dumars, P., ... Nickerson, C. A. (2007). *Space flight alters bacterial gene expression and virulence and reveals a role for global regulator Hfq*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(41), 16299–16304. <https://doi.org/10.1073/pnas.0707155104>
- Yadav, N., Kour, D., y Yadav, A. N. (2018). *Microbiomes of freshwater lake ecosystems*. *J Microbiol Exp*, 6(6), 245–248. <https://doi.org/10.15406/jmen.2018.06.00223>

- Zea, L., Larsen, M., Estante, F., Qvortrup, K., Moeller, R., Dias de Oliveira, S., ... y Klaus, D. (2017). *Phenotypic changes exhibited by E. coli cultured in space*. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1598. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01598>
- Zea, L., McLean, R. J., Rook, T. A., Angle, G., Carter, D. L., Delegard, A., ... y Justiniano, Y. A. V. (2020). *Potential biofilm control strategies for extended spaceflight missions*. *Biofilm*, 2, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.bioflm.2020.100026>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Revisión comparativa de las tecnologías de simulación de microgravedad y sus aplicaciones

Naomi F. de la Cruz-Calderon¹

<https://orcid.org/0009-0008-9348-3414>

Margarita Salazar-Reyes¹

<https://orcid.org/0009-0002-9037-3654>

Jharold A. Alvarez-Quichca¹

<https://orcid.org/0009-0001-6832-6280>

Aldair J. Duran-Cordova¹

<https://orcid.org/0009-0004-6838-1214>

Reishel S. Lope-Paredes¹

<https://orcid.org/0009-0002-2278-2819>

Rivaldo Carlos Duran-Aquino²

<https://orcid.org/0009-0004-3638-3522>

¹Intinauta Research Center, Perú

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Email: rivaldo.duran@unmsm.edu.pe

Recibido: 01/11/2025 • Revisado: 15/11/2025 • Aceptado: 30/11/2025

Resumen

Las tecnologías de simulación de microgravedad son fundamentales para comprender los efectos de la gravedad reducida en los procesos biológicos y físicos. Esta revisión compara diversos sistemas empleados para reproducir condiciones de microgravedad, entre ellos los clinostatos bidimensionales, las máquinas de posicionamiento aleatorio, los vuelos parabólicos, las torres de caída y otras tecnologías afines. Se analizan sus capacidades, sus aplicaciones en la investigación científica y los tipos de experimentos que permiten desarrollar. Asimismo, el estudio resalta investigaciones clave y examina las limitaciones propias de cada sistema, poniendo énfasis en factores como la duración de la exposición, los gradientes gravitacionales y la escalabilidad. En conjunto, este análisis ofrece una visión general de las tecnologías actualmente disponibles, abordando sus fortalezas, debilidades y su potencial futuro para el avance de la investigación en exploración espacial.

Palabras clave: Simulación de microgravedad, Plataformas de microgravedad terrestres, Ciencias de la vida espacial, Procesos biológicos y físicos, Exploración espacial.

Citar como:

De la Cruz-Calderón, N. F., Alvarez-Quichca, J. A., Duran-Cordova, A. J., Lope-Paredes, R. S., Salazar-Reyes, M., y Duran-Aquino, R. C. (2025). Comparative Review of Microgravity Simulation Technologies and their Applications. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(2), 56–107. <http://doi.org/10.69976/aspast.v2n2.4>

RESEARCH ARTICLE

Comparative Review of Microgravity Simulation Technologies and their Applications

Naomi F. de la Cruz-Calderon¹

<https://orcid.org/0009-0008-9348-3414>

Margarita Salazar-Reyes¹

<https://orcid.org/0009-0002-9037-3654>

Jharold A. Alvarez-Quichca¹

<https://orcid.org/0009-0001-6832-6280>

Aldair J. Duran-Cordova¹

<https://orcid.org/0009-0004-6838-1214>

Reishel S. Lope-Paredes¹

<https://orcid.org/0009-0002-2278-2819>

Rivaldo Carlos Duran-Aquino²

<https://orcid.org/0009-0004-3638-3522>

¹Intinauta Research Center, Perú

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Email: rivaldo.duran@unmsm.edu.pe

Recibido: 01/11/2025 • Revisado: 15/11/2025 • Aceptado: 30/11/2025

Abstract

Microgravity simulation technologies are essential for understanding the effects of reduced gravity on biological and physical processes. This review compares various systems used to replicate microgravity, including 2D clinostats, random positioning machines, parabolic flights, drop towers, and other technologies. It examines their capabilities, applications in scientific research, and the types of experiments they enable. The review also highlights key studies and explores the limitations of each system, focusing on factors like exposure duration, gravitational gradients, and scalability. This analysis provides an overview of current technologies, addressing their strengths, weaknesses, and future potential for advancing space exploration research.

Keywords: Microgravity simulation, Ground-based microgravity platforms, Space life sciences, Biological and physical processes, Space exploration

Cite as:

De la Cruz-Calderón, N. F., Alvarez-Quichca, J. A., Duran-Cordova, A. J., Lope-Paredes, R. S., Salazar-Reyes, M., y Duran-Aquino, R. C. (2025). Comparative Review of Microgravity Simulation Technologies and their Applications. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(2), 56–107. <http://doi.org/10.69976/aspast.v2n2.4>

1. Introduction

Low Earth orbit and space missions are inherently subject to microgravity, a state in which gravitational forces are significantly reduced to almost zero values (Melissa L. Gaskill, 2024; Vogt et al., 1995). Biological, chemical, and physical phenomena that behave fundamentally differently than they would under terrestrial gravity can be observed in this special environment. Understanding of these processes has greatly expanded, with a substantial impact on disciplines such as human physiology, pharmacology, biomedicine, and advanced materials engineering. To understand the complicated mechanisms underlying astronauts' bone and muscle atrophy and to optimize the formation of crystals of complex proteins, both of which have significant implications for rational medication design, microgravity research has proven essential (Ferranti et al., 2020; Oluwafemi & Neduncheran, 2022; ScienceDirect, 2017). However, since direct access to space is very expensive and scarce, it presents significant operational issues. Numerous terrestrial microgravity simulation methods have been developed because of this intrinsic obstacle (Herranz et al., 2013; Jarvis et al., 2022; Vashi et al., 2022). These instruments play a crucial role in democratizing access to this extremely specialized research by allowing scientists to examine the effects of lower gravity without depending on space flights (Nishimura, 2023; Palma-Jiménez et al., 2017; Zhang et al., 2022). It is important to note that although these simulations provide approximations, they do not accurately represent true microgravity; they often introduce residual gravitational gradients or have intrinsic temporal constraints that set them apart from the real space environment. Integrating and comparing these platforms is crucial and necessary due to the wide variety of simulation systems that are available, such as two- and three-dimensional clinostats (Rodríguez, 2020), Random Positioning Machines (RPMs) (Pino Alfonso et al., 2006), parabolic flights (Selig et al., 2010), drop towers (Kim et al., 2024), neutral buoyancy facilities (Han et al., 2010), gravity offload systems (L. Li et al., 2020), and newer methods like magnetic (Boudreaux et al., 2025) and acoustic levitation (Hammer et al., 2009). Selecting the best technology is a difficult and crucial choice for researchers because of the significant differences in their basic working principles, the accuracy of the simulation they offer, and the scale of the experiments they can support. The obvious lack of a thorough comparative guide poses a serious obstacle to making the most of the resources at hand and enhancing the effectiveness of the research (Herranz et al., 2013; Palma-Jiménez et al., 2017).

A deeper understanding of terrestrial microgravity simulators contributes to the development of more effective countermeasures against physiological deterioration during long-term space missions. These platforms also support improvements in drug testing protocols by replicating gravity-sensitive environments and facilitate advances in fields such as soft robotics and adaptive materials. By reducing reliance on orbital access, they enable research agendas that would otherwise remain out of reach for many institutions. Their operational principles, the capabilities of their physical facilities, the kinds of scientific investigations they support, and their most recent and pertinent applications in aerospace research will all be covered in detail in this work. It will also go over each method's inherent limitations and approximate related expenses. In addition to maximizing resource allocation and strategic decision-making in various academic and scientific contexts, this analysis principally seeks to serve as an informed and current guide that fosters significant improvements in both basic and applied knowledge.

2. Material and methods

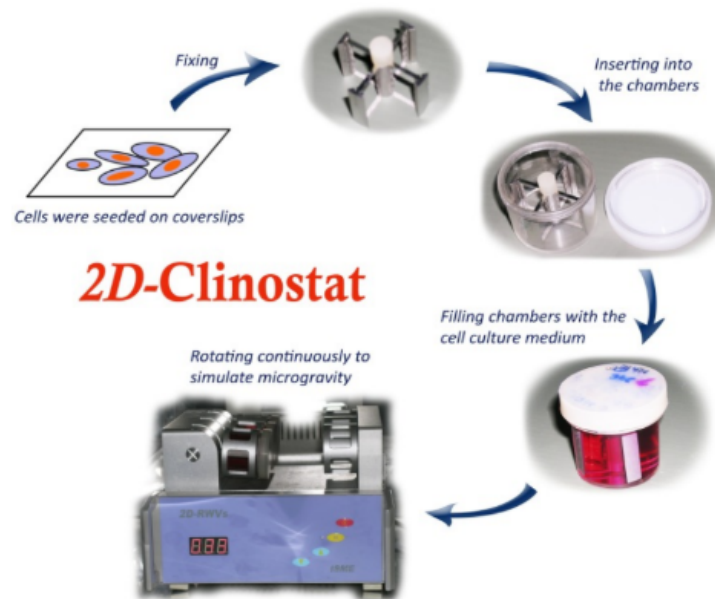
This review presents an overview of ten commonly used methods for simulating microgravity conditions, both in terrestrial and space-related contexts. The selected techniques vary in complexity, cost, and applicability, depending on the biological, physical, or engineering focus of the experiment. For each method, its operating principle, main scientific applications, and relevant considerations for its experimental implementation are described.

2.1 Clinostats (2D and 3D)

2.1.1 Description

Clinostats are electromechanical devices designed to simulate the effects of microgravity or altered gravity environments on biological systems in terrestrial environments. Their central objective lies in the continuous and controlled rotation of a biological sample around one or more axes. This rotation causes the gravitational force vector to act on the sample from multiple directions in succession. This, when averaged over time, eliminates the constant perception of a specific gravitational direction and prevents unidirectional settling of cells or particles (Nishimura, 2023; Wuest et al., 2015).

- **2D (Two-Dimensional) Clinostats:** These devices rotate the sample in a single plane (usually horizontal) at a constant angular velocity. The sample experiences a periodic variation in the sensed direction of gravity. If the rotational velocity is high enough for the sample to complete one cycle before significant settling occurs, the result is zero vector-averaged gravity in that two-dimensional plane. They are suitable for studying small organisms or cellular systems where the objective is to eliminate primary gravitropism (Nishimura, 2023).
- **3D (Three-Dimensional) Clinostats:** Unlike 2D models, these clinostats are designed to rotate the sample along multiple axes simultaneously to cancel out the gravity vector in all three dimensions. They aim to offer a more complete simulation of microgravity and create a truly isotropic environment. The most sophisticated implementation and the gold standard for this three-dimensional simulation is the Random Positioning Machine (RPM) (Clary et al., 2022; Nishimura, 2023; Shi et al., 2012), which is distinguished by its ability to perform precisely controlled, random rotation to optimize gravitational cancellation.

Figure 1*2D Clinostat*

Note. Taken from Effects of Simulated Microgravity on Human Umbilical Vein Endothelial Cell Angiogenesis and Role of the PI3K-Akt-eNOS Signal Pathway, by Shi F, Wang Y-C, Zhao T-Z, Zhang S, Du T-Y, Yang C-B, et al. (2012), PLoS ONE 7(7).

2.1.2 Scientific Applications

Clinostats, both in their two- and three-dimensional forms, are key instruments in multiple areas of study. They facilitate the analysis of biology under modified gravity in terrestrial environments, which is essential for the development of space biology and other areas of knowledge, avoiding the high costs and access restrictions associated with experiments conducted in real space (Cao et al., 2023; Nishimura, 2023). Their most notable uses include:

- **Cell Biology:** Investigation of proliferation, differentiation, adhesion, migration, and the formation of three-dimensional structures (such as spheroids and organoids, especially with 3D clinostats/RPMs) in an environment where the directional gravitational signal has been minimized (Cao et al., 2023; Shi et al., 2012). This is crucial for understanding physiological changes in astronauts (e.g., bone and muscle atrophy, immune dysfunction) and for applications in regenerative medicine and tissue engineering.
- **Botany:** Study of growth, development (roots, stems), gravitropism, germination, photosynthesis, and gene expression in plants under simulated microgravity. This research is vital for the development of closed life support systems that would be necessary for future long-duration space missions (Cao et al., 2023; Nishimura, 2023).
- **Microbiology:** Analysis of microbial growth, biofilm formation, virulence, antibiotic resistance, and metabolism under microgravity conditions. This has direct implications for astronaut health and the integrity of space habitats (Clary et al., 2022).

2.1.3 Operational and Technical Parameters

The effectiveness of clinostats in microgravity simulation is intrinsically linked to the control and optimization of their physical parameters and technical capabilities. These range from 2D models, with a generally constant rotation speed, to systems that implement the 3D concept with multi-axial and random motions (Clary et al., 2022; Nishimura, 2023). Minimizing the rotation radius is crucial to reduce residual centrifugal forces, which are the main simulation artifact. Furthermore, load capacity varies between designs, and environmental control is critical for biological viability (Cao et al., 2023; Clary et al., 2022; Nishimura, 2023; Shi et al., 2012). The specific details of these parameters are presented in Table 1.

Table 1

Operational and Technical Parameters of Clinostats

Operational and Technical Parameters	Characteristics
Rotational Speed (ω)	2D Clinostat: Generally constant, typically between 0.5 and 4 RPM (revolutions per minute), or higher speeds if the settling velocity of the object being studied is high. The optimal speed is selected to ensure averaging of the gravitational vector before significant settling occurs. 3D Clinostat: These involve rotations along multiple axes. The angular velocities of these axes (which can be expressed in RPM, although they usually vary continuously and randomly) are dynamic and controlled by software (Clary et al., 2022; Nishimura, 2023). Unlike the constant velocities of 2D clinostats, here the velocities are constantly and randomly varied along each axis to maximize the randomization of the gravitational vector and minimize the shear forces perceived by the sample.
Radius of Rotation (r)	A smaller radius is essential to minimize centrifugal forces generated by rotation, which are a simulation artifact. The sample should be positioned as close to the center of rotation as possible to ensure effective microgravity simulation (Nishimura, 2023).
Centrifugal Forces	They are the main artifact inherent in rotation. For a successful simulation of microgravity, these forces must be kept to a minimum, ideally below $10^{-2}g$ to $10^{-3}g$ in the sample region, to ensure that the observed effects are attributable to altered gravitational perception and not to mechanical forces (Nishimura, 2023).
Load Capacity	Varies significantly depending on the design and size of the clinostat. 2D models handle smaller volume samples (e.g., test tubes, small flasks). Systems that implement the 3D concept, such as RPMs, can accommodate a wider range of sizes, from small culture dishes to larger volume bioreactors, depending on their engineering and purpose (Shi et al., 2012).

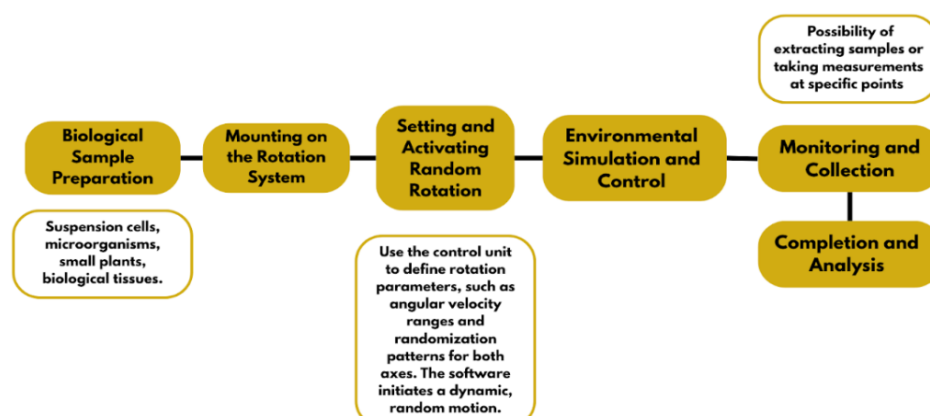
2.1.4 Operation

The operation of the clinostats, both in their 2D and 3D versions, is detailed through the following operational steps:

1. **Preparation of the Biological Sample:** The sample is prepared and introduced into a sterile culture container, compatible with the clinostat and biological needs.
2. **Mounting on the Rotation System:** The sample container is fixed to the rotational support. In 2D clinostats, rotation is ensured in one plane; in 3D clinostats, the sample is centered to optimize randomization and minimize centrifugal forces (Nishimura, 2023).
3. **Setting and Activating Rotation:** The rotation parameters are defined. For 2D, this is a constant speed; for 3D, software controls dynamic and random speeds and directions along multiple axes for three dimensional cancellation of the gravitational vector (Nishimura, 2023)..
4. **Altered Gravity Simulation and Environmental Control:** The clinostat rotates, constantly changing the direction of gravity. In 2D, the variation is planar; in 3D, the vector is canceled out in three dimensions. Environmental control systems (temperature, CO₂, humidity, light) are activated to maintain optimal conditions.
5. **Continuous Monitoring and Data Collection (Optional):** Rotation is monitored and system stability is verified. Optionally, samples or intermediate data are collected to observe biological evolution.
6. **Completion of the Experiment and Post-Simulation Analysis:** At the end of the experiment, the clinostat is stopped and the samples are removed for morphological, biochemical, molecular, and physiological analysis (Nishimura, 2023). The results are compared with controls in normal Earth gravity (1 g).

Figure 2

2D/3D Clinostat Operating Diagram



2.2 Random Positioning Machine (RPM)

2.2.1 Description

The Random Positioning Machine (RPM) is considered the "gold standard" among ground-based microgravity simulators. It is an advanced form of 3D clinostat designed to expose biological samples to a randomized, three-dimensionally averaged gravity vector, thereby creating an isotropic simulated microgravity environment (Krause et al., 2018; Yotov et al., 2022).

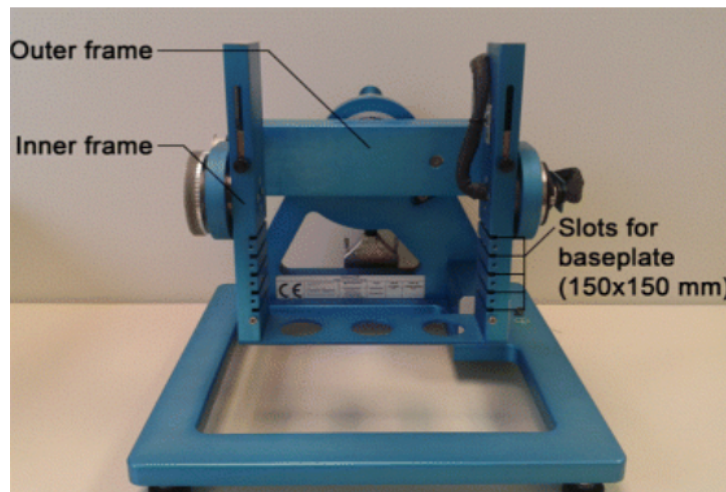
Unlike 2D clinostats or even other 3D clinostat concepts with more predictable motions, the RPM uses a system of two orthogonal rotating frames (gimbals), where the rotation speeds and directions of each axis are independently and randomly controlled by software (A. G. Borst & Van Loon, 2009; Melissa L. Gaskill, 2024).

This random, multidirectional motion ensures that the sample experiences the gravitational vector from an infinite number of orientations in short periods of time. This effectively prevents particle settling and gravitational polarization, resulting in a complete vector cancellation of the gravity perceived by the sample (A. G. Borst & Van Loon, 2009; Krause et al., 2018).

RPMs are particularly valued for their ability to generate a high-quality microgravity simulation environment, more faithfully replicating the weightless conditions experienced in space, with minimal residual forces (A. G. Borst & Van Loon, 2009; NASA Technology Transfer Program, 2021).

Figure 3

Random Positioning Machine



Note. Taken from *Analysis of Statoliths Displacement in Chara Rhizoids for Validating the Microgravity-Simulation Quality of Clinorotation Modes* (p.231), by Krause, L., Braun, M., Hauslage, J. et al., 2018, Microgravity-Science and Technology.

2.2.2 Scientific Applications

Random Positioning Machines (RPMs) are invaluable tools in biomedical and space research, offering three-dimensional microgravity simulation that enables more in-depth studies compared to 2D clinostats. Their applications include:

- **Biological studies:** These are used to investigate the effects of simulated microgravity

on biological systems, such as cells, tissues, plants, and small animals (e.g., drosophila, fish, rodents) (G. Borst, 2007).

- **3D Cell and Tissue Biology:** RPMs are essential for 3D cell culture, promoting the formation of spheroids, organoids, and complex tissues that better replicate in vivo physiological conditions (Krause et al., 2018; Yotov et al., 2022). This is crucial for cancer research, regenerative medicine, and tissue engineering, allowing the study of cell proliferation, differentiation, adhesion, and migration in the absence of directional gravitational signalling.
- **Mechanotransduction Studies:** These allow for the investigation of how cells and tissues sense and respond to the absence of directional mechanical forces imposed by gravity, shedding light on the molecular mechanisms of muscle and bone atrophy, immune dysfunction, and cardiovascular changes observed in astronauts (Krause et al., 2018).
- **Microbiology:** Investigation of the growth, virulence, biofilm formation, and antibiotic resistance of microorganisms under simulated microgravity conditions, with implications for crew health and the maintenance of space habitats (A. G. Borst & Van Loon, 2009).
- **Bioreactor Development and Pharmacology:** RPMs are used to test and optimize bioreactor designs that simulate weightless conditions, which is relevant for the production of tissues or pharmaceuticals in space. They are also used to study drug efficacy in an altered-gravity environment, which could influence the design of treatments for long-duration missions.
- **Hardware Development:** RPMs are also used in hardware testing to evaluate technology under altered gravity conditions (NASA Technology Transfer Program, 2021).

2.2.3 Operational and Technical Parameters

The effectiveness of RPMs in microgravity simulation depends largely on the optimization of their physical parameters and technical capabilities. Key aspects include dynamic and random rotation speed management, a minimized rotation radius to reduce residual centrifugal forces, and a versatile payload capacity (A. G. Borst & Van Loon, 2009; G. Borst, 2007; Krause et al., 2018; NASA Technology Transfer Program, 2021; Yotov et al., 2022). The specific details of these parameters are presented in Table 2.

Table 2*Operational and Technical Parameters of Random Positioning Machine*

Operational and Technical Parameters	Characteristics
Rotational Speed (ω)	The RPMs operate with dynamic and random angular velocities on both axes (internal and external), controlled by software. These velocities vary continuously to ensure maximum randomization of the gravitational vector. Although they can reach speeds of up to 60 RPM or more, the objective is not a constant speed, but rather an unpredictable variation to effectively average gravity and minimize shear forces on the sample (Krause et al., 2018; Yotov et al., 2022).
Radius of Rotation (r)	It is crucial that the sample be positioned as close as possible to the geometric and rotational center of the gimbal system. A small rotation radius is vital to minimize the residual centrifugal forces generated, which are the main simulation artifact. In optimal designs, the sample radius is minimal (e.g., a few millimeters) (Krause et al., 2018).
Centrifugal Forces	As with clinostats, centrifugal forces are the primary artifact. In a well-designed RPM, these forces are minimized to very low levels, ideally below $10^{-2}g$ in the sample region (Krause et al., 2018). Active management of velocity randomness and the small sample radius contribute to reducing these forces so that the observed effects are attributable to the microgravity simulation.
Load Capacity	Modern RPMs can accommodate a wide range of samples, from small cell culture flasks, multiwell plates and test tubes, to larger volume bioreactors, depending on the specific equipment design (A. G. Borst & Van Loon, 2009; Krause et al., 2018; NASA Technology Transfer Program, 2021).

2.2.4 Operation

The operation of a Random Positioning Machine (RPM), as an advanced three-dimensional microgravity simulator, follows a systematic operating process:

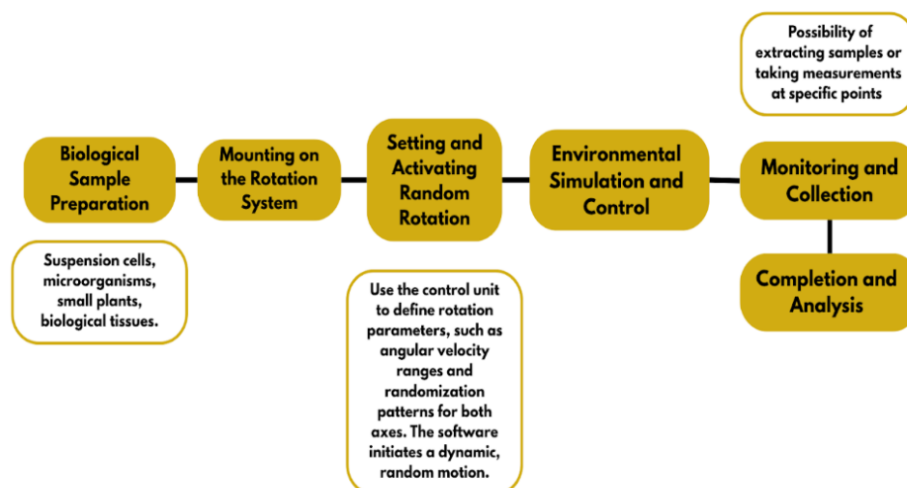
1. **Biological Sample Preparation:** The sample is prepared and placed in a sterile culture vessel compatible with the RPM and biological requirements. The goal is to optimize cell quantity and density to prevent sedimentation before the start of random rotation.
2. **Mounting on the Rotation System:** The sample container is securely fixed in the center of the RPM gimbal system, ensuring that it is at the point of minimum centrifugal force and maximum randomization of gravitational orientation (Krause et al., 2018).
3. **Setting and Activating Random Rotation:** Specific rotation parameters are

defined through the RPM software. This includes angular velocity ranges and randomization patterns for both axes. The software initiates dynamic, random motion in multiple axes, crucial for three-dimensional gravitational vector cancellation (Krause et al., 2018).

4. **Isotropic Microgravity Simulation and Environmental Control:** The RPM begins to rotate randomly, constantly changing the sample's orientation relative to Earth's gravity, which averages the gravitational vector to zero in all three dimensions. Simultaneously, integrated environmental control systems (temperature, CO₂, humidity, light) maintain optimal conditions for the sample (A. G. Borst & Van Loon, 2009).
5. **Continuous Monitoring and Data Collection (Optional):** The RPM is continuously monitored to ensure stability and randomness of motion, verifying the absence of vibrations or parasitic forces. Optionally, samples or intermediate data are collected at key points during the experiment to observe biological evolution (Krause et al., 2018).
6. **Experiment Termination and Post-Simulation Analysis:** At the end of the scheduled experiment, the RPM is brought to a controlled halt. Biological samples are carefully removed for processing and further analysis. Results are compared with those of controls grown in normal Earth gravity (1 g) to identify and quantify specific effects attributed to the isotropic microgravity simulation (Krause et al., 2018).

Figure 4

Random Positioning Machine operating diagram



2.3 Drop Tower

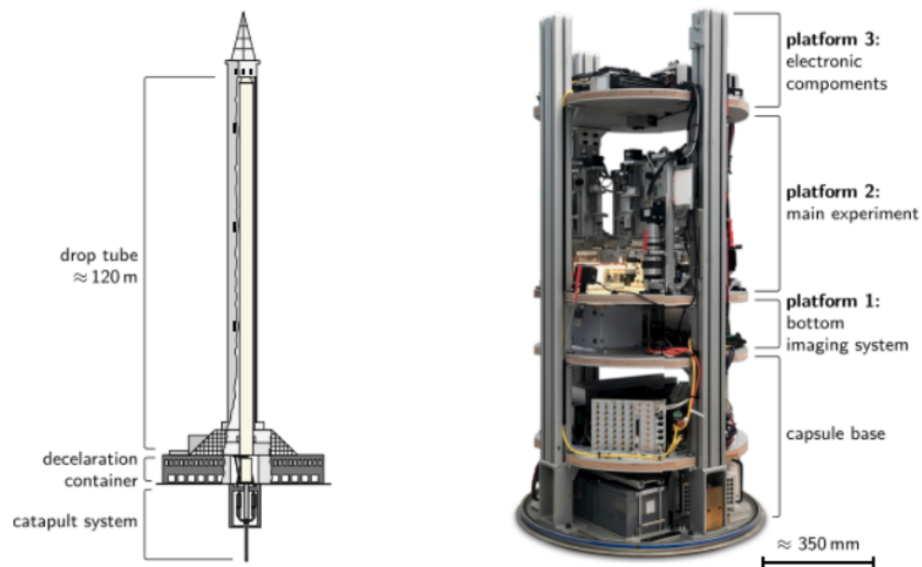
2.3.1 Description

The Drop Tower (DP) method uses the condition of weightlessness by subjecting an object to free fall. In the same way, the falling tower is used as a sample in comparison with the experiments performed in space. After the free fall of the experimental capsule inside the evacuated tower, the equilibrium and the unidirectional perception of gravity are cancelled, creating weightlessness conditions analogous to microgravity. Experimentation with Drop Towers experience repeated drops that allow analysis of variables and parameters

of time, velocity, distance, and perturbations or error variables. (Cui et al., 2022; D'Angelo et al., 2022).

Figure 5

Schematic of the ZARM Drop Tower



Note. Taken from *Spreading of droplets under various gravitational accelerations* (p.5), by Olfa D'Angelo, Felix Kuthe, Kasper van Nieuwland, Clint Ederveen Janssen, Thomas Voigtmann, Maziyar Jalaa, 2022, AIP publishing.

2.3.2 Scientific Applications

The Drop Towers reach a gravity of 10^{-6} , which makes it have a residual acceleration of $0,0000098\text{m/s}^2$. This gives a sample of how the experiment would react in a microgravity environment (D'Angelo et al., 2022). Their most notable uses include:

- **Cellular & Molecular Biology:** In biology, cell cultures or microorganisms are often used for experiments on membrane physiology and gravitation. Where multiple environmental parameters, such as temperature and pressure, are taken into account. This application is necessary to understand the processes of ultrafast physiological responses, such as the elimination of sedimentation effects, tests that are impossible on land.
- **Neurobiology and Behavior:** It is a free-fall experiment in the ZARM drop tower that studies the swimming of upside-down catfish to study sensorimotor disorders. Sensorimotor adaptation, which is responsible for manipulating visual error, in context, are well adapted to possible outcomes for astronauts after a space mission, as detailed in the article *Rapid loss of postural control, mimicking vestibular disorders in astronauts* (D'Angelo et al., 2022; DeMaio, 2021).
- **Plant Physiology:** It is responsible for the thermal decomposition processes of solid fuels in a gaseous environment.

2.3.3 Operational and Technical Parameters

Drop towers reproduce microgravity through free fall in controlled environments. On the other hand, their performance is linked to key operational and technical parameters, such as: The exposure time (dependent on the height of the tower), the purity of the vacuum environment and the accuracy of the braking systems. These parameters determine not only the quality of the microgravity achieved, but also the experimental feasibility for specific payloads. Table 3 quantifies these critical operational parameters.

Table 3

Operational and Technical Parameters of Drop Tower

Parameters	Characteristics
Drop tower at ZARM	Total Height: 146 meters. Inner Vacuum Tube: 120 meters tall, fully decoupled from the outer structure. Drop Height (Drop Mode): 110 meters. Deceleration Container: Located at the bottom of the tower for safely stopping the dropped capsule (Cui et al., 2022; D'Angelo et al., 2022).
Drop Height (h) and Microgravity Time (t)	Effective duration of continuous microgravity. Determines the microgravity time ($t \approx \sqrt{2h/g}$). Typical range of vacuum drop: 0.6 s (small towers) to 4.74 s (146 m towers) (D'Angelo et al., 2022; González Perea, 2015).
Microgravity quality	Levels $\leq 10^{-6}$ g require: Extreme vacuum ($\sim 10^{-4}$ Pa), vibration isolation for unchanged levels, and precise centering of the capsule (optimally located) (D'Angelo et al., 2022; González Perea, 2015).
Launch/Braking Acceleration	Launching has a maximum acceleration while braking has a negative acceleration. Launch: 0–5 g (catapults). Braking: up to 50g (short spikes) (D'Angelo et al., 2022).
Braking Method	Pellet beds: With materials (polystyrene, etc.). Electromagnetic brakes: Controlled deceleration.

2.3.4 Operation

The operation of the drop towers is detailed through the following operational steps:

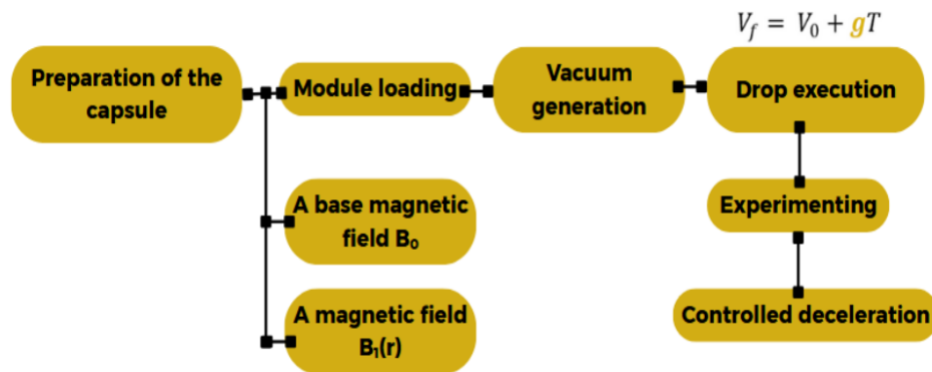
1. **Loading of the experiments:** All experimental modules are installed in the capsule (the main object to be analyzed), then sealing the capsule completely (it is necessary to check that it is completely closed) to withstand the high speed.
2. **Creating the vacuum environment:** Closing the chamber, closing the top and bottom gates to create the vacuum tube (tower) and vacuum pumping to reduce the pressure to $< 10^{-2}$ Pa to almost completely eliminate air pressure.
3. **Microgravity:** During the fall into the void, there are two methods of study:
 - a) **Initial launch:** Have two options of “Free fall” with initial acceleration of 0 g and “Catapult” at $30\text{--}50\text{ m/s}^2$ (3–5 g).
 - b) **Transition to free fall:** After the impulse, start the descent by gravity (Weightlessness phase: 4.0–4.74.).

4. **Deceleration and recovery:** Controlled deceleration has two methods:

- a) “Pellet bed” (deceleration with expanded polystyrene)
- b) “magnetic brakes” (coils with electromagnetic fields opposite to the movement)
(D’Angelo et al., 2022; DeMaio, 2021; González Perea, 2015; Takada et al., 2018).

Figure 6

Drop Tower operating diagram



2.4 Parabolic Flight

2.2.1 Description

During parabolic flight, the aircraft begins with a phase of horizontal flight with acceleration, gradually ascending until it reaches an inclination of 45° , while the crew experiences hypergravity, with forces between 1.5 and 1.8 g. Then, the engine power is reduced and the plane enters the parabolic ascent, where the total sum of the interactive forces on the plane creates the sensation of microgravity, which lasts for 21 to 22 seconds.

The plane then descends at an angle of -45° , at which point hypergravity returns. This cycle is repeated between 15 and 30 times, depending on the purpose of the flight. In total, crew members can experience between 5.25 and 11 minutes of weightlessness (AirZeroG, 2018a, 2018b).

Figure 7*Zero G Parabolic Flight ascent*

Note. Taken from Zero-G Airbus A300 for parabolic flights [Photograph], by ESA, 2007, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2007/11/ZeroG_Airbus_A300_for_parabolic_flights.

2.4.2 Scientific Applications

Parabolic flights are an essential means of simulating, testing, and practicing tools, methods, and protocols that serve as training for astronauts on long or similar missions, opening up the possibility of conducting research for companies, professionals, and students. Among its applications are:

- **Material research:** In parabolic flights, whose duration is suitable for controlled experiments, technical investigations are carried out on the *Thermocapillary Effects in Phase Change Materials (TEPiM)*, aimed at improving heat transfer in materials used for thermal control in spacecraft (Berto et al., 2022; Ezquerro et al., 2020). Additionally, the characterization of these materials' parameters is studied for generalizations applicable to artificial habitats.
- **Fluids physics in fuels:** Experimental validations of simulations on the control of combustible fluids through high-frequency vibrations are conducted (ESA, 2016). These tests are useful for selecting and optimizing systems that reduce power losses during long-duration flights.
- **Innovation and development:** Parabolic flights allow the testing of tether-cable prototypes for artificial satellite orbits, taking advantage of the microgravity environment. They are also used to simulate Martian conditions, facilitating the study of meteorological phenomena relevant to robotic exploration and the sampling of Earth-analog environments.
- **Biotechnology and medicine:** These flights enable practical evaluations of basic, laparoscopic, robotic, and telesurgery procedures for crew medical support. They also contribute to the improvement of surgical skills under microgravity conditions (Prieto et al., 2021).

- **Gravitational biology:** Physiological and genetic changes, as well as health risks in humans and animals, are explored and tested, such as bone demineralization, muscle atrophy, cardiovascular deconditioning, and vestibular and sensory imbalances. A notable example is the 58% increase in intraocular pressure during parabolic flight, which enables simulation of *Spaceflight Associated Neuro-ocular Syndrome* (SANS) (Furukawa et al., 2021; Ong et al., 2023), contributing to the development of protocols for its prevention and risk mitigation.

2.4.3 Operational and Technical Parameters

The effectiveness of the PF for microgravity simulation depends on external and internal physical parameters, which allow for the optimization of the level of gravity achieved. These elements include temperature, pressure conditions, and sound levels for experimental noise, as well as the angle that defines the gravitational magnitude achieved. The specific details of these parameters are presented in Table 4.

Table 4

Operational and Technical Parameters of Parabolic Flight

Parameters	Characteristics
Initial velocity (v_0)	The take-off speed for each campaign depends exclusively on the aircraft model used. However, the approximate range for the most used aircraft (A300/A310 Zero-G, Boeing 727, Falcon 20) is 800–810 km/h.
Take-off altitude (h)	Due to atmospheric pressure conditions and Earth's gravitational field intensity, the optimal altitude for campaigns is around 5,000 meters above sea level, considering fuel management, crew safety, and microgravity level.
Flight angle (α)	The flight angle relative to the horizontal determines the type of relative gravity experienced inside the cabin during each campaign. The angle ranges used for research are 38°, 42°, and 45°–47°, corresponding to Martian gravity (0.38g), lunar gravity (0.16g), and microgravity, respectively.
Sound level (dBA)	To ensure proper cabin conditioning and minimize noise interference in data recordings, it is recommended that the internal sound level remains between 70–75 dBA during weightless phases, and around 80 dBA during hypergravity phases.

2.4.4 Operation

The operation of PF is complex and discontinuous, making it a sensitive method with relatively short-duration phases. It is carried out through a coordinated sequence of aerial maneuvers:

1. Safety protocols: The mission begins with a safety review, which includes aircraft inspection, calibration of onboard scientific equipment, and training of research personnel and crew. Experimental payloads are securely mounted to withstand both hypogravity and hypergravity phases and are conditioned according to the type of experiment.

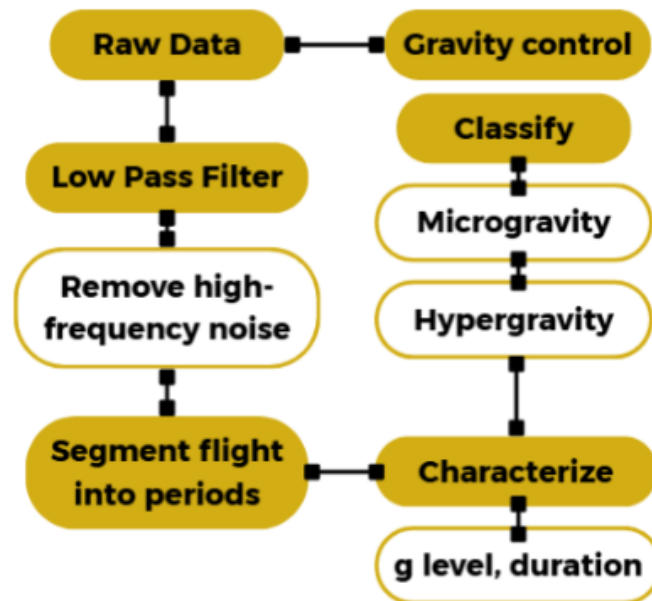
2. Takeoff and ascent to target altitude: The aircraft takes off and climbs to the designated altitude, where atmospheric conditions and gravitational stability (of both the aircraft and the environment) are optimal to begin the control maneuvers.

Figure 8

Parabolic Flight Trajectory equation

$$z(x) = \left(\frac{-g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} \right) x^2 + x \tan \alpha$$

3. Parabolic maneuvers: The aircraft follows a specified range of pitch angles, coordinated with the three main cabin control stations. During ascent, gravity increases to between 1.5 and 2 g (hypergravity), as the aircraft rises toward the apex of the parabola.
4. Microgravity phase execution: At the top of the parabola, the aircraft follows a ballistic trajectory with reduced engine power. Objects and personnel onboard experience microgravity conditions for 20 to 25 seconds, allowing for the performance of gravity-sensitive experiments.
5. Descent and stabilization: As the aircraft exits the parabola, it descends at a similar angle, generating another phase of hypergravity. It then momentarily stabilizes in horizontal flight before initiating a new parabola.
6. Repetition: A typical flight includes 30 to 40 parabolas. This repetition allows for the collection of multiple comparable data sets under controlled gravitational conditions.
7. Post-flight analysis and sample retrieval: Once all maneuvers are completed, the aircraft returns to base. Scientific equipment and study objects are removed. The collected data are then analyzed to identify the specific effects and consequences of microgravity exposure.

Figure 9*Operation of Parabolic Flight*

2.5 Neutral Buoyancy

2.5.1 Description

Neutral buoyancy is one of the best ways to simulate microgravity. This simulation method allows you to test out the technology under these physical conditions. But its real strength is how it helps train crews, since it's a great place for them to get used to this kind of environment, both physically, mentally, and kinaesthetically, under microgravity. NASA has the largest laboratory of this type, called the Neutral Buoyancy Lab (NBL) at NASA's Johnson Space Center in Houston, which is specifically used for mission planning, procedure development, hardware verification, astronaut training, and refinement of time-critical operations necessary to ensure mission success during spacewalks (Jairala et al., 2012; John Charles, 2016).

2.5.2 Scientific Applications

Neutral buoyancy is one of the most widely used methods in the preparation and training of crews for space missions, as well as in testing equipment for such missions. The following studies provide some specifications on these applications.

- **Extravehicular Activity (EVA):** Research shows that extravehicular activities (EVA) allow for the maintenance of spacecraft on a mission or space station; however, these activities require physical strength on the part of the individuals who perform them. Training using Neutral Buoyancy allows subjects exposed to this system to strengthen their physical abilities through continuous training in an environment like that experienced in the aforementioned areas, a space mission or space station (J. Li et al., 2017), which increases the chances of success and improves productivity (John, 2021; Macaluso et al., 2016).
- **Spacewalk Training:** Since the first space mission to the Moon, spacewalks have attracted special attention due to the challenge they represent for the space sector.

Precision and ease of movement are indicators of the success of space missions. NASA developed the Neutral Buoyancy Laboratory after testing this method of immersion in water in more limited spaces and observing its effectiveness for this type of training. Missions following the initial underwater training demonstrated the contribution of this methodology in the space sector (NASA, 2019).

- **Space suit test:** Neutral buoyancy has been shown through various studies to be an efficient testing method, given the multiple facets of evaluation for space suits, as it assesses the resistance of the materials used to pressure and humidity; the comfort it can provide to the individual; and the range of movement it allows, among other factors. These evaluations allow the design team to more accurately identify the strengths and weaknesses of the model so that the designs are less vulnerable to failure in the missions or activities for which they are used (Jacobs et al., 2009).

Figure 10

The Neutral Buoyancy Laboratory facilities



Note. Taken from *Neutral Buoyancy Laboratory* [Photograph], by Johnson Space Center, <https://www.nasa.gov/johnson/neutral-buoyancy-laboratory/>

2.5.3 Operational and Technical Parameters

The installed capacity of the neutral buoyancy laboratory allows for a variety of specialized simulation activities. All or most of these physical facilities, with their corresponding descriptions, are shown in Table 5.

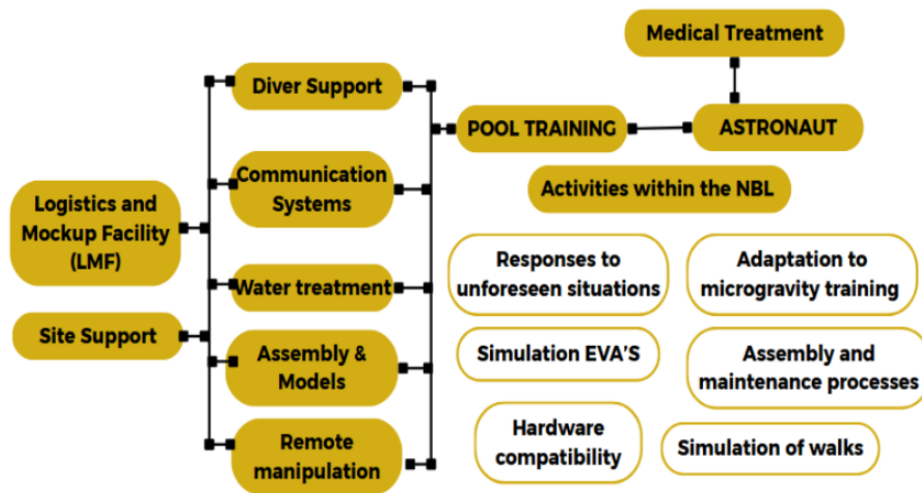
Table 5*Operational and Technical Parameters of Neutral Buoyancy Laboratory*

Parameters	Characteristics
The Pool	Dimensions: 202 feet (61.5 m) long, 102 feet (31.1 m) wide, and 40 feet (12.2 m) deep. Volume: 6.2 million gallons of chlorinated fresh water. Temperature: Maintained between 84°–86° F (28.9°–30° C).
Site Support	Includes outdoor space for training activities and designated areas (covered and uncovered) for hardware storage. Features a hyperbaric chamber, a hypobaric altitude chamber, medical treatment rooms, and locker facilities.
Diver Support	Provides operations support, reconfiguration, camera operations, and safety diving. Equipped with SCUBA and surface-supplied systems (nitrox/air). Includes an ISO Level 8 Clean Room for specialized maintenance and repair.
Logistics and Mockup Facility (LMF)	A series of workshops staffed by highly skilled personnel. Services include mockup fabrication, machine shop, welding, sewing, woodworking, and multi-disciplinary engineering for equipment maintenance.

2.4.4 Operation

For the development of research or simulation, the following key points must be taken into account in order to improve the experience:

1. Capabilities and activities: Check in advance what type of studies this laboratory allows you to carry out, whether it is suitable or adapts to your research or training requirements.
2. Activity to be simulated: Ensure that the environment has the appropriate architectural design, which in the NBL varies depending on the scenario to be set up.
3. Installation: Locate additional materials and equipment, and perform a preliminary medical examination of the test subject(s) and accompanying team.
4. Development: The communication team will act as mediators to maintain contact with the test team and all other support systems in the event of any changes or needs, as well as to facilitate the collection of data or other necessary information.

Figure 11*Operation of Neutral Buoyancy Laboratory*

2.6 Gravity Offload System

2.6.1 Description

The Gravity Offload System (GOS) is a passive setup that simulates microgravity conditions by counterbalancing a test article's weight using a trolley and counterweight mechanism, allowing realistic ground-based deployment testing (Tanimoto et al., 2007). A representative system based on this approach is The Active Response Gravity Offload System (ARGOS). It is a state-of-the-art platform developed by NASA to simulate microgravity and partial gravity conditions for testing and training purposes. It offers significant technical and operational advantages over previous systems (Tanimoto et al., 2007).

Figure 12*Active Response Gravity Offload System (ARGOS) at JSC*

Note. Taken from *Reduced Gravity Testing of Robots (and Humans) Using the Active Response Gravity Offload System*, by Paul Valle, 2017,

ntrs.nasa.gov/api/citations/20170008856/downloads/20170008856.pdf

2.5.2 Scientific Applications

Gravity Offload Systems (GOS) are essential tools for simulating reduced gravity conditions, such as those found on the Moon or Mars, this in terrestrial laboratories [54]. By counterbalancing the weight of a test object through mechanical or electromechanical means, GOS enable realistic, long-duration experiments without the limitations of parabolic flight or orbital platforms. Their versatility makes them valuable across multiple scientific and engineering domains, including:

- **Astronaut Training:** GOS allow astronauts to train under simulated partial gravity, supporting extravehicular activity (EVA) practice and spacesuit mobility assessments. This is critical for mission preparedness, ensuring that crew members can perform essential tasks in non-Earth environments.
- **Robotics and Mobility Systems Testing:** These systems facilitate the evaluation of planetary rovers, robotic arms, and mobility aids under simulated lunar or Martian gravity. Engineers can assess performance, stability, and motion control algorithms in conditions that mimic the intended operational environment.
- **Human Physiology Research:** By unloading body weight partially or entirely, GOS support studies on musculoskeletal adaptation, postural control, locomotion in low gravity and rehabilitation studies. Allowing the study of human physiology in a safe and controlled environment (Harvey, 2020)..

2.6.3 Operational and Technical Parameters

The effectiveness of Gravity Offload Systems (GOS) depends on the precision and range of their mechanical and control characteristics. The specific details of these in ARGOS and more parameters are presented in Table 6.

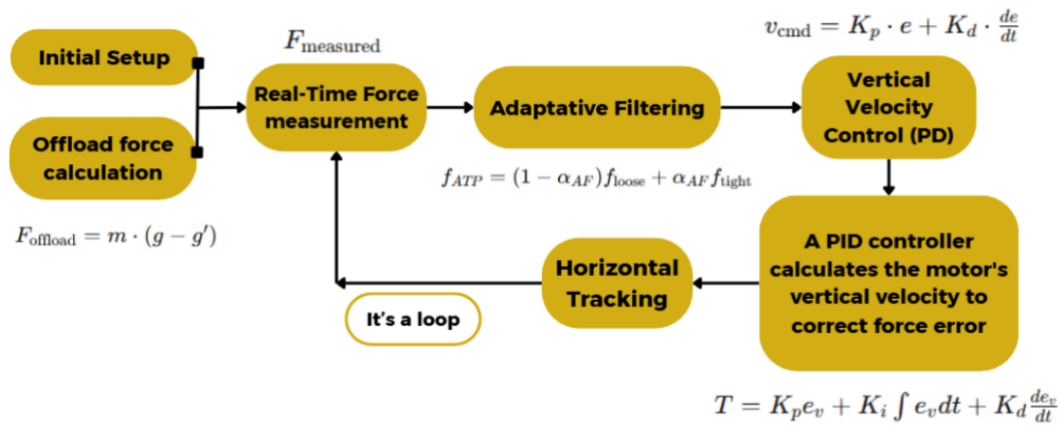
Table 6*Operational and Technical Parameters of Active Response Gravity Offload System*

Operational and Technical Parameters	Characteristics
Type of installation	Indoor steel gantry structure (bridge crane design).
Working dimensions	Approximately 11 m (L) $\times$ 5.5 m (W) $\times$ 5.8 m (H) (36 $\times$ 18 $\times$ 19 ft) (Krause et al., 2018).
Main structure	Fixed steel frame with motorized bridge and trolley.
Degrees of freedom	Motion in three axes (X, Y, Z) plus rotation via gimbal system (Krause et al., 2018; Larry K. Dunganl et al., 2015)
Testing environment	Flat laboratory floor, open space for walking, running or jumping (Larry K. Dunganl et al., 2015).
Load Capacity	Supports humans (in or out of suits), robots, tools, up to 340 kg (Larry K. Dunganl et al., 2015).
Control technology	Force sensors, electric motors, real-time PD + PID control loops (Larry K. Dunganl et al., 2015).

2.6.4 Operation

The operation of the Active Response Gravity Offload System (ARGOS), as a microgravity simulator, is detailed through the following operational steps:

1. Initial Setup: The subject (human, suit, or robot) is connected to a harness or gimbal suspended from the system.
2. Offload Force Calculation: The desired gravity level is set (e.g., Moon or Mars gravity).
3. Real-Time Force Measurement: A load cell measures the actual vertical force on the subject.
4. Adaptive Filtering: A dynamic filter blends two signals (tight and loose) to produce a stable control output.
5. Vertical Velocity Control (PD): A PD controller calculates the motor's vertical velocity to correct force error.
6. Motor Torque Control (PID): A PID controller applies the required motor torque to follow the target velocity.
7. Horizontal Tracking (X–Y): Cable angle sensors detect user movement; the trolley adjusts to stay aligned overhead.
8. Continuous Feedback: The system continuously monitors and adjusts to maintain consistent simulated gravity.

Figure 13*Operation of the Active Response Gravity Discharge System*

2.7 Suborbital Spaceflight Systems

2.7.1 Description

Suborbital Spaceflight Systems are advanced platforms that provide access to real microgravity conditions by launching vehicles along parabolic trajectories beyond the edge of space without entering orbit (Ferl et al., 2023). These systems offer 3-4 minutes of true weightlessness, making them valuable for scientific experiments, space technology testing, and astronaut training (Ferl et al., 2023; Schroeder et al., 2021; Smith & Buckey, 2022).

Figure 14*Suborbital spacecraft. Blue Origin's 'New Shepard'*

Note. Taken from *Anaesthetists and aerospace medicine in a new era of human spaceflight* (p.2), by T. G. Smith and J. C. Buckey Jr, 2022, *Anaesthesia* 2022, 77.

2.7.2 Scientific Applications

Suborbital Spaceflight Systems provide brief access to real microgravity and rapid gravity transitions in a controlled, crewed environment. Their unique flight profile enables real-time experimentation, making them ideal for studying fast biological and physiological responses. Key scientific applications include:

- **Study of rapid genetic responses in plants:** Analysis of how microgravity affects gene expression in *Arabidopsis thaliana* at different phases of the flight. Kennedy Fixation Tubes (KFTs) were manually activated by an astronaut during ascent, microgravity, and re-entry, revealing phase-specific molecular changes not detectable in automated or orbital experiments (Fert et al., 2023)..
- **Study of acute physiological effects in humans:** Evaluation of how the body responds to extreme gravitational changes (+6 *Gz*, 0 g) within minutes. Observations include fluid shifts toward the head, mild hypoxia, respiratory difficulty, and cardiovascular stress, with implications for medical screening and risk management in future crewed flights (Kluger et al., 2013).
- **Validation of hardware for crew-operated in-flight experiments:** Successful testing of portable experimental devices (KFTs) handled directly by astronauts during flight. This demonstrates the feasibility of conducting real-time biological experiments in suborbital missions, expanding scientific capabilities beyond automated payloads (Fert et al., 2023).

2.7.3 Operational and Technical Parameters

The operational and research value of Suborbital Spaceflight Systems relies heavily on their specific operational and technical parameters throughout flight. Characteristics such as peak G-loads, microgravity duration, and gravity transition dynamics define the onboard environment for both crew and experiments. The details of these and related parameters are presented in Table 7.

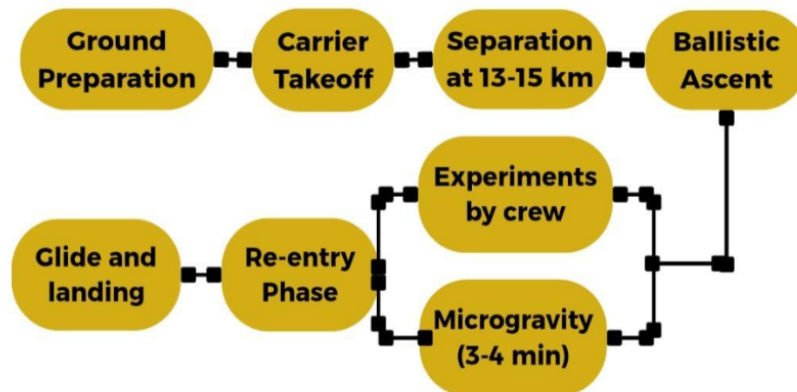
Table 7*Operational and Technical Parameters of Suborbital Spaceflight System*

Operational and Technical Parameters	Characteristics
Flight Altitude (h)	The maximum altitude defines whether the flight qualifies as spaceflight and influences both the gravity level onboard and the duration of microgravity.
Microgravity Duration (Δt_{0g})	Suborbital trajectories provide 3–4 minutes of effective microgravity below $10^{-2}g$, allowing real-time observation of early biological and physical responses.
G-Load Profile ($Gz_{\text{máx}}$)	During ascent and especially re-entry, gravitational forces can reach up to $+6Gz$. These loads are brief but intense and require prior medical screening.
Cabin Pressure (P)	The spacecraft maintains a pressurized cabin throughout the flight to ensure human and biological safety. Adequate level of pressure helps avoid hypoxia while accommodating a wide range of passengers and experimental materials.
Load Capacity	Suborbital vehicles have constrained volume and mass limits due to their design and safety regulations. While the payload mass is limited, the environment supports complex biological and molecular research over short timeframes.

2.7.4 Operation

The operation of the Active Response Gravity Offload System (ARGOS), as a microgravity simulator, is detailed through the following operational steps:

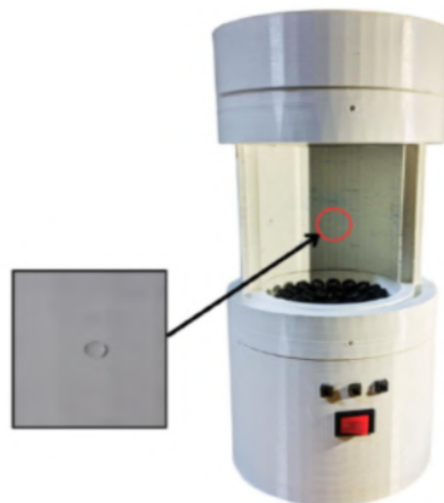
- Ground preparation:** The spacecraft is attached to the mothership. Crew and scientific payloads (e.g., KFTs) are secured and pre-flight checks are completed.
- Carrier takeoff and ascent:** The system takes off horizontally. Conditions remain at $1g$ inside the cabin.
- Separation and rocket ignition:** At 13–15 km altitude, the spacecraft separates and fires its rocket for around 60 seconds, producing up to $+6Gz$.
- Ballistic ascent and microgravity:** The vehicle coasts to around 85 km altitude. Microgravity lasts 3–4 minutes. Experiments can be performed during this phase.
- Re-entry:** The spacecraft descends, experiencing strong G-forces again. Feathered configuration stabilizes descent.
- Glide and landing:** The vehicle glides unpowered and lands on a runway like a plane.
- Post-flight:** Crew and samples are recovered. Scientific data is analyzed on Earth.

Figure 15*Operation of a Suborbital Spaceflight System*

2.8 Acoustic Levitation

2.8.1 Description

Acoustic levitation consists of suspending particles or liquids without physical contact, due to the balance between acoustic pressure counteracting Earth's gravitational pull, as the upward force generated by the acoustic field must balance the downward gravitational force (weight) acting on it. This balance is crucial for maintaining stable levitation within the acoustic chamber, allowing the perceived gravity to be manipulated to conditions such as microgravity (Duran Aquino et al., 2024; Tracy V. Wilson, 2023).

Figure 16*Acoustic Levitation System*

Note. Taken from *Can Acoustic Levitation Simulate Microgravity in Fluids?* (p.6), by Rivaldo Carlos Duran Aquino, Karen Esteincin Cuba Vargas, Samir Stefano Suarez Rios, JohnnyRomero Milián, Avid Roman-Gonzalez, 2024, 75th International Astronautical Congress (IAC).

2.8.2 Scientific Applications

Acoustic levitation systems are an essential method for inducing reduced microgravity environments, making them an ideal tool for biological and chemical experiments or micro-scale testing. Among their most notable applications are:

- **Biotechnology and pharmaceutical development:** Feasibility analysis of cell culture technologies and acoustic particle manipulation for long-duration space missions via levitation in induced microgravity. Includes biological safety assessments of embryonic (e.g., zebrafish) and germline development under simulated weightlessness, with critical implications for sterile pharmaceutical research (Dumy et al., 2020).
- **Fluid manipulation and crystallization dynamics:** Study of evaporation and crystallization in saturated saline solution droplets (NaCl, KCl, NH₄Cl) under microgravity and reduced pressure. Utilizing acoustic manipulation to observe *in situ* dynamics and the Marangoni effect under extreme conditions, informing research in astrochemistry and sustainable resource management (L. Li et al., 2020).
- **Manufacturing and acoustic innovation:** Characterization of mechanical stresses in structures manipulated by vibration, such as acoustically coupled granular rafts, to obtain force-displacement curves and optimize torsion resistance elements (Hadidi et al., 2025). Includes the development of substrate-free additive manufacturing (3D printing) using acoustic polymer manipulation to reduce supply dependence during space missions (Brown et al., 2024).
- **Advanced material research and thermomechanics:** Experimentation on material casting and the characterization of thermomechanical properties under extreme conditions. Focuses on the deep undercooling of liquids below freezing points and the processing of glass and ceramics at ultra-high temperatures to discover novel material phases (Raffel et al., 2024).

2.8.3 Operational and Technical Parameters

The effectiveness of the acoustic levitation system for microgravity simulation depends on external and internal physical parameters, which allow the desired level of microgravity to be established. These parameters include the pressure and density of the medium, the simulator model used, the simulation position within the generated field, and the characteristics of the object under study. The specific details of these parameters are presented in Table 8.

Table 8*Operational and Technical Parameters of Acoustic Levitation*

Operational and Technical Parameters	Characteristics
Operating frequency (f)	It defines the rest of the parameters and is used to determine the sample to be investigated. Generally, the frequency in small acoustic-gravitational simulation oscillators is between 16.7 and 40 kHz.
Wavelength (λ)	It is established by the simulator model, which consists of a cylinder (upper part) and a concave reflector (lower part) at the ends, to adapt to the resonance mode. Generally, the wavelength is usually 20 mm.
Gor'kov potential (U)	Potential drop between resonance phases. Its distribution allows us to determine the positions where Earth's gravity is counteracted, where the object of study can be located.
Acoustic pressure (p)	Pressure generated by the transducers (ends), which must balance the weight of the object under study. It is estimated using the Gor'kov potential. In traditional simulators, it usually varies between 297 and 540 Pa.
Density of the test object (ρ)	Its magnitude defines the appropriate parameters for the stability of the experiment; the denser it is, the greater the acoustic potential drop must be.
Particle radius (r)	As part of the characteristics of the object under study, its radius must be less than the minimum wavelength for the Gor'kov potential.
Node position (x_n)	Modifiable depending on the relative phase of the transducers. These are the points of greatest gravitational stability, and their width or centrality will depend on the experiment.

2.7.4 Operation

The acoustic levitation system is delicate, complex, and continuous, making it sensitive to vibrations and external conditions. It is carried out through a sequence of procedures and calibrations:

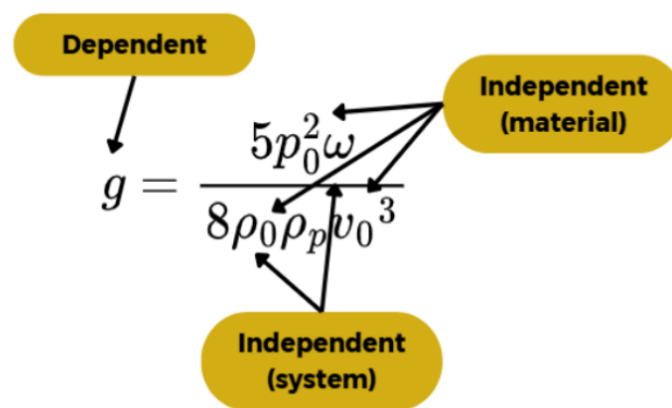
1. **Characterization of the object of study:** The type of experiment to be performed is determined, as well as the parameters of the object, and the simulation values for generating the potential field are adjusted accordingly. Ideally, it should be spherical (like liquids in suspension), with a radius smaller than the working wavelength (~ 20 mm) and low density. The object must be clean, dry, and free of electrostatic charge to avoid unwanted movements or repulsions.
2. **Alignment of the transducer:** The simulator is assembled by aligning the transducer and the concave reflector to adjust the resonance and the desired wavelength

(estimated according to the characteristics of the Gorkov potential). Mechanical stability is ensured to avoid misalignments during operation.

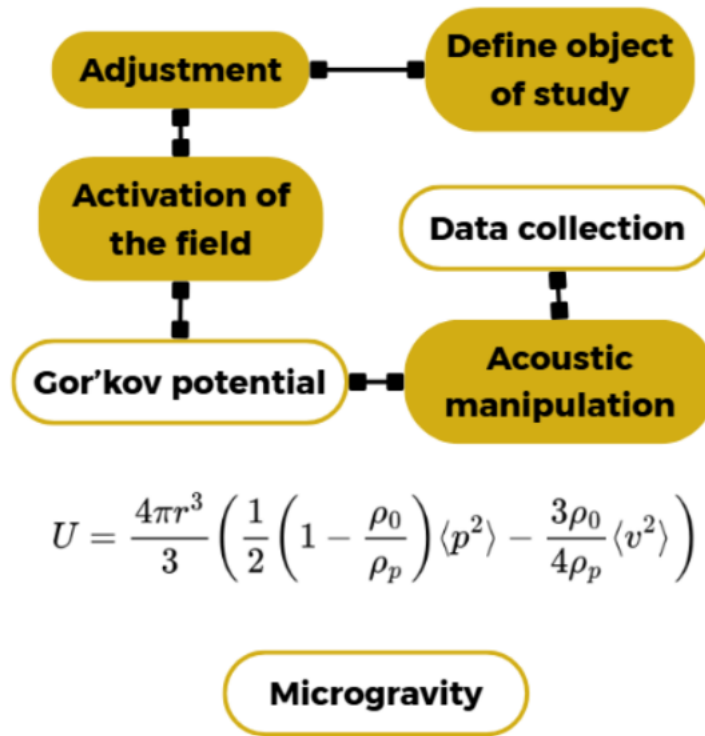
3. **Signal configuration and phase control:** The operating frequency is set using the wave generator or microcontroller. The phase difference for standing waves is calibrated from the transducers. The dual-channel configuration allows real-time phase manipulation, enabling systematic noise to be subtracted.
4. **Activation of the acoustic field:** The potential field is established by powering the transducers. Basic tests are performed for the previously calculated empirical identification of pressure nodes, and the ideal acoustic pressure is verified.

Figure 17

Acoustic levitation gravitatory behaviour equation



5. **Positioning and control of the object under study:** The object to be evaluated is introduced into the minimum potential points (depression node) of the field, using non-conductive clamps. Adjustments can be made to the phase or frequency to precisely control the height or move the object between nodes.
6. **Experimental manipulation and observation:** External factors such as temperature, air currents, or vibrations are minimized while data on the various parameters of the object under study are recorded.
7. **Removal of the object under study:** The field is gradually deactivated at the end of the test. The object is carefully returned to avoid systematic variations due to shocks or falls. The data is compared with the terrestrial standard.
8. **Post-experimental review of the system:** All electronic components are turned off and disconnected. The physical condition of the transducers and circuits is checked for possible wear or displacement.

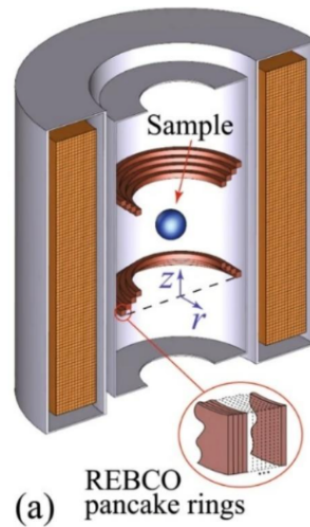
Figure 18*Operation of Acoustic Levitation*

2.9 Magnetic Levitation

2.9.1 Description

Magnetic levitation is a technology that allows objects to be suspended and moved without any contact, through the interaction of magnetic fields that generate repulsive or attractive forces. It uses magnets and superconducting materials that repel magnetic fields, allowing objects to be suspended stably.

This technology is fundamental in applications such as scientific medical research, in which microscopic individuals are generally studied to provide alternative solutions to various diseases or, in the case of space, analysing the behaviour of different cells in microgravity to prevent damage in future missions. Other applications include improving energy and sustainable transport, contributing to the creation of more efficient systems with less wear and tear (Hammer et al., 2009; Liang et al., 2024).

Figure 19*Magnetic Levitation System*

Note. Taken from *A magnetic levitation based low-gravity simulator with an unprecedented large functional volume* (p.4), by Hamid Sanavandi and Wei Guo, 2021, *npj Microgravity*.

2.9.2 Scientific Applications

Magnetic levitation offers a wide range of scientific applications in controlled environments, allowing terrestrial microgravity to be simulated to study physical and chemical phenomena and biological development without gravitational influence. Among its most notable applications are:

- **Microgravity simulation and physicochemical study:** Implementation of experiments that normally require space-based environments to observe physical and chemical behaviors that do not occur under standard Earth gravity. This setup enables the analysis of fluid dynamics and reaction kinetics in induced weightlessness (Wang et al., 2021; Xuesong et al., 2025).
- **Biological research and biotechnology:** Observation of organismal and cellular development without gravitational influence. This research is essential for advancements in tissue engineering, biotechnology, and understanding the long-term effects of microgravity on human biology and cellular health (Knigge et al., 2025).
- **Superconductor research and high-precision engineering:** Development of sensors, contactless motors, and high-precision devices. By utilizing magnetic levitation in superconductors, friction is eliminated, which enables significantly more efficient performance and extends the operational life of components by preventing mechanical wear and tear (Wang et al., 2020).

2.9.3 Operational and Technical Parameters

To conduct a magnetic levitation experiment, different physical designs in size and shape can be used. However, Table 9 shows a common and accessible design for small experiments.

Table 9*Operational and Technical Parameters of Magnetic Levitation*

Operational and Technical Parameters	Characteristics
Design	Maxwell coil in a gradient field. Diameter $D = 8\text{cm}$ in the presence of an applied uniform field B_0 .
Contour	Black dots denote the boundary of the entrapment region, and the solid black outline shows the low-force region (i.e., acceleration $< 0,01g$).
Origin of coordinates	It is in the center of the lower current loop.
Potential energy	Specific calculated $E(r)$ of a small sample of water placed in the magnetic field for $I = 112,6\text{kA}$ and $B_0 = 24\text{T}$.

2.9.4 Operation

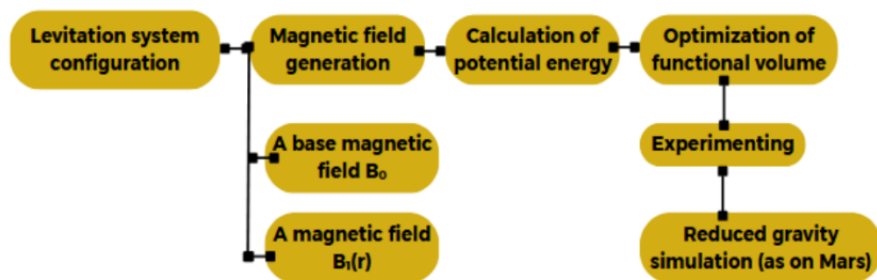
To carry out a magnetic levitation experiment, the following steps must be taken into account. However, these steps may be increased or decreased, or even merged, depending on the specific experiment or research being conducted.

1. **Levitation system configuration:** A magnetic levitation design is implemented using a superconducting magnet and a Maxwell coil with a gradient magnetic field. The system is assembled with a Maxwell coil, which is placed inside the superconducting magnet.
2. **Magnetic field generation:** The magnetic field is produced in two phases:
 - A base magnetic field B_0 is produced by the superconducting magnet, which is fairly uniform.
 - A magnetic field $B_1(r)$ is generated by the Maxwell coil, which has a constant gradient. This configuration produces a non-uniform magnetic field that allows objects to levitate.
3. **Calculation of potential energy:** The potential energy of an object in a magnetic field is calculated using a formula that depends on the magnetic susceptibility of the material and the density of the object. The levitation position in space is determined, where the magnetic force compensates for gravity, creating microgravity conditions.
4. **Optimization of functional volume:** The functional volume $V_{1\%}$ is calculated, which is the volume in which the acceleration is less than 1% of Earth's gravity. The goal is to increase this volume to allow larger objects to levitate. The system is optimized by adjusting the current applied to the Maxwell coil and the intensity of the magnetic field.
5. **Experimenting:** Once the parameters have been optimized, the object (e.g., a water sample) is placed in the center of the magnetic field where levitation occurs. The object is suspended in space without physical contact, simulating microgravity conditions.

6. **Reduced gravity simulation (as on Mars):** In addition to simulating Earth's microgravity, the system can also be adjusted to simulate reduced gravity conditions, such as those on Mars (approximately 38% of Earth's gravity), expanding the simulator's applications.

Figure 20

Operation of Magnetic Levitation



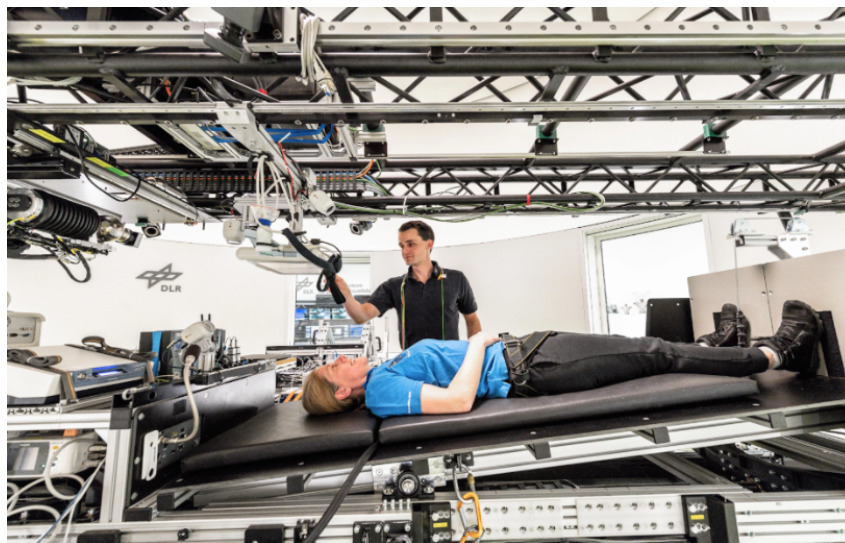
2.10 Head Down-Tilt Bed Rest (HDTBR)

2.10.1 Description

The “head-down bed rest” (HDTBR) is a method of studying the physical changes that occur in people who travel to space. It consists of lying in bed with the head tilted downward at -6° , usually for days, weeks or months. And it is often used to study the consequences of spaceflight, from various methods of inducing them into a state of cerebral weightlessness (by having fluids directed at the head) (Schmitt et al., 2000).

Figure 21

The Head Down-Tilt Bed Rest (HDTBR)



Note. Taken from *One Small Step ... Without Ever Leaving Bed* [Photograph], by Monica Edwards, 2019, <https://www.nasa.gov/humans-in-space/one-small-step-without-ever-leaving-bed/>

2.10.2 Scientific Applications

Currently, multiple experiments have been performed on the Head Down-Tilt Bed Rest (HDTBR), providing critical data on physiological adaptation to simulated microgravity:

- **Cardiovascular deconditioning:** Analysis of alterations in heart parameters, blood flow, and muscle stiffness. These changes occur due to simulated microgravity and are primarily driven by the prolonged inactivity of the body (Rabineau et al., 2022).
- **Muscle atrophy and functional decline:** Investigation of the loss of muscle mass generated by prolonged bodily rest. Research indicates a logarithmic loss in mass and function resulting from the constant disuse of specific muscle groups (Marusic et al., 2021).
- **Bone loss and mineral balance:** Studies during experimental bed rest indicate a negative bone mineral balance. It has been observed that the calcium isotopic composition of urine becomes lighter compared to pre-rest levels, correlating with reduced bone densitometric measurements (Heuser et al., 2019).
- **Sensorimotor and neurological adaptation:** Analysis of brain adaptation to sensory disturbances, including spatial disorientation and vestibular system imbalances. These findings are fundamental for developing rehabilitation strategies for post-spatial exploration recovery (Edwards, 2019; Heuser et al., 2019; Platts et al., 2009; Tays et al., 2023).

2.10.3 Operational and Technical Parameters

The Head Down-Tilt Bed Rest (HDTBR) method is more part of the neural responses during fluid direction change. Thus, the following table of operational and technical parameters specifies specific things like the conditions that the environment needs in order to have a better sensation of microgravity.

Table 10

Operational and Technical Parameters of Head Down-Tilt Bed Rest

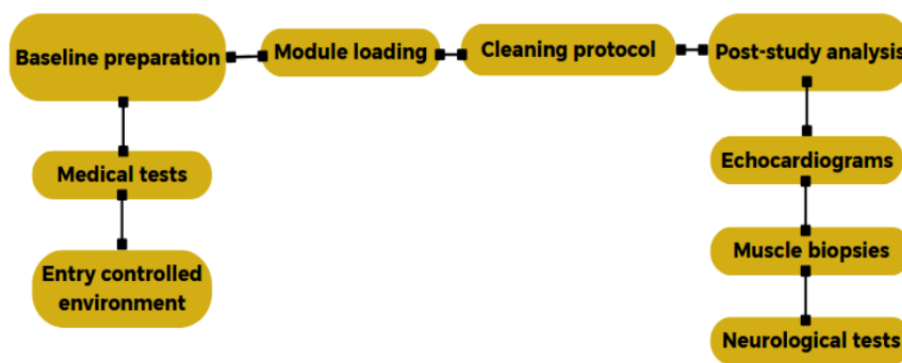
Parameters	Characteristics
Angle of inclination	−6° (head downward). Stretcher that can cover little more than the person's body and with the head towards the side of the inclination (Schmitt et al., 2000).
Environmental Conditions	Temperature: 20–25°C (controlled). Humidity: 35–55%. Lighting: Day/night cycles (Edwards, 2019; Rabineau et al., 2022).

2.10.4 Operation

The operation of the Head Down-Tilt Bed Rest (HDTB) is based on the following steps:

1. **Baseline preparation:** It starts by selecting volunteers (in good health), not older adults or children. To ensure the health of the participants, complete medical tests are conducted, including blood and urine analysis, bone density tests, among others. Admission is granted to a room temperature environment equipped with an adjustable horizontal bed.

2. **Cleanliness and duration of the experiment:** Maintain cleanliness in the space and of the participant to ensure good health without influencing the results. Daily controls are implemented to keep all physiological data accessible and monitored throughout the duration of the simulation.
3. **Data collection and post-experiment tests:** After the time in the inclined bed, it is time to analyse the changes; for this purpose, echocardiograms are necessary as a test of orthostatic tolerance, muscle biopsies to see the density of their muscles and neurological tests (to see balance, coordination and vision) (Brauns, 2022; Edwards, 2019; Marusic et al., 2021; Platts et al., 2009; Tays et al., 2023).

Figure 22*Head Down-Tilt Bed Rest operation*

3. Results

Based on the data characterizing each microgravity simulation method, a comparative parameterization is performed to evaluate its effectiveness in terms of resources, experimental duration, scientific accuracy, and operating costs. The integrated figures and tables show the distribution of methods according to their continuous microgravity duration and level of scientific fidelity, their popularity in scientific literature and in use for each technique, as well as international partnerships and commitment to the development of weightless research. This representation makes it easier to identify the advantages, limitations, and areas of application of each technique according to its accessibility, technical requirements, and experimental value.

3.1 Technical Characteristics and Metrics of the Methods

For a general, yet specific and timely overview, the data, parameters, and metrics for each method are grouped together. Table 11 lists these elements so that they can be compared in terms of versatility, ease of use, reliability, and relevance. Our goal is to compare which of these methods is most functional in terms of performance, emphasizing the balance between durability, g-fidelity, and cost. For future research, hybrid approaches could fill the gaps in terms of scalability and quality. These are issues that we will highlight in the conclusions.

In terms of simulation duration, the ISS stands out by offering the longest continuous exposure to microgravity, with the lowest microgravity levels, below $10^{-5}g$, but at a high

cost and with significant logistical complexity. For this reason, it will be used as a standard to highlight equally efficient but more accessible options for training and research.

In terms of simulation level, suborbital flights provide a similar range to that of the ISS, but with discontinuous tests lasting 5 to 10 minutes. In addition, they are costly and logistically laborious, making this method ideal for short-duration experiments, prioritizing the level of microgravity over duration and cost. Similarly, parabolic flights have a lower level of microgravity, but are more accessible in terms of cost and personnel requirements, with campaigns aimed at university student research. However, it is a discontinuous simulation method, lasting between 20 and 25 seconds per campaign. On the other hand, drop towers offer the best level of microgravity, but are less accessible in terms of cost, with simpler logistics but limitations in terms of usage time, as the duration is only 5 to 10 seconds, thus excluding research into long-term phenomena.

Laboratory systems, on the other hand, guarantee continuous testing, making them suitable and ideal for studies in biotechnology or gravitational biology that require hours or days of exposure, although they have the limitation of their physical capacity, being restricted to samples of reduced size and mass, as well as presenting residual accelerations of greater magnitude. The clinostat and RPM have more affordable unit prices for the general public, but they introduce radial centrifugal forces and velocity gradients in the fluid that can skew biological and/or physical results. While levitation techniques (acoustic and magnetic) partially reduce these noises in the results, as their control is more precise and accurate, they require more rigorous technical complexity to control the field produced, as well as possible repercussions on samples that are more sensitive to these environments than to microgravity itself.

Finally, physiological analogue systems (HDTBR, GOS, and NBL) accurately simulate changes in body fluids, muscle atrophy, and pressure distribution, offering prolonged periods of simulation in controlled environments, although they do not replicate weightlessness. These platforms are ideal for astronaut training and preparation, as well as for studies with larger and heavier samples, and for research in human physiology. However, their logistics are more complicated than those of laboratories, becoming more functional and complex to ensure the efficiency of the effects. This requires higher budgets, depending on whether it is for a space agency or academic research.

Table 11
Technical specifications of microgravity simulation method

Simulation	Level (g)	Period	Cost	Repeat.	Mass	Infra.	Inter.	Type	Limitations
<i>True μg</i>									
Drop Tower	$10^{-2}\cdots-6$	5–10 s	\$5,800	Limited	< 160 kg	Static	TC	Disc.	Minimal vibrations during fall
Parabolic Flight	$10^{-2}\cdots-3$	20–25 s	\$5,298.91	Limited	Human	Comp.	Human	Disc.	High vibration and residual acc.
Suborbital Flight	$10^{-4}\cdots-5$	5–20 min	\$8,040.90	Limited	< 360 kg	Comp.	TC	Disc.	Vibrations during launch
<i>Sim. effects</i>									
Clinostat	Sim. effects	hours–days	\$206.49	Frequent	< 1 g (5 mL)	Movable	Human	Cont.	Residual centrifugal forces
RPM	Sim. effects	hours–days	–	Limited	< 1.5 kg	Movable	Human	Cont.	Constant mechanical movement
Acoustic Lev.	$10^{-4}\cdots-5$	min–days	\$28.48	Limited	$\approx 0.05\text{--}0.1\ \mu\text{L}$	Movable	Human	Cont.	Intense sound waves
Magnetic Lev.	$10^{-4}\cdots-5$	min–days	\$92.27	Limited	$\approx 10\text{--}100\ \mu\text{L}$	Movable	Human	Cont.	Intense magnetic fields
NBL	$10^{-1}\cdots-2$	5–10 hours	\$265.2	Frequent	Human	Static	Human	Cont.	Water resistance and laminar flow
GOS	$10^{-1}\cdots-2$	0.5–8 hours	–	Limited	Human	Movable	Human	Cont.	High sensitivity to human movement
HDTBR	Sim. effects	days–months	–	Frequent	Human	Movable	Human	Cont.	Side effects due to posture

Note. "Simulate effects" refers to systems designed only to replicate the physiological and psychological outcomes of microgravity, without reproducing its physical conditions. "Discontinuous" indicates that the experiment consists of separate test sessions with a reduced simulation time per trial, while "Continuous" means a single, extended session is used for the experiment. Regarding infrastructure, "Static" means no movement of the system is required, "Movable" indicates the setup is transportable, and "Composed" refers to a full or partial combination of static and movable elements. Finally, "Human" implies direct human intervention, whereas "TC" (telecommunication) involves remote operation without physical human presence.

3.2 Quantitative Evaluation of Simulation Fidelity vs. Duration

Microgravity simulation methods can be classified into two broad categories: those that generate real microgravity through free fall or suborbital trajectories (Drop Tower, Parabolic Flight, Suborbital Flight, and, at one extreme, the ISS) and those that only emulate its effects through rotations, suspensions, or counterbalancing of gravitational force, which can be divided into laboratory systems (clinostats, RPM, and levitators) and analog systems (NBL, GOS and HDTBR).

Figure 23

Logarithmic distribution of the efficiency parameters of each quantifiable simulation

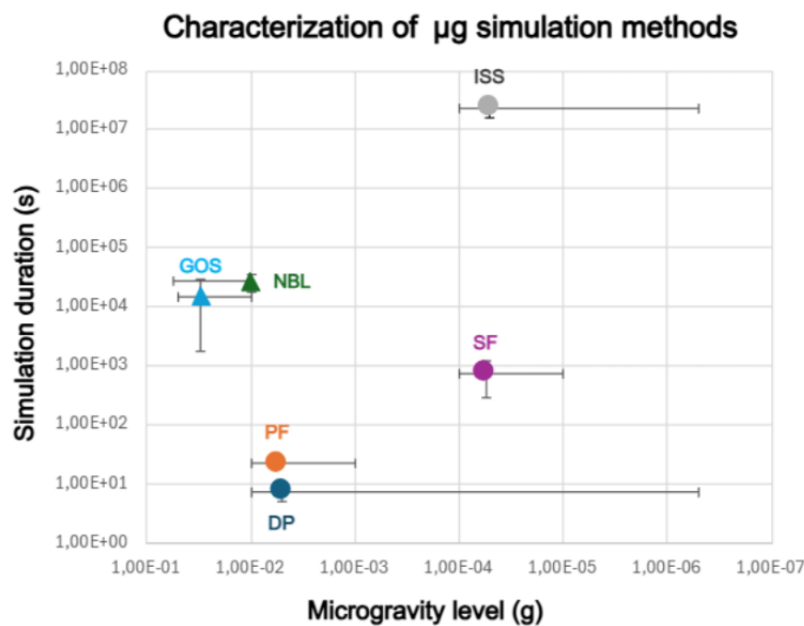
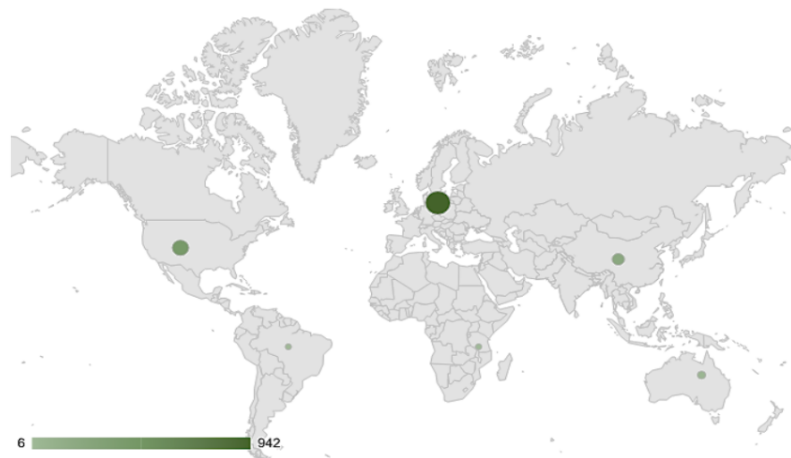


Fig. 23 specifically compiles the relationship between efficiency and effectiveness, with the minimum and maximum duration of each simulation technique, as well as the accuracy range of the microgravity level achieved by each one according to the experiments performed or their usage parameters. It shows that free-fall platforms offer the highest scientific accuracy but provide the shortest exposure times to microgravity. In contrast, analog and laboratory-based systems offer longer durations but with less fidelity to actual space conditions. This classification highlights the relationship between scientific accuracy and experiment duration, clearly showing how each technique ranks in terms of its similarity to actual space environments and its usefulness for conducting experiments in microgravity conditions. It is important to supplement this information, for a practical assessment of usability, with the costs and parameters in Table 11.

3.3. Geographic Distribution of Scientific Production

Fig. 24 shows a world map with the regional distribution of the number of scientific publications on microgravity simulation methods produced between 2000 and 2025. It uses a color scale that varies in intensity according to the number of publications per region, allowing for a comparative visualization of scientific productivity in this field at the global level.

Figure 24*Distribution of Research Publications by Region*

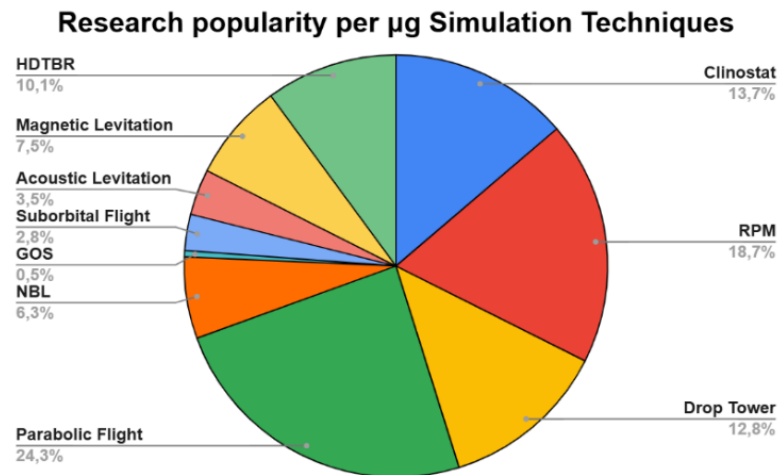
Note. Compilation of papers on microgravity simulation methods by region, from 2000 to 2025.

The geographical distribution of scientific publications (papers) on the subject of microgravity simulations shows a considerable regional imbalance. Europe leads with 942 articles, representing 56.9% of the world total, more than half, driving institutional and infrastructure investment in the sector. For its part, the United States produced 427 publications (25.8%), showing strong investment in science and technology, in addition to its strong track record in the area. Asia published 218 articles (13.2%), although this includes a large and diverse group of countries with varying levels of research capacity.

On the other hand, South America, Africa, and Oceania have contrasting statistics, with only 0.8% (14 articles), 0.4% (6 articles), and 3.0% (49 articles), respectively. These figures highlight a disparity in technological progress, access to infrastructure, and funding for microgravity research, suggesting potential obstacles to the democratization of scientific development in space sciences. This difference underscores the need for more open international collaboration with mechanisms to promote science.

3.4 Distribution of Scientific Literature by Methods

Fig. 25 shows the percentage distribution of scientific publications according to the microgravity simulation method used. Each segment of the graph represents a specific technique. This visualization allows us to compare the relative popularity of the different methods based on their frequency of use in scientific research related to microgravity conditions.

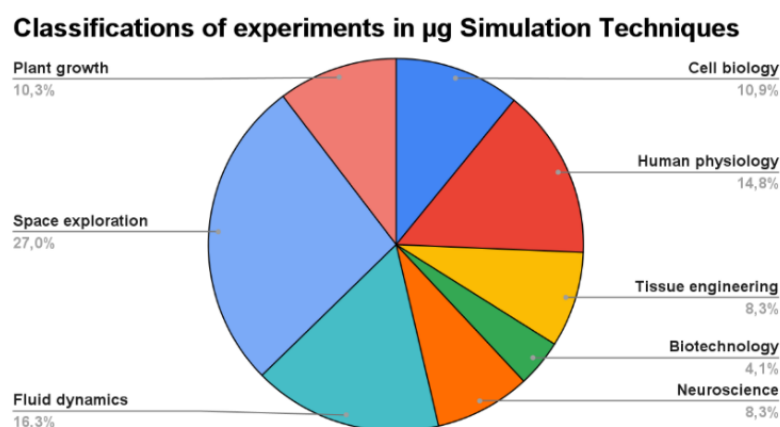
Figure 25*Research Publications According to Microgravity Simulation Method*

Parabolic flights (24.3%) and RPM (18.7%) represent the most prevalent methods. In terms of accessibility, especially for high school and university students, the Clinostat and RPM become an economical, ergonomic, and timely alternative concerning the needs of microgravity surface effects verification, thus explaining their popularity.

On the other hand, the low popularity of GOS (0.5%) reflects its limitations of accessibility, complex infrastructure, and low microgravity level ($< 10^{-2}g$). Suborbital Flights have the highest level of microgravity and longer duration, but with high costs and infrastructure at bureaucratic request, making the experiments performed scarcely accessible to private research.

3.5 Distribution of Scientific Literature by Experiments

Fig. 26 shows the thematic distribution of publications on microgravity research, which are related to the popularity, accessibility, and level-duration of each method.

Figure 26*Research Publications According to Type of Experiment*

Based on the distribution, each region and the associated topics are evaluated in order to identify their relationship with accessibility, technical level, and quality of the methods used. Likewise, the most commonly used simulation techniques in each case are determined:

- **Space exploration and mission protocol validation:** Representing 27% of experiments, this versatile field encompasses both microscopic and macroscopic methodologies. It serves as a critical platform for astronaut training, hardware testing, and soil behavior sampling, allowing for the verification of life support systems and mission protocols in weightless conditions prior to actual deployment.
- **Fluid dynamics and phase phenomena:** Accounting for 13.3% of research, this area utilizes diverse samples ranging from fuels to water droplets. The absence of sedimentation in microgravity enables the isolated observation of conductivity, convection, and mixing phenomena—effects that are typically masked by stratification and buoyancy-driven flotation on Earth.
- **Human physiology and cellular biology:** Comprising 25.7% of the research volume, this biomedical field focuses on fluid redistribution and cardiovascular adaptation. While laboratory analogs like Clinostats and Random Positioning Machines (RPM) do not recreate true microgravity, they provide the continuous exposure (hours to days) necessary to observe evolutionary changes in tissues and cell lines.
- **Plant growth and tissue engineering for life support:** Representing 18.6% of studies, these areas address food management and biomaterial development. Laboratory and free-fall systems are employed to study morphogenesis under weightlessness, although experimental scale remains influenced by the high reliability standards of the International Space Station (ISS).
- **Neuroscience and biotechnological constraints:** Accounting for 12.4% of research, these studies face methodological gaps due to the discontinuity of parabolic flights and the limitations of terrestrial analogs. Research into brain physiology, protein synthesis, and compound production is currently restricted by the availability of suborbital flights and the operational reliability of rotary systems.

3.6 Accessibility to Scientific Production and Research

Table 12 is the institutional table, which emphasizes a laboratory's accessibility to each method, such as infrastructure distribution, cost barriers, collaboration models, and the number of scientific publications, which determine the feasibility of replicating research in microgravity.

Table 12*Research Publications According to Type of Experiment*

Simulation	Publications	Activity	International collaborations
Clinostat	706	1980s–present	University-level research.
RPM	946	2000s–present	Joint research projects (e.g., France, Germany, US, Japan) using shared protocols.
Drop Tower	1244	1990s–present	ZARM (Center for Applied Space Technology and Microgravity), Bremen, Germany.
Parabolic Flight	2071	1950s–present	ESA (European Space Agency), CNES (France), DLR (Germany), NASA (USA).
NBL	551	1960s–present	Major facilities (NASA NBL, ESA L-ROBE, China). Focus on astronaut training (ISS/Artemis).
GOS	29	2000s–present	ESA (Moon/Mars Laboratory at EAC, Germany), NASA (ARGOS).
Suborbital Flight	137	1960s–present	Blue Origin (New Shepard), Virgin Galactic (VSS Unity).
Acoustic Lev.	247	2010s–present	University-level research.
Magnetic Lev.	542	2010s–present	University-level research.
HDTBR	522	1970s–present	ESA, NASA, DLR, CNES, CSA (Canada), JAXA (Japan).

Note. “University-level research” refers to methods that do not require large partnerships for their maintenance or operation but are simple replicas that can be patented or replicated by university students and high school students.

Although Parabolic Flight and Drop Tower have a great impact, their accessibility is limited, which increases the use of technologies such as laboratory systems, which are versatile enough to be replicated in universities and schools, thereby increasing research through them. In addition, other alternatives are emerging that are more endorsed by institutions such as space agencies and private companies, such as NBL and HDTBR, solely for the training of their personnel. Therefore, we recognize that global access to high-fidelity microgravity platforms is part of global disparity; we hope that in the future there will be equity in the production and replication of these platforms to accelerate science-driven research.

True Microgravity methods (Drop Tower, Parabolic Flight, Suborbital Flight) offer high fidelity ($10^{-4} - 10^{-2}$ g) but are infeasible for emerging countries due to prohibitive costs (\$5,800–\$8,040/experiment), static infrastructure and limited time (seconds–minutes).

In contrast, effects simulation methods (RPM, magnetic/acoustic levitation) provide

functional microgravity ($10^{-4} - 10^{-1}$ g) at 200x lower costs (\$28–\$92), with continuous operation (hours–days) and mobile infrastructure. For Peru, prioritizing these techniques—validated by 789 combined publications (Fig. FIRST CIRCLE)—optimizes scarce resources, allows iterative experimentation (high repeatability) and facilitates global academic alliances. This democratizes spatial research, avoiding North–South technology gaps through scalable solutions.

4. Analysis of the Applications of Microgravity

Microgravity simulation technologies have proven essential for mission readiness, human physiology research, and technological development in space-like conditions. Their implementation ranges from highly controlled ground-based platforms to suborbital flights and orbital laboratories. Each technology offers specific advantages depending on the type of study, required duration, and experimental sensitivity, making them versatile tools across disciplines.

For astronaut training and hardware testing, parabolic flights (Selig et al., 2010), the Neutral Buoyancy Lab (NBL), and Gravity Offload Systems (GOS) (L. Li et al., 2020) are among the most widely used. Parabolic flights provide repeated short periods of microgravity, typically 21 to 22 seconds per parabola, which are suitable for testing posture control, movement, and equipment performance in space-like conditions (AirZeroG, 2018a, 2018b). For that, they are recommended for postgraduate researchers and professionals working in biomechanical or physiological studies, particularly when funding and aerospace collaboration are available. The NBL is specifically designed for astronaut training, hardware verification, and mission planning under simulated weightlessness using neutral buoyancy techniques (Jairala et al., 2012). While effective for astronaut training, this facility is best suited for agencies or university programs working directly with space missions. The Gravity Offload System (GOS), by contrast, uses a passive trolley and counterweight mechanism to simulate microgravity by offloading a subject's weight, enabling realistic deployment and mobility tests on Earth (Tanimoto et al., 2007). While some simplified GOS setups can be adapted for university research, full-scale systems like ARGOS are typically reserved for use by advanced laboratories or space agencies.

In scientific and medical research, technologies offering prolonged or small-scale simulation of microgravity are prominent. Clinostats (Rodríguez, 2020) and Random Positioning Machines (RPMs) (Pino Alfonso et al., 2006) allow long-term observation of cellular processes such as proliferation, cytoskeletal reorganization, and gene expression under near-zero gravity (Cao et al., 2023; Shi et al., 2012). Because of their low cost and accessibility, they are highly recommended for beginner-level researchers, including high school and early undergraduate students exploring space biology. On the other hand, technologies such as magnetic (Boudreaux et al., 2025) and acoustic levitation (Hammer et al., 2009) have enabled experiments in biotechnology (Dumy et al., 2020) and superconductor research (Wang et al., 2020) under simulated microgravity conditions. Therefore, these methods require specialized knowledge and are best applied by advanced students or research groups with strong physics or engineering backgrounds.

From a physiological standpoint, Head-Down Tilt Bed Rest (HDTBR) is a widely adopted model used by NASA and ESA to simulate the long-term effects of microgravity on the human body (Schmitt et al., 2000). Its implementation requires medical oversight, which suggests its use be limited to graduate-level researchers or medical institutions conducting controlled studies on cardiovascular deconditioning (Rabineau et al., 2022),

muscle loss, and countermeasures (Marusic et al., 2021). For real microgravity exposure over short durations, Suborbital Spaceflight Systems provide a unique opportunity. These flights are used to validate hardware (Ferl et al., 2023), study of acute physiological effects in humans (Kluge et al., 2013), and rapid genetic responses in plants (Ferl et al., 2023) within 3 to 4 minutes of actual weightlessness (Smith & Buckey, 2022). However, due to high launch costs and technical demands, this approach is generally limited to large institutions, space agencies, or commercial entities with specialized objectives. Finally, the International Space Station (ISS) remains the gold standard for long-duration microgravity research, supporting advances in tissue regeneration, space pharmacology, human health, and robotic systems (Melissa L. Gaskill, 2024). Access to the ISS is restricted to highly specialized missions and large-scale collaborations, making it the domain of governmental space agencies and multinational research programs.

5. General Limitations of Microgravity Simulators

Despite advances in microgravity simulation technologies, significant limitations remain that affect the validity and applicability of the results obtained. For a meaningful comparison between simulation platforms, these limitations require thorough evaluation.

One of the most pressing challenges lies in the discrepancy between simulated environments and the actual conditions aboard the ISS compared to ground-based technologies (Melissa L. Gaskill, 2024). While devices like drop towers can achieve microgravity levels close to 10^{-6} g (D'Angelo et al., 2022), their extremely short durations make them unsuitable for studying biological or physicochemical processes that require extended observation periods. On the other hand, more accessible devices such as clinostats and RPMs offer prolonged exposure to simulated microgravity, but volume limitations may restrict the types of experiments that can be performed (Nishimura, 2023). Although magnetic and acoustic levitation techniques can achieve favorable microgravity levels, they inherently introduce strong magnetic fields or sound waves (Tracy V. Wilson, 2023) that may interfere with sensitive samples, particularly in biological research; furthermore, they possess volume and size limitations (Liang et al., 2024), which restrict their general applicability.

Among large-scale simulators like parabolic flights, the Neutral Buoyancy Lab (NBL), and Gravity Offload Systems (GOS), another set of limitations arises. Parabolic flights are known for their short periods of microgravity, lasting only a few minutes (AirZeroG, 2018a, 2018b). The NBL, although excellent for astronaut training, fails to reproduce the physiological effects of weightlessness due to the properties of water. Meanwhile, GOS, a dynamic vertical body-weight support system, provides more precise gravitational simulation over longer periods; however, the mechanical stiffness and small oscillations introduced by its suspension mechanism can interfere with natural movement patterns, especially in locomotion and neuromuscular research.

Horizontal body-weight support systems like HDTBR (Head-Down Tilt Bed Rest) are widely used for long-duration studies. Still, they bring secondary effects associated with forced body posture, such as abnormal fluid redistribution and cardiovascular changes. While useful in simulating deconditioning effects, they do not accurately replicate real microgravity environments. Ultimately, Suborbital Spaceflight Systems provide actual microgravity conditions (10^{-4} to 10^{-5} g) for 3–4 minutes. However, their high costs, limited flight opportunities, and strong launch-phase vibrations significantly restrict their use to very specific and time-constrained experiments.

Finally, there are still problems with standardization between platforms and unequal

access to advanced technologies, which makes it difficult to compare results between laboratories and institutions globally. These limitations demonstrate that, although useful, ground-based simulators still require validation in real space environments.

6. Conclusions

The study sought to provide a detailed analysis of each of the methods presented, identifying the benefits of each, as well as their contribution to the scientific field and their importance in the areas in which they are most useful.

The 10 microgravity simulation methods studied show various strengths and limitations, with some similarities and differences between them. The study sought to identify an ideal or suitable method among them all that meets optimal characteristics in areas such as simulation time, simulation fidelity, cost, ease of use, and influence on research areas, among others. This set of characteristics ensures easy reproduction and implementation for all scientific fields. This exhaustive analysis has shown us that it is not possible to establish an ideal method and that even the fusion of these methods, which is left to future research, can generate amazing results that allow the aforementioned characteristics to be met.

The methods mentioned in the results show high potential in terms of fidelity, but time, cost, and ease of use are often limiting factors. Others also have medium levels of fidelity, with longer times and lower costs, but are limited by the capacity of their samples and the ability to move or manipulate them when exposed to this environment. Others, while not having high levels of microgravity simulation as such, are ideal for simulating the effects of this environment, allowing for sample mobility and large sample size, but are limited by their costs and the extensive complexity of their simulation environments.

Therefore, the use of a specific simulation method will be related to the nature, characteristics, and requirements of each research project, which means gaining in some aspects due to the benefits and potentialities and investing in other limiting aspects. However, this trade-off can be reduced and even eliminated with the development of methods that merge the aforementioned methods due to the similarities in their characteristics, development environments, and others.

Referencias

- AirZeroG. (2018a). *Airbus A310 Zero G: Gravity-free aircraft by Novespace*. AirZeroG. <https://www.airzerog.com/the-airbus-a310-zero-g/>
- AirZeroG. (2018b). *Técnica del vuelo parabólico de gravedad cero*. AirZeroG. <https://www.airzerog.com/es/tecnica-del-vuelo-parabolico-zero-g/>
- Berto, A., Azzolin, M., Lavieille, P., Glushchuk, A., Queeckers, P., Bortolin, S., Iorio, C. S., Miscevic, M., y Del Col, D. (2022). *Experimental investigation of liquid film thickness and heat transfer during condensation in microgravity*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 199, 123467. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123467>
- Borst, A. G., y Van Loon, J. J. W. A. (2009). *Technology and Developments for the Random Positioning Machine, RPM*. Microgravity Science and Technology, 21(4), 287–292. <https://doi.org/10.1007/s12217-008-9043-2>
- Borst, G. (2007). *(Space starts on Ground!)* (*Space starts on Ground!*). Van Loon.
- Boudreaux, T., Freyhof, L., Riehl, B. D., Kim, E., Pedrigi, R. M., y Lim, J. Y. (2025).

- Biological Acoustic Levitation and Its Potential Application for Microgravity Study*. Bioengineering, 12(5), 458. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12050458>
- Brauns, K. (2022). *Effect of head-down tilt bed rest on brain structure and function* (p. VI, 104) [Charité - Universitätsmedizin Berlin]. <https://doi.org/10.17169/REFUBIUM-34631>
- Brown, N. M., VanSaders, B., Kronenfeld, J. M., DeSimone, J. M., y Jaeger, H. M. (2024). *Direct measurement of forces in air-based acoustic levitation systems*. Review of Scientific Instruments, 95(9), 094901. <https://doi.org/10.1063/5.0225745>
- Cao, G., Concas, A., Orrù, R., Licheri, R., Sani, E., Dell'Oro, A., Fais, G., Manis, C., Manca, A., Uras, G., Caboni, P., Locci, A. M., Cincotti, A., Lai, N., Congiu, T., Faa, G., Pisu, M., Brelstaff, G., y Pantaleo, A. (2023). *Recent advances on ISRU technologies and study of microgravity impact on blood cells for deep space exploration*. Frontiers in Space Technologies, 4, 1146461. <https://doi.org/10.3389/frspt.2023.1146461>
- Clary, J. L., France, C. S., Lind, K., Shi, R., Alexander, J. S., Richards, J. T., Scott, R. S., Wang, J., Lu, X.-H., y Harrison, L. (2022). *Development of an inexpensive 3D clinostat and comparison with other microgravity simulators using Mycobacterium marinum*. Frontiers in Space Technologies, 3, 1032610. <https://doi.org/10.3389/frspt.2022.1032610>
- Cui, Y., Xiao, X., Dong, J., Zhang, Y., Qin, Y., Doughty, R. B., Wu, X., Liu, X., Joiner, J., y Moore, B. (2022). *Continued Increases of Gross Primary Production in Urban Areas during 2000–2016*. Journal of Remote Sensing, 2022, 2022/9868564. <https://doi.org/10.34133/2022/9868564>
- D'Angelo, O., Kuthe, F., Van Nieuwland, K., Ederveen Janssen, C., Voigtmann, T., y Jalaal, M. (2022). *Spreading of droplets under various gravitational accelerations*. Review of Scientific Instruments, 93(11), 115103. <https://doi.org/10.1063/5.0105624>
- DeMaio, N. (2021). *Development of a Converging-Channel Drop Tower For Sphere Symmetric Isolated Single Droplet Combustion*. Theses and Dissertations. <https://scholarcommons.sc.edu/etd/6672>
- Dumy, G., Jeger-Madiot, N., Benoit-Gonin, X., Mallouk, T. E., Hoyos, M., y Aider, J.-L. (2020). *Acoustic Manipulation of Dense Nanorods in Microgravity*. Microgravity Science and Technology, 32(6), 1159–1174. <https://doi.org/10.1007/s12217-020-09835-7>
- Duran Aquino, R. C., Cuba, K., Suarez Rios, S. S., Romero Milián, J., y Roman-Gonzalez, A. (2024). *Can Acoustic Levitation Simulate Microgravity in Fluids?*. IAF Microgravity Sciences and Processes Symposium, 316–325. <https://doi.org/10.52202/078356-0041>
- Edwards, M. (2019). *One Small Step ... Without Ever Leaving Bed—NASA*. <https://www.nasa.gov/humans-in-space/one-small-step-without-ever-leaving-bed/>
- ESA. (2016). *Los experimentos en vuelos parabólicos realizados por estudiantes finalizan con éxito*.
- Ezquerro, J. M., Salgado Sánchez, P., Bello, A., Rodríguez, J., Lapuerta, V., y Laveron-Simavilla, A. (2020). *Experimental evidence of thermocapillarity in phase change materials in microgravity: Measuring the effect of Marangoni convection in solid/liquid phase transitions*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 113, 104529. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104529>
- Ferl, R. J., Zhou, M., Strickland, H. F., Haveman, N. J., Callahan, J. B., Bandla, S.,

- Ambriz, D., y Paul, A.-L. (2023). *Transcriptomic dynamics in the transition from ground to space are revealed by Virgin Galactic human-tended suborbital spaceflight*. Npj Microgravity, 9(1), 95. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00340-w>
- Ferranti, F., Del Bianco, M., y Pacelli, C. (2020). *Advantages and Limitations of Current Microgravity Platforms for Space Biology Research*. Applied Sciences, 11(1), 68. <https://doi.org/10.3390/app11010068>
- Furukawa, S., Chatani, M., Higashitani, A., Higashibata, A., Kawano, F., Nikawa, T., Numaga-Tomita, T., Ogura, T., Sato, F., Sehara-Fujisawa, A., Shinohara, M., Shimazu, T., Takahashi, S., y Watanabe-Takano, H. (2021). *Findings from recent studies by the Japan Aerospace Exploration Agency examining musculoskeletal atrophy in space and on Earth*. Npj Microgravity, 7(1), 18. <https://doi.org/10.1038/s41526-021-00145-9>
- González Perea, E. J. (2015). *Diseño de Torre de Caída Libre para Sinterización mediante Descarga Eléctrica*. <http://hdl.handle.net/11441/33368>
- Hadidi, R., Pinckney, V. D., Shaw, S. A., Steinbock, O., y Dangi, B. B. (2025). *Unders-
tanding the Salt Crystallizations from Droplets under Various Gravity and Pressure
Environments: Display of the Marangoni Effect?*. The Journal of Physical Chemistry
B, 129(11), 3028–3040. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c06963>
- Hammer, B. E., Kidder, L. S., Williams, P. C., y Xu, W. W. (2009). *Magnetic Levitation
of MC3T3 Osteoblast Cells as a Ground-Based Simulation of Microgravity*. Micro-
gravity Science and Technology, 21(4), 311–318. <https://doi.org/10.1007/s12217-008-9092-6>
- Han, O., Kienholz, D., Janzen, P., y Kidney, S. (2010). *Gravity-Off-loading System for
Large-Displacement Ground Testing of Spacecraft Mechanisms*.
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20100021948>
- Harvey, A. D. (2020). *Partial gravity simulators, harness design, and an examination of
gait transitions in partial gravity* [Thesis, Massachusetts Institute of Technology].
<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/129195>
- Herranz, R., Anken, R., Boonstra, J., Braun, M., Christianen, P. C. M., De Geest,
M., Hauslage, J., Hilbig, R., Hill, R. J. A., Lebert, M., Medina, F. J., Vagt,
N., Ullrich, O., Van Loon, J. J. W. A., y Hemmersbach, R. (2013). *Ground-
Based Facilities for Simulation of Microgravity: Organism-Specific Recommenda-
tions for Their Use, and Recommended Terminology*. Astrobiology, 13(1), 1–17.
<https://doi.org/10.1089/ast.2012.0876>
- Heuser, A., Frings-Meuthen, P., Rittweger, J., y Galer, S. J. G. (2019). *Calcium Isotopes
in Human Urine as a Diagnostic Tool for Bone Loss: Additional Evidence for Time
Delays in Bone Response to Experimental Bed Rest*. Frontiers in Physiology, 10, 12.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00012>
- Jacobs, S. E., Di Capua, M., Husain, S.-A. A., Mirvis, A., y Akin, D. L. (2009). *Incorporating
Advanced Controls, Displays and other Smart Elements into Space Suit Design*. SAE
International Journal of Aerospace, 04(1), 374–384. <https://doi.org/10.4271/2009-01-2472>
- Jairala, J. C., Durkin, R., Marak, R. J., Sipila, S. A., Ney, Z. A., Parazynski, S. E., y
Thomason, A. H. (2012). *EVA Development and Verification Testing at NASA's
Neutral Buoyancy Laboratory*. American Inst. of Aeronautics and Astronautics,
Reston, VA, United States. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120006539>
- Jarvis, S. L., Rhodes, R., Vu, L. Q., Gupta, G., Benson, E., y Kim, K. H. (2022). *Develop-
ment of Argos offloading assessments and methodology for Lunar EVA simulations*.

- <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220018413>
- John Charles. (2016). *History of Underwater Simulation of Weightlessness for Extravehicular Activity (EVA) Training, Part 2*.
- John, U. (2021). *Building on a Mission: Neutral Buoyancy Facilities for Spacewalk Training - NASA*. <https://www.nasa.gov/history/building-on-a-mission-neutral-buoyancy-facilities-for-spacewalk-training/>
- Kim, H. Y., Kang, S., y Oh, S. H. (2024). *Neutral buoyancy as a simple approach to implement microgravity*. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5222802/v1>
- Kluge, G., Stern, C., Trammer, M., Chaudhuri, I., Tuschy, P., y Gerzer, R. (2013). *Commercial suborbital space tourism-proposal on passenger's medical selection*. Acta Astronautica, 92(2), 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.08.005>
- Knigge, S., Dogan, G., Deniz, E., Hanke, J., Merzah, A., Berliner, D., Kong, F., Heilmann, T., Schmack, B., Popov, A. F., Weymann, A., Bauersachs, J., Ruhparwar, A., y Schmitto, J. D. (2025). *Two Coupled Continuous-Flow Ventricular Assist Devices as a Novel BIVAD With One Driveline: Acute Animal Study Results*. Artificial Organs, 49(3), 525–531. <https://doi.org/10.1111/aor.14933>
- Krause, L., Braun, M., Hauslage, J., y Hemmersbach, R. (2018). *Analysis of Statoliths Displacement in Chara Rhizoids for Validating the Microgravity-Simulation Quality of Clinorotation Modes*. Microgravity Science and Technology, 30(3), 229–236. <https://doi.org/10.1007/s12217-017-9580-7>
- Larry K. Dunganl, Paul S. Valle, Derek R. Bankieris, Asher P. Lieberman, ee Redden, y Cecil Shy. (2015). *Active Response Gravity Offload* (Patent No. 9,194,977 B1). <https://patentimages.storage.googleapis.com/77/f2/66/a3069da6cc254b/US9194977.pdf>
- Li, J., Ye, Q., Ding, L., y Liao, Q. (2017). *Modeling and dynamic simulation of astronaut's upper limb motions considering counter torques generated by the space suit*. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 20(9), 929–940. <https://doi.org/10.1080/10255842.2017.1310850>
- Li, L., Gu, N., Dong, H., Li, B., y T. V. G., K. (2020). *Analysis of the effects of acoustic levitation to simulate the microgravity environment on the development of early zebrafish embryos*. RSC Advances, 10(72), 44593–44600. <https://doi.org/10.1039/D0RA07344J>
- Liang, L., Wang, Y., Pang, P., Liu, X., Yan, Z., y Deng, Z. (2024). *Levitation force measurement and characteristics analysis of double sided high temperature superconducting thin film device*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 589, 171630. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171630>
- Macaluso, T., Bourdin, C., Buloup, F., Mille, M.-L., Sainton, P., Sarlegna, F. R., Taillebot, V., Vercher, J.-L., Weiss, P., y Bringoux, L. (2016). *Kinematic features of whole-body reaching movements underwater: Neutral buoyancy effects*. Neuroscience, 327, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.04.014>
- Marusic, U., Narici, M., Simunic, B., Pisot, R., y Ritzmann, R. (2021). *Nonuniform loss of muscle strength and atrophy during bed rest: A systematic review*. Journal of Applied Physiology, 131(1), 194–206. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00363.2020>
- Melissa L. Gaskill. (2024). *Research in Microgravity: Higher, Faster, Longer—NASA*. <https://www.nasa.gov/missions/station/iss-research/station-science-101-research-in-microgravity-higher-faster-longer/>
- NASA. (2019). *A Series of Spacewalks Four Years in the Making Will Attempt to Revive a Scientific Experiment—NASA*. <https://www.nasa.gov/general/a-series-of-spacewalks-four-years-in-the-making-will-attempt-to-revive-a-scientific-experiment/>

- NASA Technology Transfer Program. (2021). *NASA's Random Positioning Machine Fixtures Webinar*. <https://technology.nasa.gov/virtual-event/nasas-random-positioning-machine-fixtures-webinar>
- Nishimura, Y. (2023). *Technology using simulated microgravity*. *Regenerative Therapy*, 24, 318–323. <https://doi.org/10.1016/j.reth.2023.08.001>
- Oluwafemi, F. A., y Neduncheran, A. (2022). *Analog and simulated microgravity platforms for life sciences research: Their individual capacities, benefits and limitations*. *Advances in Space Research*, 69(7), 2921–2929. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.01.007>
- Ong, J., Tarver, W., Brunstetter, T., Mader, T. H., Gibson, C. R., Mason, S. S., y Lee, A. (2023). *Spaceflight associated neuro-ocular syndrome: Proposed pathogenesis, terrestrial analogues, and emerging countermeasures*. *British Journal of Ophthalmology*, 107(7), 895–900. <https://doi.org/10.1136/bjo-2022-322892>
- Palma-Jiménez, M., Corrales Urena, Y., Villalobos, C., y Vega-Baudrit, J. (2017). *Microgravity and Nanomaterials*.
- Pino Alfonso, R. M., Sancho Vidal, L., y Maldonado Díaz, O. (2006). *Design of an experiment of bubble coalescence for the ESA Student Parabolic Flight Campaign*. <https://hdl.handle.net/2099.1/3838>
- Platts, S. H., Martin, D. S., Stenger, M. B., Perez, S. A., Ribeiro, L. C., Summers, R., y Meck, J. V. (2009). *Cardiovascular Adaptations to Long-Duration Head-Down Bed Rest*. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 80(5), A29–A36. <https://doi.org/10.3357/ASEM.BR03.2009>
- Prieto, M., Ravanbakhsh, A., Gutiérrez, Ó., Montalvo, A., Wimmer-Schweingruber, R. F., Mason, G., Cernuda, I., Espinosa Lara, F., Carrasco, A., Martín, C., Seimetz, L., Kulkarni, S. R., Panitzsch, L., Terasa, J.-C., Schuster, B., Yedla, M., Knierim, V., Böttcher, S. I., Boden, S., ... Rodríguez-Pacheco, J. (2021). *In-flight verification of the engineering design data for the Energetic Particle Detector on board the ESA/NASA Solar Orbiter*. *Acta Astronautica*, 187, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.06.007>
- Rabineau, J., Issertine, M., Hoffmann, F., Gerlach, D., Caiani, E. G., Haut, B., Van De Borne, P., Tank, J., y Migeotte, P.-F. (2022). *Cardiovascular deconditioning and impact of artificial gravity during 60-day head-down bed rest—Insights from 4D flow cardiac MRI*. *Frontiers in Physiology*, 13, 944587. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.944587>
- Raffel, J., Böhm, T., Düsing, J., Röhl, M., Schilde, C., Malshe, A. P., Overmeyer, L., y Lotz, C. (2024). *Ultrasonic Levitation as a Handling Tool for In-Space Manufacturing Processes*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 146(12), 121001. <https://doi.org/10.1115/1.4066335>
- Rodríguez, F. S. (2020). *Diseño de una máquina de microgravedad de tres grados de libertad*. <https://cris.utec.edu.pe/ws/portalfiles/portal/21807034/SantosRodríguezTesis.pdf>
- Schmitt, D. A., Schwarzenberg, M., Tkaczuk, J., Hebrard, S., Brandenberger, G., Maucó, G., Cogoli-Greuter, M., y Abbal, M. (2000). *Head-down tilt bed rest and immune responses*. *Pflügers Archiv*, 441(S1), R79–R84. <https://doi.org/10.1007/s004240000349>
- Schroeder, G. S., Clark, J. C., Gallagher, Dr. M., y Pandya, Dr. S. (2021). *Medical guidelines for suborbital commercial human spaceflight: A review*. *Acta Astronautica*, 187, 529–536. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.02.027>
- ScienceDirect. (2017). *Microgravity Environment—An overview* / *ScienceDirect Topics*.
- Selig, H., Dittus, H., y Lämmerzahl, C. (2010). *Drop Tower Microgravity Improvement Towards the Nano-g Level for the MICROSCOPE Payload Tests*. *Microgravity Science and Technology*, 22(4), 539–549. <https://doi.org/10.1007/s12217-010-9210-0>

- Shi, F., Wang, Y.-C., Zhao, T.-Z., Zhang, S., Du, T.-Y., Yang, C.-B., Li, Y.-H., y Sun, X.-Q. (2012). *Effects of Simulated Microgravity on Human Umbilical Vein Endothelial Cell Angiogenesis and Role of the PI3K-Akt-eNOS Signal Pathway*. PLoS ONE, 7(7), e40365. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040365>
- Smith, T. G., y Buckey, J. C. (2022). *Anaesthetists and aerospace medicine in a new era of human spaceflight*. Anaesthesia, 77(4), 384–388. <https://doi.org/10.1111/anae.15580>
- Takada, S., Kimura, N., Pietrowicz, S., Grunt, K., Murakami, M., y Okamura, T. (2018). *Visualization of He II boiling process under the microgravity condition for 4.7 s by using a drop tower experiment*. Cryogenics, 89, 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.10.004>
- Tanimoto, R., Moore, A., MacDonald, D., Thomas, S., Murray, A., Polanco, O., y Agnes, G. (2007). *Model and Test Validation of Gravity Offload System*. 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, Hawaii. <https://doi.org/10.2514/6.2007-1790>
- Tays, G. D., Hupfeld, K. E., McGregor, H. R., Beltran, N. E., Kofman, I. S., De Dios, Y. E., Mulder, E. R., Bloomberg, J. J., Mulavara, A. P., Wood, S. J., y Seidler, R. D. (2023). *Daily artificial gravity is associated with greater neural efficiency during sensorimotor adaptation*. Cerebral Cortex, 33(12), 8011–8023. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhad094>
- Tracy V. Wilson. (2023). *How Acoustic Levitation Works*. <https://science.howstuffworks.com/acoustic-levitation.htm>
- Vashi, A., Sreejith, K. R., y Nguyen, N.-T. (2022). *Lab-on-a-Chip Technologies for Microgravity Simulation and Space Applications*. Micromachines, 14(1), 116. <https://doi.org/10.3390/mi14010116>
- Vogt, G. L., Wargo, M. J., y Rosenberg, C. B. (1995). *Microgravity: Teacher's guide with activities for physical science*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950014905>
- Wang, S., Wu, N., Yang, D., y Zhu, Y. (2020). *Analysis of Suspension Characteristics of a New High-Temperature Superconducting Magnetic Levitation Bearing Based on Frozen-Image Model*. En M. Fei, K. Li, Z. Yang, Q. Niu, y X. Li (Eds.), Recent Featured Applications of Artificial Intelligence Methods. LSMS 2020 and ICSEE 2020 Workshops (Vol. 1303, pp. 225–235). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6378-6_17
- Wang, S., Zhang, N., Di, J., Zhao, W., Shi, G., Xie, R., Hu, B., y Yang, H. (2021). *Analysis of the effects of magnetic levitation to simulate microgravity environment on the Arp2/3 complex pathway in macrophage*. Journal of Biological Physics, 47(3), 323–335. <https://doi.org/10.1007/s10867-021-09581-w>
- Wuest, S. L., Richard, S., Kopp, S., Grimm, D., y Egli, M. (2015). *Simulated Microgravity: Critical Review on the Use of Random Positioning Machines for Mammalian Cell Culture*. BioMed Research International, 2015, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2015/971474>
- Xuesong, Q., Qianyuan, S., Zikang, S., Yuhang, L., y Bin, W. (2025). *Analysis of the magnetic levitation characteristics of the vertical Halbach array in a permanent magnet rotor*. Nonlinear Dynamics, 113(1), 397–412. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-10250-5>
- Yotov, V. V., Marovska, J., Turiyski, V., y Ivanov, S. I. (2022). *A New Random Positioning Machine Modification Applied for Microgravity Simulation in Laboratory Experiments with Rats*. Inventions, 7(3), 85. <https://doi.org/10.3390/inventions7030085>
- Zhang, Y., Richards, J. T., Hellein, J. L., Johnson, C. M., Woodall, J., Sorenson, T., Neelam,

S., Ruby, A. M. J., y Levine, H. G. (2022). *NASA's Ground-Based Microgravity Simulation Facility*. En E. B. Blancaflor (Ed.), *Plant Gravitropism* (Vol. 2368, pp. 281–299). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1677-2_18