

REVISTA CIENTÍFICA DE ASTROBIOLOGÍA

Volumen 1 | Número 1 | julio-diciembre 2024 | Lima (Perú) | ISSN: 3028-9866 (En línea)



ASPAST
Asociación Peruana de Astrobiología

Revista Científica de Astrobiología

Vol. 1 / N° 1 julio-diciembre, 2024

© 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.v1n1

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

Hongos en el espacio

Jehoshua Macedo-Bedoya^{1,2}

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

Flavia Anlas-Rosado²

<https://orcid.org/0009-0003-2129-6947>

Yakov Quinteros-Gómez²

<https://orcid.org/0000-0003-2049-5971>

¹Asociación Peruana de Astrobiología, Lima, Perú.

²Laboratorio de Ecología Tropical y Análisis de Datos, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú
Email: flavia.anlas@unmsm.edu.pe

Recibido: 27/09/2024 • Revisado: 20/10/2024 • Aceptado: 12/11/2024

Resumen

Este artículo explora la capacidad de adaptación y resistencia de los hongos en el espacio, subrayando su relevancia para la astrobiología y la sostenibilidad de misiones espaciales de larga duración. A través de una revisión bibliográfica de estudios publicados en bases de datos académicas de alto impacto como Google Scholar, PubMed, Scopus y Web of Science, se analizaron investigaciones sobre la resiliencia de estos organismos frente a condiciones extremas, incluyendo radiación, microgravedad y vacío espacial. Asimismo, se examina el potencial biotecnológico de los hongos para la producción de alimentos, medicamentos y materiales en entornos de recursos limitados y se identifican también riesgos significativos asociados a la biocontaminación y sus posibles efectos adversos sobre la salud de los astronautas, la integridad del equipo y la protección planetaria. En este contexto, se enfatiza la necesidad de desarrollar estrategias efectivas de control micológico y medidas de protección para mitigar estos riesgos en futuras misiones.

Palabras clave: Astrobiología, biotecnología, misiones espaciales, resiliencia fúngica.

Citar como:

Macedo-Bedoya, J., Anlas-Rosado, F., y Quinteros-Gómez, Y. (2024). Hongos en el espacio. *Revista Científica de Astrobiología*, 1(1), 1-17. <http://doi.org/10.69976/aspast.v1n1.2>

RESEARCH ARTICLE

Fungi in Space

Jehoshua Macedo-Bedoya^{1,2}

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

Flavia Anlas-Rosado²

<https://orcid.org/0009-0003-2129-6947>

Yakov Quinteros-Gómez²

<https://orcid.org/0000-0003-2049-5971>

¹Asociación Peruana de Astrobiología, Lima, Perú.

²Laboratorio de Ecología Tropical y Análisis de Datos, Facultad de Ciencias Biológicas,

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Email: flavia.anlas@unmsm.edu.pe

Received: 27/09/2024 • Reviewed: 20/10/2024 • Accepted: 12/11/2024

Abstract

This article explores the adaptive and resilient capacity of fungi in space, highlighting its relevance for astrobiology and the sustainability of long-term space missions. Through a bibliographic review of studies published in high-impact academic databases such as Google Scholar, PubMed, Scopus, and Web of Science, research was analyzed on the resilience of these organisms under extreme conditions, including radiation, microgravity, and the vacuum of space. Additionally, the biotechnological potential of fungi for the production of food, medicines, and materials in resource-limited environments is examined, along with significant risks associated with biocontamination and its possible adverse effects on astronaut health, equipment integrity, and planetary protection. In this context, the need for effective mycological control strategies and protective measures to mitigate these risks in future missions is emphasized.

Keywords: Astrobiology, biotechnology, fungal resilience, space missions.

Cite as:

Macedo-Bedoya, J., Anlas-Rosado, F., y Quinteros-Gómez, Y. (2024). Fungi in Space. *Revista Científica de Astrobiología*, 1(1), e2. <http://doi.org/10.69976/aspast.v1n1.2>

Introducción

A lo largo de la historia evolutiva del planeta Tierra, los hongos han desempeñado roles fundamentales en el mantenimiento del equilibrio y la funcionalidad de los ecosistemas (Grossart et al., 2019), siendo vitales en procesos como la descomposición de materia orgánica (Tunlid et al., 2022), el reciclaje de nutrientes (Netherway et al., 2021) y la simbiosis con otros organismos (Bahram & Netherway, 2021; Aban, 2024). Su capacidad de adaptación a diversos entornos ha permitido su supervivencia en una amplia variedad de hábitats, siendo las condiciones de elevada humedad relativa las más favorables para su crecimiento (Pasanen et al., 1991; Sokolová & Ryparová, 2019; Zhan et al., 2021; Chen et al., 2023), hasta los más extremos, como los desiertos polares (Shiryaev et al., 2018; de Menezes et al., 2021), los suelos volcánicos (Wang & Pecoraro, 2021; Zhang et al., 2024) y las profundidades oceánicas (Pernice et al., 2024). No obstante, en las últimas décadas, el interés por estos organismos ha trascendido los límites terrestres, ya que los avances en la exploración espacial han revelado su notable resiliencia en condiciones del espacio exterior, de este modo, ha suscitado un creciente interés en el campo de la astrobiología (Deshevaya et al., 2024).

La expansión de la exploración espacial, especialmente desde la creación de la Estación Espacial Internacional (International Space Station, ISS) en 1998 (Evans et al., 2009), dirigida por la NASA en colaboración con la Agencia Espacial Federal Rusa (ROSCOSMOS) y demás agencias internacionales, ha abierto nuevas líneas de investigación orientadas a comprender las respuestas moleculares de organismos animales (Tavella et al., 2012; McDonald et al., 2020), vegetales (Kittang et al., 2014; Baba et al., 2022) y microbianos (Benoit et al., 2006; Zea et al., 2016; Blachowicz et al., 2021) para sobrevivir en condiciones extremas del espacio. Entre estos organismos, los hongos han demostrado una extraordinaria resistencia a factores como la radiación cósmica, la microgravedad y el vacío del espacio (Ponizovskaya et al., 2017; Wösten et al., 2018; Tesei et al., 2021). En este contexto, los hongos despiertan interés por su notable resistencia a las duras condiciones del espacio y su considerable potencial biotecnológico (Gomoiu et al., 2016).

Estos organismos presentan una amplia gama de propiedades que los posicionan como candidatos idóneos para contribuir a la sostenibilidad de misiones espaciales de larga duración. Entre sus capacidades se encuentran la producción de antibióticos y compuestos bioactivos (Guzmán-Chávez et al., 2018), generación de alimentos (Derbyshire et al., 2023), y materiales de construcción (Wösten et al., 2018) que contribuirían a reducir la dependencia de los insumos terrestres y facilitar la autosuficiencia en futuras colonias espaciales. A pesar de estos beneficios potenciales, la presencia de hongos en ambientes espaciales también plantea serios desafíos en términos de biocontaminación (Makimura et al., 2011). Los riesgos para la salud de los astronautas y la posible colonización de superficies críticas dentro de naves espaciales y estaciones orbitales deben ser cuidadosamente considerados (Hupka et al., 2023). Asimismo, la posibilidad de contaminar otros cuerpos celestes, como Marte, genera inquietud sobre la introducción de especies terrestres en ecosistemas extraterrestres (Cortês et al., 2021), lo que podría comprometer tanto la exploración científica como la habitabilidad futura. Este artículo tiene como objetivo proporcionar una revisión sobre los hongos en el espacio, analizando su capacidad de adaptación a condiciones espaciales, su impacto en la salud humana y su potencial biotecnológico, además de discutir los riesgos asociados a su presencia en misiones espaciales.

Metodología

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva sobre los hongos en el espacio utilizando bases de datos académicas como Google Scholar, PubMed, Scopus y Web of Science. Para la identificación de artículos científicos, revisiones y otros documentos relevantes, se emplearon términos de búsqueda específicos, tales como “hongos espaciales”, “adaptación fúngica” y “biotecnología espacial”. Se dio preferencia a las publicaciones en revistas de alto impacto y revisadas por pares. Los artículos seleccionados fueron analizados y sus datos sintetizados en un formato coherente y estructurado para la redacción del manuscrito. Adicionalmente, se definieron criterios de inclusión y exclusión para la selección de los documentos revisados. Aquellos artículos que no cumplían con los requisitos de relevancia temática o calidad metodológica fueron excluidos del análisis.

Diversidad de hongos

La diversidad fúngica en el espacio ha despertado un creciente interés en la comunidad científica debido a la notable capacidad de ciertos hongos para sobrevivir en los entornos extremadamente hostiles, como los experimentados fuera de la Tierra. En particular, la Estación Espacial Internacional (ISS) (Figura 1) ha sido el escenario de diversos estudios, en los cuales se han identificado géneros como *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Cryptococcus*, *Hyphomycetes*, *Penicillium* y *Rhodotorula* formando biopelículas (Pierson et al., 2012; Nunes et al., 2013; Satoh et al., 2016) y muestran una resistencia extraordinaria frente a condiciones adversas y se mantienen estables a lo largo del tiempo sin diferencias temporales (Chęcinska et al., 2019).

Se han realizado diferentes investigaciones en las que se evalúa la resistencia de las esporas en condiciones similares a las que se encontrarían en Marte (Cortês, 2022). Un caso ejemplar es el de *Aspergillus niger*, cuyas esporas fueron sometidas a pruebas en la estratósfera, simulando las condiciones atmosféricas marcianas. En estos experimentos, se observó una notable resistencia de las esporas a la radiación, destacando la capacidad de estos organismos para sobrevivir en el espacio exterior (Cortês et al., 2021). Del mismo modo, las cepas de *Penicillium* sp. y *Cladosporium* sp. encontradas en el ISS presentan características similares a las de sus cepas terrestres, sugiriendo que mantienen su viabilidad y capacidad de adaptación en el espacio (Satoh et al., 2016), desempeñando funciones metabólicas vitales incluso en entornos extraterrestres.

Entre los hongos que han demostrado una mayor capacidad de supervivencia en el espacio se encuentra *Aureobasidium pullulans*, que mostró una notable capacidad de supervivencia, con una mayor resistencia a la radiación tras una exposición prolongada (Deshevaya et al., 2024). Además, estudios de *Cryptococcus neoformans*, *Wangiella dermatitidis* y *Cladosporium sphaerospermum* (Figura 2), revelaron que la radiación ionizante modifica las propiedades electrónicas de estos organismos, mejorando su crecimiento bajo estas condiciones (Dadachova et al., 2017). En particular, se ha descubierto que *Wangiella dermatitidis*, una levadura negra melanizada, sobrevive a la radiación ionizante y podría beneficiarse de ella, adaptándose para crecer más eficientemente en su presencia (Onofri et al., 2015). En esta línea, *Knufia chersonesos*, un hongo negro poliextremotolerante que habita en rocas, fue expuesto a microgravedad simulada. Tanto la cepa melanizada (Wt) como su mutante no melanizado (Mut) fueron sometidas a esta prueba, y los resultados mostraron que la capacidad de supervivencia de ambas no se vio afectada negativamente, subrayando la adaptabilidad de este hongo en condiciones de microgravedad (Tesei et al.,

2021).

La viabilidad de las esporas de otras especies, como *A. niger*, *Cladosporium herbarum*, *Ulocladium chartarum* y *Basipetospora halophila*, también ha sido confirmada en misiones espaciales tanto a corto como a largo plazo. Las investigaciones llevadas a cabo por Gomoiu et al. (2016) demostraron que estos hongos, no solo sobreviven en condiciones adversas, sino que, adicionalmente a lo que se esperaría, mantienen su capacidad de supervivencia y reproducción bajo condiciones espaciales, por ende, subraya la notable resiliencia de estos microorganismos. Un caso particularmente relevante, es el del hongo *Trichoderma longibrachiatum*, cuyas esporas lograron mantener una viabilidad cercana al 30% después de haber estado expuestas a condiciones de vacío espacial durante casi dos años (Neuberger et al., 2015). Este hallazgo significativo, sugiere el potencial de ciertos hongos para sobrevivir en ambientes extraterrestres a largo plazo que podrían tener aplicaciones prácticas en futuras misiones espaciales, ya sea como agentes biológicos para la bioremediación o como recursos en la producción de biomateriales.

La capacidad de tolerancia de los hongos también ha sido documentada en especies extremófilas, como el *Cryomyces antarcticus*, una especie de hongo antártico que mostró una extraordinaria resistencia en experimentos de exposición a condiciones espaciales (Pacelli et al., 2016). Después de permanecer en órbita terrestre baja durante un año y medio, este hongo solo mostró daños estructurales y moleculares menores (Onofri et al., 2018). Estas observaciones permiten explorar el potencial de los hongos para sobrevivir y adaptarse a entornos extraterrestres, caracterizados por condiciones extremas de vacío y radiación.

Figura 1

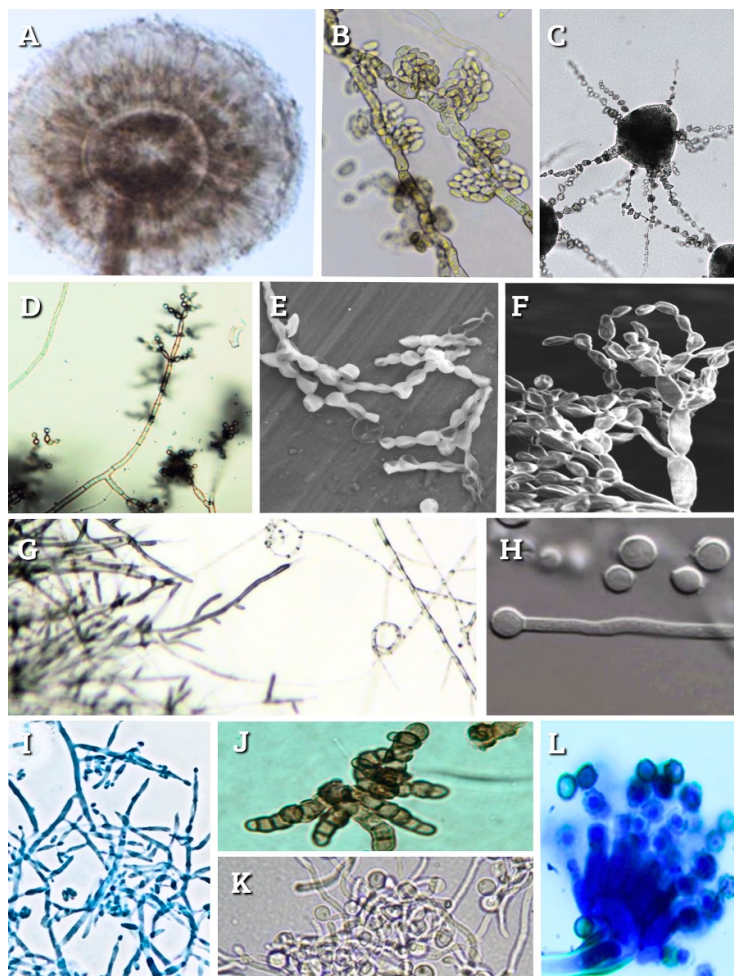


Nota. Imagen de la Estación Espacial Internacional (ISS), fotografiada por uno de los miembros de la tripulación de la misión STS-105 desde el transbordador Discovery después de separarse de la ISS (Créditos: Nasa).

Sin embargo, estudios recientes revelan que la diversidad fúngica en la ISS es menor en comparación con la de la Tierra. Se han identificado 102 unidades taxonómicas operativas (OTUs) en el polvo de la ISS, en contraste con las 465 presentes en el suelo terrestre

(Nastasi et al., 2024). Esta menor diversidad podría estar relacionada con las limitaciones ambientales y la selección natural que ocurre en el espacio (Prasad et al., 2021), donde solo los organismos más resistentes logran persistir (Sánchez et al., 2010).

Figura 2



Nota. (A) *Aspergillus niger* (Extraído de Senawong et al., 2014), B) *Aureobasidium pullulans* (Extraído de Owczarek-Kościelniak et al., 2016), C) *Wangiella dermatitidis* (Extraído de Kirchhoff et al., 2019), D) *Cladosporium sphaerospermum* (Extraído de Zalar et al. 2007), E) *Knufia chersonesos* (Extraído de Tesei et al., 2021), F) *Cladosporium herbarum* (Extraído de Abdrassulova et al., 2022), G) *Ulocladium chartarum* (Extraído de Gomoiu et al., 2013), H) *Basipetospora halophila* (Extraído de Tanney et al., 2017), I) *Trichoderma longibrachiatum* (Extraído de Recio et al., 2019), J) *Cryomyces antarcticus* (Extraído de Onofri et al., 2018), K) *Candida albicans* (Extraído de Marcias-Paz et al., 2023), L) *Aspergillus brasiliensis* (Extraído de Martirena-Ramírez et al., 2024).

Aplicaciones biotecnológicas

El cultivo de hongos en el espacio representa una posibilidad intrigante en el campo de la biotecnología espacial (Dublin & Volz, 1973), ya que las complejas estructuras celulares de los hongos (hifas y esporas altamente resistentes) podrían aprovecharse para diversas

aplicaciones (Cortese et al., 2020) como la producción de polímeros, que resulta particularmente valioso en el contexto espacial donde la gestión de recursos y residuos es crítica (Greetham et al., 2014). Contrario a la percepción tradicional que los limita a simples patógenos o agentes de deterioro de alimentos, los hongos presentan un potencial significativo en el campo de la bioproducción espacial (Seppälä et al., 2017). Estudios recientes han demostrado que diversas especies fúngicas pueden mantener su viabilidad y funcionalidad en condiciones de microgravedad y radiación elevada (Tesei et al., 2021). Esta resistencia abre nuevas oportunidades para la biotecnología aplicada a misiones espaciales, permitiendo la producción de compuestos útiles in situ.

Los hongos son considerados ingredientes esenciales en la dieta espacial (Kovalev et al., 2022) por sus múltiples beneficios nutricionales y versatilidad en entornos controlados (Satyaveer & Rajanna, 2022; Wösten et al., 2018; Checinska et al., 2019). Entre sus propiedades más destacadas se encuentra su capacidad para ser una fuente natural de vitamina D, comparable a los alimentos de origen animal, convirtiéndolos en una alternativa viable en condiciones donde la producción de dichos alimentos es limitada o inviable (Cardwell et al., 2018). Además de esta capacidad, son ricos en proteínas, fibra y antioxidantes (Mwangi et al., 2022), otorgándoles un perfil nutricional completo para ser cultivados en el espacio; su consumo también contribuye a la neutralización de radicales libres (Sanchez, 2017), lo que es beneficioso para la salud de los astronautas en misiones prolongadas.

Otra aspecto relevante es que los hongos pueden ser cultivados en sustratos de desechos vegetales, optimizando el uso de recursos en el espacio, donde la eficiencia y sostenibilidad son primordiales (Grimm & Wösten, 2018). Esta capacidad de cultivo en Sistemas de Soporte Vital Bioregenerativos (*Bioregenerative Life Support Systems* [BLSS]) permite que los hongos reciclen residuos orgánicos, creando un ciclo de producción de alimentos autosostenible (Kovalev et al., 2022). En particular, la especie *Pleurotus ostreatus* ha sido propuesta como una opción prometedora dentro de estos sistemas, aunque su viabilidad depende de la disponibilidad de materias primas adecuadas, como el trigo y la paja de arroz, para su cultivo (Yang et al., 2013; Manukovsky et al., 2023).

Los hongos también pueden emplearse en la síntesis de antibióticos y otros compuestos esenciales (Khan et al., 2014), esto podría ser especialmente útil durante misiones espaciales de larga duración (Satoh et al., 2016). Dado que la generación de recursos in situ constituye un aspecto fundamental para garantizar la viabilidad de futuras misiones fuera de la Tierra (Lange, 2014), los hongos podrían desempeñar un rol clave en la sostenibilidad de estos asentamientos (Winder, 2024; Koehle et al., 2023). Además de su capacidad para generar productos farmacéuticos (Glamočlija & Soković, 2017), los hongos presentan versatilidad metabólica (Takahashi et al., 2020), que junto con su habilidad para crecer en diversos sustratos (Cook et al., 2022; de Oliveira et al., 2022), los posiciona como organismos clave en el desarrollo de procesos biotecnológicos eficientes y sostenibles.

El ciclo de vida y la adaptabilidad de los hongos a diversas condiciones ambientales los hacen idóneos para integrarse en sistemas de producción continua reduciendo la dependencia de insumos externos y minimizando el impacto ambiental (Pilafidis et al., 2022; Kržišnik & Gonçalves, 2023). Esta adaptabilidad convierte a los hongos en organismos altamente valiosos para las misiones interplanetarias, donde la autosuficiencia y el uso eficiente de los recursos son esenciales para el éxito a largo plazo (Gomoiu et al., 2016). Su capacidad para descomponer materiales orgánicos complejos en compuestos más simples podría facilitar el reciclaje de nutrientes (Günyar & Uztan, 2021), asegurando que los colonos tengan un suministro continuo de recursos esenciales (Kaur & Verma, 2021).

Problemáticas y riesgos

La supervivencia de los hongos en el espacio, aunque ofrece prometedoras oportunidades para la astrobiología (Onofri et al., 2009), plantea serios desafíos en términos de protección planetaria y la seguridad de las misiones espaciales (Sychev et al., 2020). La notable resiliencia de ciertos hongos sugiere que podrían sobrevivir al proceso de transporte interplanetario (Cortês et al., 2020; Chander et al., 2022), lo cual genera preocupación sobre el riesgo de biocontaminación en Marte (Figura 3) y otros cuerpos celestes (Cortês et al., 2021) siendo necesario implementar estrategias rigurosas para evitar la contaminación cruzada durante las misiones espaciales tripuladas (Cortês et al., 2021).

En las estaciones espaciales como ISS y el Módulo Experimental Japonés (JEM), la biota fúngica es monitoreada de manera constante, este seguimiento es crucial debido a que evalúa los posibles riesgos a la salud de los astronautas (Urbaniak et al., 2022; Satoh et al., 2021), además de proteger el equipo de vuelo y los sistemas técnicos de la acción de microorganismos potencialmente peligrosos (Zhang et al., 2023). Sin embargo, el microbioma bacteriano y fúngico interior tiene una influencia creciente en la salud de los astronautas debido a la alteración inmunológica que sufren durante los vuelos espaciales (Mermel, 2013). Sin embargo, correlacionar patógenos oportunistas viables con la salud de los miembros de la tripulación plantea desafíos, debido a que la alta rotación en la ISS y datos no públicos de los tripulantes dificultan la identificación de tendencias estadísticas que vinculen la salud con los microbiomas espaciales (Chęcinska et al., 2019). Este vacío de información añade incertidumbre en la evaluación precisa del impacto que estos patógenos podrían tener en la salud de los tripulantes.

Figura 3



Nota. Hongos en el suelo marciano: Se ilustra una posible adaptación de los hongos a las condiciones extremas de Marte (Imagen generada por IA).

En este sentido, la investigación de Makimura et al. (2011) subraya que la actividad fúngica en entornos cerrados y de microgravedad podría comprometer la salud humana como la integridad del equipo técnico. Aunque hongos como *Penicillium* sp. y *Aspergillus* sp. no suelen ser patógenos en personas sanas, la exposición a grandes cantidades de sus

esporas puede representar un peligro en individuos inmunocomprometidos debido a infecciones oportunistas en ambientes confinados (Mousavi et al., 2016). En consecuencia, la exposición prolongada a estos microorganismos puede afectar a los tripulantes al aumentar el riesgo de infecciones graves en el entorno espacial, donde los tratamientos médicos son limitados.

En el caso de hongos patógenos específicos, como *A. niger* y *Candida albicans*, se ha observado que son capaces de crecer en condiciones de microgravedad sin mostrar alteraciones significativas en su morfología ni en su susceptibilidad a tratamientos antifúngicos. Esto significa que, en cuanto a su patogenicidad, los riesgos que estos hongos suponen para los astronautas en el espacio son comparables a los que presentan en la Tierra, según lo señalado por Yamazaki et al. (2012). Específicamente, *A. niger* ha destacado como una especie fúngica que puede prosperar en ambientes espaciales gracias a su capacidad para utilizar materiales orgánicos presentes en las estaciones espaciales como sustrato de crecimiento, produciendo una amplia variedad de compuestos bioactivos, los cuales, les otorgan ventajas adaptativas en ambientes hostiles y podrían ser capaces de interactuar con el ambiente de la nave, afectando los materiales y posiblemente induciendo efectos no deseados en la salud humana (Checinska et al., 2015). A raíz de esto, las condiciones espaciales, como la microgravedad, pueden afectar negativamente la función inmunológica de los astronautas, los hongos oportunistas podrían convertirse en una amenaza considerable si no se toman precauciones adecuadas, agravando aún más los riesgos asociados con la exposición a este tipo de patógenos (Devarayan et al., 2015).

Además de los riesgos para la salud humana, los hongos presentan desafíos técnicos considerables en el mantenimiento de la infraestructura espacial. Un ejemplo preocupante es el caso de *Aspergillus brasiliensis*, que es capaz de provocar corrosión en circuitos de cobre mediante la producción de ácidos orgánicos como mecanismo de defensa contra la toxicidad de los metales, situación que acelera la degradación de los materiales (Liu et al., 2024).

En conjunto, estos hallazgos subrayan la importancia de continuar con la vigilancia microbiológica en el espacio (Yamaguchi et al., 2014), con el objetivo de minimizar los riesgos asociados con la biocontaminación y preservar la salud y seguridad de las tripulaciones en futuras misiones de larga duración. Al mismo tiempo, será necesario desarrollar estrategias de protección planetaria que impidan la introducción accidental de microorganismos terrestres en otros planetas, evitando así la alteración de posibles ecosistemas o la contaminación de futuros hábitats humanos en cuerpos celestes como Marte.

Consideraciones finales

Los hongos en el espacio presentan un notable interés debido a su capacidad de adaptación a condiciones extremas como la radiación, el vacío y la microgravedad, lo que los convierte en organismos modelo para la astrobiología y en potenciales aliados en la sostenibilidad de misiones espaciales de larga duración. Su utilidad biotecnológica en la producción de alimentos, medicamentos y materiales puede reducir la dependencia de recursos terrestres en futuras colonias espaciales. No obstante, su presencia también plantea riesgos significativos, como la biocontaminación, que podría afectar la salud de los astronautas y comprometer los equipos en ambientes cerrados, además de la posibilidad de contaminación en otros cuerpos celestes como Marte, lo que subraya la importancia de desarrollar estrategias de control microbiológico y protección planetaria.

Conflictos de interés

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

Agradecimientos

Expresamos nuestro profundo agradecimiento a Alexandra Elbakyan por su valiosa contribución al acceso libre del conocimiento científico a través de la plataforma Sci-Hub, lo cual ha facilitado la consulta y análisis de los artículos científicos que sustentan este trabajo.

Referencias

- Aban, J. L. (2024). Symbiotic fungal biodiversity, structure, role and benefits to their host plants-discovering microbes with potential agricultural significance: A literature probe. *International Journal of Biosciences*, 24(3), 163-174. <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/24.3.163-174>
- Abdrassulova, Z. T., Salybekova, N. N., Childibayev, J. B., Kurmanbaeva, M. S., Ramazanova, A. A., & Bazargaliyeva, A. A. (2016). Biological and Ecological Features of the Fungus *Cladosporium Herbarum*. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 7(1), 2075-2083.
- Baba, A. I., Mir, M. Y., Riyazuddin, R., Cséplő, Á., Rigó, G., & Fehér, A. (2022). Plants in Microgravity: Molecular and Technological Perspectives. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(18), 10548. <https://doi.org/10.3390/ijms231810548>
- Bahram, M., & Netherway, T. (2022). Fungi as mediators linking organisms and ecosystems. *FEMS microbiology reviews*, 46(2), fuab058. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuab058>
- Benoit, M. R., Li, W., Stodieck, L. S., Lam, K. S., Winther, C. L., Roane, T. M., & Klaus, D. M. (2006). Microbial antibiotic production aboard the international Space Station. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 70, 403–411. <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0098-3>
- Blachowicz, A., Singh, N. K., Wood, J. M., Debieu, M., O'Hara, N. B., Mason, C. E., & Venkateswaran, K. (2021). Draft Genome Sequences of *Aspergillus* and *Penicillium* Species Isolated from the International Space Station and Crew Resupply Vehicle Capsule. *Microbiology Resource Announcements*, 10(13), e01398-20. <https://doi.org/10.1128/MRA.01398-20>
- Cardwell, G., Bornman, J. F., James, A. P., & Black, L. J. (2018). A Review of Mushrooms as a Potential Source of Dietary Vitamin D. *Nutrients*, 10(10), 1498. <https://doi.org/10.3390/nu10101498>
- Chander, A. M., Teixeira, M. D. M., Singh, N. K., Williams, M. P., Simpson, A. C., Damle, N., Parker, C. W., Stajich, J. E., Mason, C. E., Torok, T., & Venkateswaran, K. (2022). Description and genome characterization of three novel fungal strains isolated from Mars 2020 mission-associated spacecraft assembly facility surfaces—recommendations for two new genera and one species. *Journal of Fungi*, 9(1), 31. <https://doi.org/10.3390/jof9010031>
- Checinska, A., Urbaniak, C., Malli, G. B., Stepanov, V. G., Tran, Q., Wood, J. M., Minich, J., McDonald, D., Mayer, T., Knight, R., Karouia, F., Fox, G. E., & Venkateswaran, K. (2019). Characterization of the total and viable bacterial and

- fungus communities associated with the International Space Station surfaces. *Microbiome*, 7(50), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0666-x>
- Chen, X., Wang, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Shen, Y., He, X., & Xiao, C. (2023). A Natural Moisture Gradient Affects Soil Fungal Communities on the South Shore of Hulun Lake, Inner Mongolia, China. *Journal of fungi (Basel, Switzerland)*, 9(5), 549. <https://doi.org/10.3390/jof9050549>
- Cook, K., Sharma, J., Taylor, A. D., Herriott, I., & Taylor, D. L. (2022). Epiphytic fungal communities vary by substrate type and at submetre spatial scales. *Molecular Ecology*, 31(6), 1879-1891. <https://doi.org/10.1111/mec.16358>
- Cortês, M. F. (2022). *Morphological and molecular adaptation of Aspergillus niger to simulated spaceflight and Mars-like conditions*. [Thesis]. University Goettingen Repository, Alemanha.
- Cortês, M., Schütze, T., Marx, R., Moeller, R., & Meyer, V. (2020). *Fungal Biotechnology in Space: Why and How?* En H. Nevalainen (Eds.), *Grand Challenges in Fungal Biotechnology* (pp. 501-535). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29541-7_18
- Cortês, M., Siems, K., Koch, S., Beblo-Vranesevic, K., Rabbow, E., Berger, T., Lane, M., James, L., Johnson, P., Waters, S. M., Verma, S. D., Smith, D. J., & Moeller, R. (2021). MARSBOX: fungal and bacterial endurance from a balloon-flown analog mission in the stratosphere. *Frontiers in microbiology*, 12, 601713. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.601713>
- de Menezes, G. C. A., Câmara, P. E., Pinto, O. H. B., Carvalho-Silva, M., Oliveira, F. S., Souza, C. D., Reynaud, C. E. Rosa, L. H. (2021). Fungal diversity present on rocks from a polar desert in continental Antarctica assessed using DNA metabarcoding. *Extremophiles*, 25, 193-202. <https://doi.org/10.1007/s00792-021-01221-4>
- de Oliveira, V. B., de Souza, A. F., Lins, U. M. D. B. L., da Silva Andrade, R. F., de Campos-Takaki, G. M., & de Lima, M. A. B. (2022). Antimicrobial potential of filamentous fungi growing on renewable substrates. *Research, Society and Development*, 11(11), e570111133958. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33958>
- Derbyshire, E. J., Theobald, H., Wall, B. T., & Stephens, F. (2023). Food for our future: the nutritional science behind the sustainable fungal protein – mycoprotein. A symposium review. *Journal of Nutritional Science*, 11(12), e44. <https://doi.org/10.1017/jns.2023.29>
- Deshevaya, E. A., Fialkina, S. V., Shubralova, E. V., Tsygankov, O. S., Khamidullina, N. M., Vasilyak, L. M., Pecherkin, V. Y., Shcherbakova, V. A., Nosovsky, A. M., & Orlov, O. I. (2024). Survival of microorganisms during two-year exposure in outer space near the ISS. *Scientific Reports*, 14(1), 334. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49525-z>
- Devarayan, K., Sathishkumar, Y., Lee, Y. S., & Kim, B. S. (2015). Effect of microgravity on fungistatic activity of an α -aminophosphonate chitosan derivative against aspergillus niger. *PloS One*, 10(10), e0139303. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139303>
- Dublin, M., & Volz, P. A. (1973). Space related research in mycology concurrent with the first decade of manned space exploration. *Space Life Sciences*, 4, 223-230. <https://doi.org/10.1007/BF00924469>
- Evans, C. A., Robinson, J. A., & Tate-Brown, J. M. (2009). Research on the International Space Station: An Overview. En *Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando*, 5–9. <https://doi.org/10.2514/6.2009-186>

- Glamočlija, J., & Soković, M. (2017). Fungi a source with huge potential for “mushroom pharmaceuticals”. *Lekovite Sirovine*, 37, 50-56
<https://doi.org/10.5937/LEKSIR1737050G>
- Gomoiu, I., Chatzitheodoridis, E., Vadrucci, S., & Walther, I. (2013). The Effect of Spaceflight on Growth of *Ulocladium chartarum* Colonies on the International Space Station. *PloS One*, 8(4), e62130.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062130>
- Gomoiu, I., Chatzitheodoridis, E., Vadrucci, S., Walther, I., & Cojoc, R. (2016). Fungal spores viability on the International Space Station. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 46(4), 403-418. <https://doi.org/10.1007/s11084-016-9502-5>
- Greetham, L., McIntyre, G., Bayer, E., Winiski, J., & Araldi, S. (2014). *Mycological Biopolymers Grown in Void Space Tooling*.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/5b/8d/88/06f5660ba6a1e1/US11277979.pdf>
- Grimm, D., & Wösten, H. A. B. (2018). Mushroom cultivation in the circular economy. *Appl Microbiol Biotechnol*, 102, 7795–7803.
<https://doi.org/10.1007/s00253-018-9226-8>
- Grossart, H. P., Van den Wyngaert, S., Kagami, M., Wurzbacher, C., Cunliffe, M., & Rojas-Jimenez, K. (2019). Fungi in aquatic ecosystems. *Nature Reviews Microbiology*, 17, 339–54. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0175-8>
- Günyar, Ö. A., & Uztan, A. H. (2021). Environmental Mycobiototechnology in Special Reference to Fungal Bioremediation. En: N. Saglam, F. Korkusuz & R. Prasad (Eds.), *Nanotechnology Applications in Health and Environmental Sciences. Nanotechnology in the Life Sciences* (pp. 361-383), Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-64410-9_20
- Guzmán-Chávez, F., Zwahlen, R. D., Bovenberg, R. A. L., & Driessen, A. J. M. (2018). Engineering of the Filamentous Fungus *Penicillium chrysogenum* as Cell Factory for Natural Products. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2768.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02768>
- Hupka, M., Kedia, R., Schauer, R., Shepard, B., Granados-Presa, M., Vande, M., & Flores, P. (2023). Morphology of *Penicillium rubens* Biofilms Formed in Space. *Life*, 13(4), 1001. <https://doi.org/10.3390/life13041001>
- Kaur, K., & Verma, R. K. (2021). *Fungal resources: Current utilization, future prospects, and challenges*. En: J. Singh & P. Gehlot (Eds.), *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 15-38).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821005-5.00002-8>
- Khan, A. A., Khan, A. A., Bacha, N., Ahmad, B., Lutfullah, G., Farooq, U., & Cox, R. J. (2014). Fungi as chemical industries and genetic engineering for the production of biologically active secondary metabolites. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 4(11), 859-870.
<https://doi.org/10.12980/APJTB.4.2014APJTB-2014-0230>
- Kirchhoff, L., Olsowski, M., Rath, P. M., & Steinmann, J. (2019). *Exophiala dermatitidis*: Key issues of an opportunistic fungal pathogen. *Virulence*, 10(1), 984–998. <https://doi.org/10.1080/21505594.2019.1596504>
- Kittang, A.-I., Iversen, T.-H., Fossum, K. R., Mazars, C., Carnero-Diaz, E., Boucheron-Dubuisson, E., Le Disquet, I., Legué, V., Herranz, R., Pereda-Loth, V., & Medina, F. J. (2014). Exploration of plant growth and development using the European modular cultivation system facility on the international Space Station. *Plant Biologolgy*, 16(3), 528–538. <https://doi.org/10.1111/plb.12132>
- Koehle, A. P., Brumwell, S. L., Seto, E. P., Lynch, A. M., & Urbaniak, C. (2023).

- Microbial applications for sustainable space exploration beyond low Earth orbit. *npj Microgravity*, 9(1), 47. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00285-0>
- Kovalev, V. S., Grandl, W., Manukovsky, N. S., Tikhomirov, A. A., & Böck, C. (2022). Modeling a lunar base mushroom farm. *Life sciences in space research*, 33, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.12.005>
- Kržišnik, D., & Gonçalves, J. (2023). Environmentally conscious technologies using fungi in a climate-changing world. *Earth*, 4(1), 69–77. <https://doi.org/10.3390/earth4010005>
- Lange, L. (2014). The importance of fungi and mycology for addressing major global challenges. *IMA Fungus*, 5, 463–471. <https://doi.org/10.5598/IMAFUNGUS.2014.05.02.10>
- Liu, Q., Zhang, Q., Dang, L., Chen, N., Yin, Z., Ma, L., Feng, Y., Li, W., Wei, Y., Zhang, W., Lu, L., Dong, C., Yuan, J., & Xiao, K. (2024). The interaction between *Aspergillus brasiliensis* and exposed copper circuits in the space microgravity environment. *Corrosion Science*, 234, 112132. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112132>
- Macías-Paz, I. U., Pérez-Hernández, S., Tavera-Tapia, A., Luna-Arias, J. P., Guerra-Cárdenas, J. E., & Reyna-Beltrán, E. (2023). *Revista Argentina de Microbiología*, 55(2), 1889–198. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2022.08.003>
- Makimura, K., Satoh, K., Sugita, T., & Yamazaki, T. (2011). Fungal biota in manned space environment and impact on human health. *Nihon Eiseigaku zasshi. Japanese Journal of Hygiene*, 66(1), 77–82. <https://doi.org/10.1265/jjh.66.77>
- Manukovsky, N. S., Kovalev, V. S., Trifonov, S. V., & Hranovskaya, O. V. (2023). Investigation of the production and dietary features of oyster mushrooms for a planned lunar farm. *Heliyon*, 9(5), e15524. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15524>
- Martirena-Ramírez, A., Serrano-Gamboa, J. G., Pérez-Llano, Y., Zenteno-Alegría, C. O., Iza-Arteaga, M. L., del Rayo, M., Fernández-Ocaña, A. M., Batista-García, R. A., & Folch-Mallol, J. L. (2024). *Aspergillus brasiliensis* E_15.1: A Novel Thermophilic Endophyte from a Volcanic Crater Unveiled through Comprehensive Genome-Wide, Phenotypic Analysis, and Plant Growth-Promoting Trails. *Journal of Fungi*, 10(8), 517. <https://doi.org/10.3390/jof10080517>
- McDonald, J. T., Stainforth, R., Miller, J., Cahill, T., da Silveira, W. A., Rath, K. S., Hardiman, G., Taylor, D., Costes, S. V., Chauhan, V., Meller, R., & Beheshti, A. (2020). NASA GeneLab Platform Utilized for Biological Response to Space Radiation in Animal Models. *Cancers*, 12(2), 381. <https://doi.org/10.3390/cancers12020381>
- Mermel, L.A. (2012). Infection Prevention and Control during Prolonged Human Space Travel. *Clinical Infectious Diseases*, 56(1), 123–130. <https://doi.org/10.1093/cid/cis861>
- Mousavi, B., Hedayati, M., Hedayati, N., Ilkit, M., & Syedmousavi, S. (2016). *Aspergillus* species in indoor environments and their possible occupational and public health hazards. *Curr Med Mycol*, 2, 36–42. <https://doi.org/10.18869/acadpub.cmm.2.1.36>
- Mwangi, R. W., Macharia, J. M., Wagara, I. N., & Bence, R. L. (2022). The antioxidant potential of different edible and medicinal mushrooms. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 147(2022), 112621. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.112621>
- Nastasi, N., Haines, S. R., Bope, A., Meyer, M. E., Horack, J. M., & Dannemiller, K. C.

- (2024). Fungal diversity differences in the indoor dust microbiome from built environments on earth and in space. *Scientific Reports*, 14(1), 11858. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62191-z>
- Netherway, T., Bengtsson, J., Krab, E. J., & Bahram, M. Biotic interactions with mycorrhizal systems as extended nutrient acquisition strategies shaping forest soil communities and functions. *Basic and Applied Ecology*, 50, 25–42. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.10.002>
- Neuberger, K., Lux-Endrich, A., Panitz, C., & Horneck, G. (2015). Survival of spores of *Trichoderma longibrachiatum* in space: data from the space experiment SPORES on EXPOSE-R. *International Journal of Astrobiology*, 14(1), 129-135. <https://doi.org/10.1017/S1473550414000408>
- Nunes, J. M., Bizerra, F. C., Ferreira, R. C. E., & Colombo, A. L. (2013). Molecular identification, antifungal susceptibility profile, and biofilm formation of clinical and environmental *Rhodotorula* species isolates. *Antimicrob Agents Chemother*, 57(1), 382–389. <https://doi.org/10.1128/aac.01647-12>
- Onofri, S., Selbmann, L., Barreca, D., Isola, D., & Zucconi, L. (2009). Do fungi survive under actual space conditions? Searching for evidence in favour of lithopanspermia. *Plant Biosystems*, 143(1), S85-S87. <https://doi.org/10.1080/11263500903208393>
- Onofri, S., Selbmann, L., Pacelli, C., De Vera, J. P., Horneck, G., Hallsworth, J. E., & Zucconi, L. (2018). Integrity of the DNA and cellular ultrastructure of cryptoendolithic fungi in space or Mars conditions: a 1.5-year study at the International Space Station. *Life*, 8(2), 23. <https://doi.org/10.3390/life8020023>
- Onofri, S., de Vera, J.-P., Zucconi, L., Selbmann, L., Scalzi, G., Venkateswaran, K. J., Rabbow, E., de la Torre, R., & Horneck, G. (2015). Survival of Antarctic Cryptoendolithic Fungi in Simulated Martian Conditions On Board the International Space Station. *Astrobiology*, 15(12), 1052-1059. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1324>
- Owczarek-Kościelniak, M. M., Chlebicki, A., & Sterflinger, K. *Aureobasidium pullulans* from *Juncus trifidus* L. roots. (2016). *Phytotaxa*, 266(2), 125-133. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.266.2.6>
- Pacelli, C., Alessia, C., Siong, L. M., Lorenzo, A., Moeller, R., Fujimori, A., Igor, S., & Silvano, O. (2021). Insights into the Survival Capabilities of *Cryomyces antarcticus* Hydrated Colonies after Exposure to Fe Particle Radiation. *Journal of Fungi*, 7(7), 495. <https://doi.org/10.3390/JOF7070495>
- Pacelli, C., Selbmann, L., Zucconi, L., De Vera, J. P., Rabbow, E., Horneck, G., de la Torre, R., & Onofri, S. (2016). BIOMEX experiment: ultrastructural alterations, molecular damage and survival of the fungus *Cryomyces antarcticus* after the experiment verification tests. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 47, 187-202. <https://doi.org/10.1007/s11084-016-9485-2>
- Pasanen, A.-L., Kalliokoski, P., Pasanen, P., Jantunen, M. J., & Nevalainen, A. (1991). Laboratory studies on the relationship between fungal growth and atmospheric temperature and humidity. *Environment International*, 17(4), 225-228. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(91\)90006-C](https://doi.org/10.1016/0160-4120(91)90006-C)
- Pernice, M. C., Forn, I., Logares, R., & Massana, R. (2024). A fungi hotspot deep in the ocean: explaining the presence of *Gjaerumia minor* in equatorial Pacific bathypelagic waters. *Scientific Reports*, 14(1), 10601. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61422-7>
- Pierson, D., Botkin, D., Bruce, R., Castro, V., Smith, M., Oubre, C., & Ott, C. (2012).

- Environmental monitoring: a comprehensive handbook. En: Environmental monitoring: a comprehensive handbook. DHI Publishing, LLC River Grove, IL.
- Pilafidis, S., Diamantopoulou, P., Gkatzionis, K., & Sarris, D. (2022). Valorization of agro-industrial wastes and residues through the production of bioactive compounds by macrofungi in liquid state cultures: Growing circular economy. *Applied Sciences*, 12(22), 11426. <https://doi.org/10.3390/app122211426>
- Ponizovskaya, V. B., Dyakov, M. Yu., Antropova, A. B., Bilanenko, E. N., Mokeeva, V. L., & Ilyin, V. K. (2017). The survival of micromycetes exposed to space conditions. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 72, 6-12. <https://doi.org/10.3103/S0096392517010023>
- Prasad, B., Richter, P., Vadakedath, N., Haag, F. W., Strauch, S. M., Mancinelli, R., Schwarzwälder, A., Etcheparre, E., Gaume, N. & Lebert, M. (2021). How the space environment influences organisms: An astrobiological perspective and review. *International Journal of Astrobiology*, 20(2), 159-177. <https://doi.org/10.1017/S1473550421000057>
- Recio, R., Meléndez-Carmona, M. Á., Martín-Higuera, M. C., Pérez, V., López, E., López-Medrano, F., & Pérez-Ayala, A. (2019). Trichoderma longibrachiatum: an unusual pathogen of fungal pericarditis. *Clinical microbiology and infection*, 25(5), 586–587. <https://doi.org/10.1016/j.cmi.2019.02.006>
- Sánchez, C. Reactive oxygen species and antioxidant properties from mushrooms. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 2(1), 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2016.12.001>
- Sánchez, F. J., De la Torre, R., Sancho, L., Mateo-Martí, E., Martínez-Frías, J., & Horneck, G. (2010). Aspicilia fruticulosa: one of the most resistant organisms to outer space conditions and Mars simulated environment. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 40, 546-547.
- Satyaveer & Rajanna, K. B. (2022). Health Benefits and Medicinal Value of Mushroom. *Agriculture & Environment*, 3(9), 13-17.
- Satoh, K., Alshahni, M. M., Umeda, Y., Komori, A., Tamura, T., Nishiyama, Y., Yamazaki, T., & Makimura, K. (2021). Seven years of progress in determining fungal diversity and characterization of fungi isolated from the Japanese Experiment Module KIBO, International Space Station. *Microbiology and Immunology*, 65(11), 463-471. <https://doi.org/10.1111/1348-0421.12931>
- Satoh, K., Yamazaki, T., Nakayama, T., Umeda, Y., Alshahni, M. M., Makimura, M., & Makimura, K. (2016). Characterization of fungi isolated from the equipment used in the International Space Station or Space Shuttle. *Microbiology and immunology*, 60(5), 295-302. <https://doi.org/10.1111/1348-0421.12375>
- Senawong, T., Khaopha, S., Misuna, S., Bunyatratchata, W., Sattayasai, N., Senawong, G., Surapaitoon, A., & Sripa, B. (2014). Histone Deacetylase Inhibitory Activity and Antiproliferative Activity of the Cultured Medium of Aspergillus niger strain TS1. *Chiang Mai J Sci*, 41(5.1), 981-991. <https://epg.science.cmu.ac.th/ejournal/journal-detail.php?id=5266>
- Seppälä, S., Wilken, St. E., Knop, D., Solomon, K. V., & O'Malley, M. A. (2017). The importance of sourcing enzymes from non-conventional fungi for metabolic engineering and biomass breakdown. *Metabolic Engineering*, 44, 45-59. <https://doi.org/10.1016/J.YMBEN.2017.09.008>
- Shiryaev, A. G., Zmitrovich, I. V., & Ezhov, O. N. (2018). Taxonomic and ecological structure of basidial macromycetes biota in polar deserts of the Northern Hemisphere. *Contemporary problems of ecology*, 11, 458-471.

- <https://doi.org/10.1134/S1995425518050086>
- Sokolová, M., & Ryparová, P. (2019). Biological susceptibility of earth plasters: The influence of relative humidity on fungal growth. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 10(1), 9-14. <https://doi.org/10.1556/1848.2019.0002>
- Sychev, V. N., Novikova, N. D., Poddubko, S. V., Deshevaya, E. A., & Orlov, O. I. (2020). The Biological Threat: The Threat of Planetary Quarantine Failure as a Result of Outer Space Exploration by Humans. *Doklady Biological Sciences*, 490, 28–30. <https://doi.org/10.1134/S0012496620010093>
- Takahashi, J. A., Barbosa, B. V., Martins, B. A., Guirlanda, C., & Moura, M. (2020). Use of the versatility of fungal metabolism to meet modern demands for healthy aging, functional foods, and sustainability. *Journal of Fungi*, 6(4), 223. <https://doi.org/10.3390/jof6040223>
- Tanney, J. B., Visagie, C. M., Yilmaz, N., Seifert, K. A. (2017). Aspergillus subgenus Polypaecilum from the built environment. *Studies in Mycology*, 88(1), 237-267. <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2017.11.001>
- Tesei, D., Chiang, A. J., Kalkum, M., Stajich, J. E., Mohan, G. B. M., Sterflinger, K. & Venkateswaran, K. (2021) Effects of Simulated Microgravity on the Proteome and Secretome of the Polyextremotolerant Black Fungus Knufia chersonesos. *Frontiers in Genetics*, 12, 638708. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.638708>
- Tunlid, A., Floudas, D., Op de Beeck, M., Wang, T., & Persson, P. (2022). Decomposition of soil organic matter by ectomycorrhizal fungi: Mechanisms and consequences for organic nitrogen uptake and soil carbon stabilization. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 934409. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.934409>
- Urbaniak, C., Morrison, M. D., Thissen, J. B., Karouia, F., Smith, D. J., Mehta, S., Jaing, C., & Venkateswaran, K. (2022). Microbial Tracking-2, a metagenomics analysis of bacteria and fungi onboard the International Space Station. *Microbiome* 10(100), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40168-022-01293-0>
- Wang, X., & Pecoraro, L. (2021). Analysis of soil fungal and bacterial communities in Tianchi Volcano crater, northeast China. *Life*, 11(4), 280. <https://doi.org/10.3390/life11040280>
- Winder, R. S. (2024). Mushrooms to Mars: Harnessing Fungi for Sustainable Human Settlements. *Acceleron Aerospace Journal*, 2(2), 156-165. <http://dx.doi.org/10.61359/11.2106-2406>
- Wösten, H. A. B., Krijgsheld, P., Montalti, M., & Lökk, H. (2018). *Growing Fungi Structures in Space. Final Report. European Space Agency*. Recuperado de: https://www.esa.int/gsp/ACT/doc/ARI/ARI%20Study%20Report/ACT-RPT-HAB-ARI-16-6101-Fungi_structures.pdf
- Yang, W.-J., Gou, F.-L., Wan, Z.-J. (2013). Yield and size of oyster mushroom grown on rice/wheat straw basal substrate supplemented with cotton seed hull. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(4), 333-338. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.02.006>
- Yamaguchi, N., Roberts, M. A., Castro, S., Oubre, C., Makimura, K., Leys, N., Grohmann, E., Sugita, T., Ichijo, T., & Nasu, M. (2014). Microbial monitoring of crewed habitats in space-current status and future perspectives. *Microbes and Environments*, 29(3), 250-256. <https://doi.org/10.1264/JSME2.ME14031>
- Yamazaki, T., Yoshimoto, M., Nishiyama, Y., Okubo, Y., & Makimura, K. (2012). Phenotypic characterization of Aspergillus niger and Candida albicans grown under simulated microgravity using a three-dimensional clinostat. *Microbiology and immunology*, 56(7), 441-446.

- <https://doi.org/10.1111/j.1348-0421.2012.00471.x>
- Zalar, P., de Hoog, G. S., Schroers, H.-J., Crous, P. W., Groenewald, J. Z., Gunde-Cimerman, N. (2007). Phylogeny and ecology of the ubiquitous saprobe *Cladosporium sphaerospermum*, with descriptions of seven new species from hypersaline environments. *Studies in Micology*, 58(1), 157-183.
<https://doi.org/10.3114/sim.2007.58.06>
- Zea, L., Prasad, N., Levy, S. E., Stodieck, L., Jones, A., Shrestha, S., Klaus, D. (2016) A Molecular Genetic Basis Explaining Altered Bacterial Behavior in Space. *PLoS ONE*, 11(11), e0164359. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164359>
- Zhan, Z., Xu, M., Li, Y. & Dong, M. (2021). The Relationship between Fungal Growth Rate and Temperature and Humidity. *International Journal of Engineering and Management Research*, 11(3). <https://ssrn.com/abstract=3867229>
- Zhang, L., Hou, Y., Qu, X., Ma, J. & Bai, F. (2023). *Research and Prospect of Microbial Control on Space Station*. En: S. Long, & B. S. Dhillon (Eds.), Man-Machine-Environment System Engineering. MMESE 2023. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 1069. Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-4882-6_51
- Zhang, Z., Huang, T., Zhao, M., Hu, Z., Ni, Y., Jiang, J., Cheng, B., Li, X., & Chen, J. (2024). Comparison of soil microbial abundances and co-occurrence networks in the volcanic soil of the cone and crater. *CATENA*, 236, 107734.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107734>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Biomimética de la resistencia a la presión en organismos de las profundidades marinas para la exploración astrobiológica de océanos subterráneos en otros planetas

Ariadna Celeste Pillaca-Llanos¹

<https://orcid.org/0009-0004-9643-0140>

Sergio Felipe Serrano-Díaz¹

<https://orcid.org/0009-0002-5942-154X>

Vannesa Pachas-Polack¹

<https://orcid.org/0009-0001-0770-1497>

Rivaldo Carlos Duran-Aquino¹

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

¹Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Email: rivaldo.duran@unmsm.edu.pe

Recibido: 01/12/2024 • Revisado: 20/12/2024 • Aceptado: 25/12/2024

Resumen

En el marco del diseño de vehículos de exploración de océanos subterráneos en cuerpos celestes como Europa y Encélado, este estudio propone un enfoque biomimético basado en organismos marinos de las profundidades, como peces invertebrados y microbios resistentes a altas presiones y bajas temperaturas. La metodología incluyó una revisión exhaustiva de las adaptaciones biológicas de estos organismos y sus aplicaciones al diseño de robots, la identificación de principios biomiméticos relevantes y el análisis de las condiciones planetarias de lunas y exoplanetas con océanos subterráneos. Los resultados demuestran que las características biomiméticas pueden mejorar la eficiencia y reducir el tamaño de los vehículos de exploración, en comparación con las tecnologías actuales. Se concluye que la aplicación de la biomimética tiene un gran potencial para la exploración astrobiológica en condiciones extremas y se recomienda fomentar investigaciones interdisciplinarias entre biología marina, astrobiología e ingeniería aeroespacial para el desarrollo futuro de tecnologías innovadoras.

Palabras clave: Astrobiología, biomimética, exoplanetas, océanos subterráneos, vehículos de exploración.

Citar como:

Pillaca-Llanos, A. C., Serrano-Díaz, S. F., Pachas-Polack, V. y Duran-Aquino, R. C. (2024). Biomimética de la resistencia a la presión en organismos de las profundidades marinas para la exploración astrobiológica de océanos subterráneos en otros planetas. *Revista Científica de Astrobiología*, 1(1), 18-30. <http://doi.org/10.69976/aspast.v1n1.3>

RESEARCH ARTICLE

Pressure-Resistance Biomimetics in Deep-Sea Organisms for Astrobiological Exploration of Subsurface Oceans on Other Planets

Ariadna Celeste Pillaca-Llanos¹

<https://orcid.org/0009-0004-9643-0140>

Sergio Felipe Serrano-Díaz¹

<https://orcid.org/0009-0002-5942-154X>

Vannesa Pachas-Polack¹

<https://orcid.org/0009-0001-0770-1497>

Rivaldo Carlos Duran-Aquino¹

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

¹Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Email: rivaldo.duran@unmsm.edu.pe

Recibido: 01/12/2024 • Revisado: 20/12/2024 • Aceptado: 25/12/2024

Abstract

In the context of designing exploration vehicles for subsurface oceans on celestial bodies such as Europa and Enceladus, this study proposes a biomimetic approach inspired by deep-sea marine life—specifically invertebrate fish and microorganisms adapted to high-pressure, low-temperature environments. The methodology included an in-depth review of these organisms' biological adaptations and how they can inform robot design, the identification of relevant biomimetic principles, and an assessment of planetary conditions on moons and exoplanets with subsurface oceans. Findings indicate that biomimetic features can boost efficiency and reduce the size of exploration vehicles compared to current technologies. The study concludes that applying biomimicry in extreme environments holds significant promise for astrobiological exploration and recommends fostering interdisciplinary research among marine biology, astrobiology, and aerospace engineering to develop future innovations.

Keywords: Astrobiology, biomimetics, exoplanets, subsurface oceans, exploration vehicles.

Cite as:

Pillaca-Llanos, A. C., Serrano-Díaz, S. F., Pachas-Polack, V. y Duran-Aquino, R. C. (2024). Biomimética de la resistencia a la presión en organismos de las profundidades marinas para la exploración astrobiológica de océanos subterráneos en otros planetas. *Revista Científica de Astrobiología*, 1(1), 18-30. <http://doi.org/10.69976/aspast.v1n1.3>

1. Introducción

El descubrimiento de océanos subterráneos en las lunas de Júpiter (Europa, Ganímedes y Calisto) y Saturno (Encélado y Titán) ha dado lugar al surgimiento del campo de la oceanografía planetaria (Hendrix et al., 2019). Estos cuerpos celestes presentan condiciones extremas, como temperaturas muy bajas y presiones muy altas, en comparación con ambientes terrestres análogos (NASA, s.f.-a, s.f.-f). Por lo tanto, la ingeniería humana enfrenta desafíos en la exploración astrobiológica de océanos subterráneos en otros planetas en busca de condiciones óptimas para el desarrollo de la vida (Rettberg, 2022).

Explorar entornos extraterrestres, particularmente los océanos subterráneos en lunas como Europa y Encélado, presenta desafíos significativos para las tecnologías actuales de exploración espacial. Se cree que estas lunas albergan vastos océanos bajo sus costras heladas, pero poseen condiciones extremas como frío intenso, alta presión y luz limitada. Los vehículos robóticos actuales tienen dificultades con los entornos hostiles de estas lunas, y las soluciones de ingeniería tradicionales pueden no ser suficientes para abordar los desafíos únicos que presentan. Este artículo explora cómo las adaptaciones biológicas de especies marinas, como las que se encuentran en las profundidades oceánicas de la Tierra, pueden inspirar el diseño de robots biomiméticos capaces de superar estas limitaciones. El objetivo es proponer principios de diseño innovadores y nuevos métodos basados en sistemas biológicos para mejorar las capacidades de los robots de exploración espacial, especialmente en entornos como los océanos subterráneos de lunas y exoplanetas.

Inicialmente, los robots marinos tradicionales, equipados con estructuras metálicas especializadas para protección, fueron considerados la opción más viable para soportar las presiones extremas en aguas profundas (Li et al., 2023; Yoerger et al., 2021). Sin embargo, investigaciones posteriores demostraron que las especies que viven en estos entornos de presión extrema no requieren estructuras complejas o voluminosas (Smith et al., 2021). Entre estas especies se encuentran microorganismos conocidos como barófilos con potencial astrobiológico (Rampelotto, 2010); peces que sobresalen en locomoción y natación eficiente (Colgate & Lynch, 2004; Gao et al., 2013); e invertebrados con notable resistencia a la presión y excelentes capacidades de natación (Bartol et al., 2001; Z. Wang et al., 2008). Estos hallazgos llevaron a los científicos a proponer un enfoque biomimético novedoso y prometedor para la exploración espacial (Vangeli-Margariti, 2020). En apoyo de este enfoque, un grupo de científicos de la NASA ha enfatizado la importancia de realizar investigaciones básicas para identificar principios biomiméticos aplicables en este campo (Hendrix et al., 2019; Somero, 1992a, 1992b).

Actualmente, varios robots biomiméticos han sido implementados con éxito (Li et al., 2021, 2023; Phillips et al., 2018). Sin embargo, la mayoría de estos modelos, con gran resistencia a profundidades y bajas temperaturas, han sido diseñados para condiciones oceánicas terrestres, mientras que el desarrollo de vehículos submarinos para otros entornos extraterrestres está en curso (NASA, s.f.-e; NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), s.f.-a, s.f.-b). Por lo tanto, este estudio propone utilizar principios biomiméticos de organismos de aguas profundas para diseñar vehículos de exploración capaces de operar en océanos subterráneos extraterrestres, analizando las características de otros planetas y satélites del Sistema Solar, y revisando el panorama actual de la tecnología de vehículos submarinos, integrando estos hallazgos.

2. Metodología

2.1. Adaptaciones Biológicas

Para investigar el potencial de diseños biomiméticos para robots de exploración espacial, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica sobre diversos organismos marinos seleccionados por su capacidad para sobrevivir en condiciones extremas como bajas temperaturas, alta presión y falta de luz. Estas especies fueron elegidas por sus adaptaciones únicas, como proteínas anticongelantes, mecanismos celulares especializados y estrategias de supervivencia en entornos de alta presión. Se analizaron y compararon características biológicas como morfología, genómica y adaptaciones fisiológicas que permiten a estos organismos habitar estos entornos, en relación con las necesidades de robots en condiciones extremas de exploración espacial. La comparación entre las características de estos organismos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Comparación de Características de Organismos de Aguas Profundas

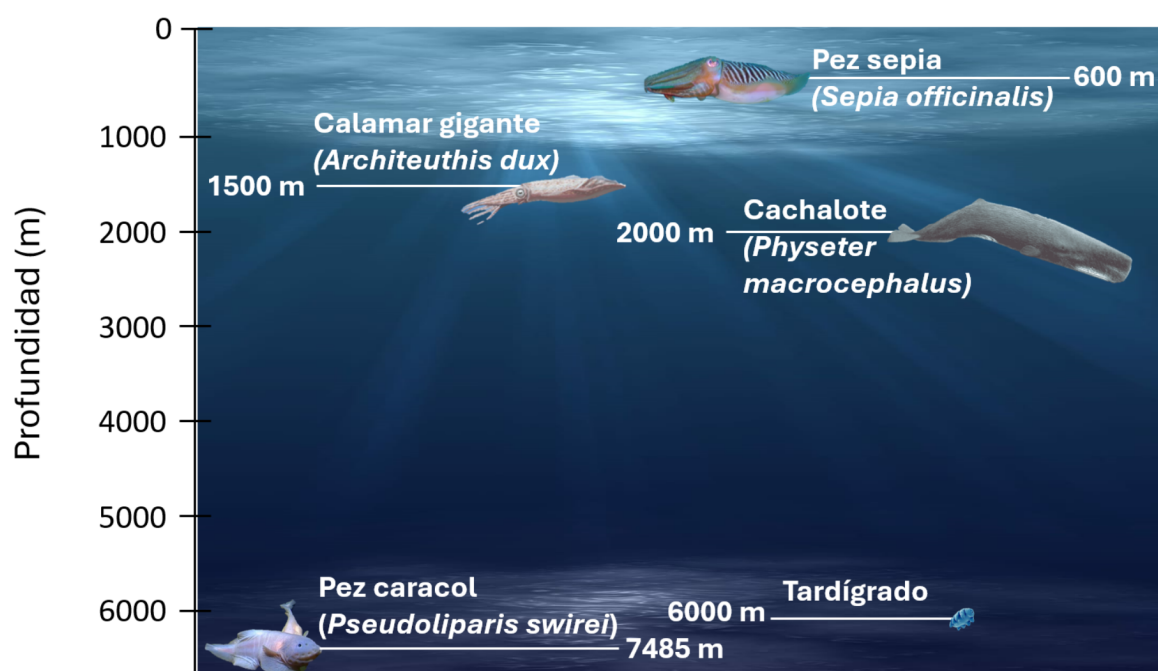
Organismo	Morfología	Genómica	Adaptaciones
Pez Baboso	Gelatinoso, órganos agrandados	Genoma grande, evolución rápida	TMAO, ácidos grasos insaturados, pérdida de genes de fotorreceptores
Calamar Gigante	Manto cónico, aletas romboidales	Epigenética, metilación	Propulsión a chorro, forma hidrodinámica
Ballena Esperma	Cabeza grande, joroba dorsal	mtDNA, sustituciones comunes	Grasa en la cabeza, arquitectura pulmonar
Sepia	Estructura eficiente, ojos complejos	Diversidad genética, estructura poblacional	HSP, hemocianina
Tardígrado	Segmentado, 8 patas, garras	Dsup, reparación de ADN	Criptobiosis, resistencia a la radiación, anhidrobiosis

- **Pez Baboso:** Este pez habita la Fosa de las Marianas a una profundidad de 6,000 metros y se caracteriza por músculos delgados y osificación parcial de los huesos. Sus adaptaciones incluyen la alteración del gen de la proteína gamma-carboxiglutamato (BGLAP) y proteínas adaptadas para la estabilidad bajo alta presión, como el óxido de trimetilamina (TMAO) (K. Wang et al., 2019).
- **Calamar Gigante:** Este cefalópodo tiene un mecanismo adaptativo llamado propulsión a chorro para moverse, alcanzando profundidades de hasta 1,500 metros. La regulación epigenética modula la expresión genética en su genoma (da Fonseca et al., 2020).
- **Ballena Esperma:** Este cetáceo se sumerge a profundidades superiores a 2,000 metros. Su cabeza grande y cuadrada le permite almacenar grasa, que se solidifica bajo presión para ayudar en su descenso. Además, su estructura pulmonar le permite soportar altas presiones (Irvine et al., 2017).

- **Sepia:** Este cefalópodo, que vive a profundidades entre 400 y 600 metros, ha desarrollado adaptaciones para sobrevivir en condiciones extremas de presión y temperatura. Estas incluyen proteínas de choque térmico (HSP), hemocianina para mejorar la oxigenación y ojos complejos para condiciones de poca luz (Zielinski et al., 2001).
- **Tardígrado:** Este microorganismo puede soportar temperaturas cercanas al cero absoluto y posee la proteína fosfatasa de doble especificidad (Dsup), que lo protege de la radiación. También tiene adaptaciones como criptobiosis y anhidrobiosis (Horikawa, 2012). Alcanza profundidades de hasta 6,000 metros bajo el nivel del mar, como se muestra en la Figura 1, junto con las profundidades alcanzadas por todos los organismos mencionados anteriormente.

Figura 1

Profundidades máximas resistidas por organismos marinos.



2.2. Principios Biomiméticos Aplicables

Los principios descritos en esta sección buscan ser replicados en robots y vehículos de exploración submarina para que, al igual que los organismos de aguas profundas, estos robots puedan soportar condiciones extremas de aguas profundas y bajas temperaturas. El enfoque está en niveles moleculares y celulares, estructura corporal y adaptaciones fisiológicas.

- **Estructura Molecular y Celular:** A este nivel, los siguientes factores permiten la supervivencia en condiciones extremas: proteínas anticongelantes (AFP), que inhiben la recristalización del hielo y tienen una diferencia entre sus puntos de fusión y congelación; glicolípidos anticongelantes (Duman, 2015); y TMAO en tejidos de peces teleósteos y crustáceos, que estabilizan moléculas celulares contra la desnaturación causada por presión extrema (Yancey et al., 2014).

- **Estructura Corporal:** El exoesqueleto característico de algunos invertebrados (Priede, 2017), la concha de nácar de algunos moluscos y la forma del cuerpo proporcionan protección contra la presión; mientras que una gruesa capa de grasa subcutánea actúa como aislamiento térmico (Olson et al., 2012).
- **Adaptaciones Fisiológicas:** La presencia de moléculas como TMAO y proteínas anticongelantes (AFP) es clave para mantener la integridad celular. Por analogía, robots con fluidos internos diseñados para resistir congelamiento o presión podrían utilizar mezclas líquidas con propiedades anticongelantes o materiales que mantengan su flexibilidad mecánica bajo condiciones extremas (Priede, 2017).

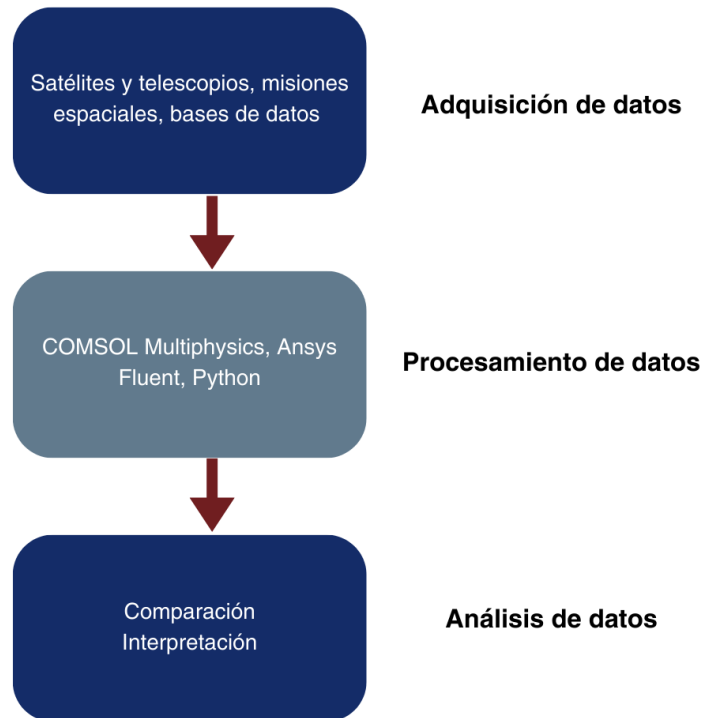
2.3. Análisis de Condiciones Planetarias

Para evaluar la aplicabilidad de diseños biomiméticos en la exploración espacial, se estudiaron las condiciones en lunas y exoplanetas. Se recopilaron datos de investigaciones sobre organismos marinos y simulaciones de entornos subterráneos en lunas como Europa y Encélado. El objetivo fue comprender mejor los desafíos que los robots podrían enfrentar en estos lugares, considerando las similitudes entre los entornos de alta presión y baja temperatura de las profundidades marinas y los océanos subterráneos de otros cuerpos celestes.

- **Obtención de Datos:** El Telescopio Espacial Hubble (HST) y el Telescopio Espacial James Webb (JWST) se utilizan para caracterizar las atmósferas de exoplanetas y satélites como Europa y Encélado. Además, telescopios terrestres como el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) y el Very Large Telescope (VLT) proporcionan datos complementarios sobre la química de la superficie y subsuelo de lunas y exoplanetas. Múltiples misiones han confirmado la presencia de océanos subterráneos en entornos no terrestres (la misión Galileo en Europa y la misión Cassini en Encélado), mientras que otras misiones están proyectadas para analizar cuerpos más distantes, como la misión JUICE en Ganímedes y la misión Dragonfly en Titán. El Planetary Data System (PDS) proporciona datos de misiones planetarias sobre la estructura interna, atmósferas y superficies de cuerpos como Europa, Encélado, Titán y Ganímedes. Las bases de datos Exoplanet Data Explorer y NASA Exoplanet Archive contienen información sobre exoplanetas; finalmente, bases de datos como el NASA Astrophysics Data System (ADS), Springer, Nature y ScienceDirect informan sobre océanos subterráneos de satélites, exoplanetas con condiciones análogas y entornos terrestres similares.
- **Procesamiento de Datos:** La simulación de condiciones ambientales en los océanos subterráneos de Europa y Encélado requiere software como COMSOL Multiphysics y Ansys Fluent para modelar sistemas termodinámicos y dinámica de fluidos. Mientras tanto, Python se utiliza para el procesamiento de datos, ejecución de simulaciones y visualización de resultados. Se analizan parámetros como la composición química de océanos y atmósferas para identificar compuestos clave para la vida (agua, sales, amoníaco y metano). El diagrama de flujo para el análisis se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Diagrama de flujo para el análisis de condiciones planetarias.



3. Resultados

3.1. Comparación de Entornos: Tierra vs. Lunas y Exoplanetas

Los entornos de la Tierra tienen condiciones que, aunque variadas, tienden a ser más estables en comparación con los entornos de lunas y exoplanetas, presentando tanto desafíos como oportunidades únicas para la investigación biomimética y el desarrollo de tecnología espacial, particularmente en la exploración de océanos subterráneos (Hendrix et al., 2019). Sin embargo, algunos entornos muestran características similares entre la Tierra y otros cuerpos celestes, como se muestra en la Tabla 2. Ejemplos de esto incluyen los desiertos terrestres, que se asemejan a las condiciones en Titán y ciertos exoplanetas, y los lagos subglaciales en la Tierra, como el Lago Vostok, que tienen analogías con los océanos subterráneos en Europa y Encélado (Antunes et al., 2020; Lingam et al., 2024; Vance et al., 2018).

- **Temperatura:** Los rangos de temperatura de la Tierra permiten una amplia variedad de vida, mientras que en lunas como Europa y Encélado, así como exoplanetas como TRAPPIST-1e, estos rangos son más extremos, planteando desafíos para la habitabilidad y la tecnología de exploración.
- **Presión Atmosférica:** La presión atmosférica de la Tierra es mayor que la de otros cuerpos celestes, lo que tiene implicaciones para los robots y las tecnologías de exploración.
- **Composición Atmosférica:** La atmósfera de la Tierra, rica en oxígeno y nitrógeno,

contrasta con la de otras lunas y exoplanetas, que contienen una mezcla más diversa de gases.

- **Presencia de Agua:** La Tierra tiene agua líquida en su superficie, mientras que lunas como Europa y Encélado contienen océanos subterráneos, un escenario que requiere estrategias de exploración específicas.
- **Gravedad:** La gravedad de la Tierra es significativamente más fuerte que la de muchos cuerpos celestes, lo que impacta el diseño de robots y su capacidad para moverse a través de diferentes superficies.

Tabla 2.
Comparación de Entornos: Tierra vs. Lunas y Exoplanetas

Medida	Europa	Encélado	TRAPPIST-1e	Fosa de las Marianas	Lago Vostok
Temperatura (°C)	-160	-198	-53	2	-3
Presión (atm)	1	1	1	1100	400
Atmósfera	No densa	No densa	CO ₂ denso	—	—
Presencia de Agua	Presente	Presente	Posible	Presente	Presente
Gravedad (m/s ²)	1.31	0.113	9.4	9.8	9.8

3.2. Aplicaciones en Vehículos Espaciales

A continuación, se comparan varios robots biomiméticos con vehículos submarinos no biomiméticos (tripulados y no tripulados, autónomos o operados remotamente) en términos de tamaño, peso y profundidades alcanzadas, como se muestra en la Tabla 3.

- **Robots Biomiméticos Especializados en Océanos Extranjeros:** En el caso de explorar lunas como Europa, el NASA Buoyant Rover for Under-Ice Exploration (BRUIE) es un buen ejemplo de cómo los principios biomiméticos pueden aplicarse a la robótica para adaptarse a entornos extremos. Este robot está diseñado para operar en ambientes fríos y helados, lo que lo hace adecuado para explorar cuerpos celestes como Europa. El Exobiology Extant Life Surveyor (EELS) es otro robot biomimético desarrollado para buscar signos de vida en lugares como Encélado, basado en movilidad flexible inspirada en serpientes (NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), s.f.-b).
- **Robots Biomiméticos Especializados en Océanos Terrestres:** En la Tierra, el RoboLobster es un ejemplo de cómo se aplica la biomimética en entornos submarinos. Este robot utiliza material de nitinol, que se adapta a cambios de temperatura y es ideal para condiciones extremas (Ayers et al., 2000). De manera similar, el pez robótico blando, inspirado en el movimiento de los peces marinos, incorpora elastómeros y actuadores para moverse eficientemente a través del agua (Li et al., 2023), proporcionando un modelo útil para la exploración de océanos en otros cuerpos celestes.

- **Sumergibles Tripulados (HOVs), Vehículos Submarinos Autónomos (AUVs) y Vehículos Submarinos Operados Remotamente (ROUVs):** A diferencia de los robots biomiméticos, los vehículos tripulados, AUVs y ROUVs son más grandes y pesados, pero pueden alcanzar grandes profundidades y realizar investigaciones en los océanos subterráneos de la Tierra y otros planetas, como se refleja en la Tabla 4 (Vasudev, 2018).

Tabla 3.

Comparación de Robots Biomiméticos

Robot	Biomimética	Razón de Selección	Dimensiones	Profundidad	Ventajas
RoboLobster	Langosta	Comportamiento replicable con bibliotecas computacionales	0.6 m, 3 kg	3–12 m	Capacidad para nadar y caminar
BRUIE	Pez	Exploración submarina en aguas heladas	0.5–1 m	200 m	Exploración de Europa
EELS	Serpiente	Movimiento flexible	4.4 m, 100 kg	378 m	Potencial para Encélado
Brazo Robótico Blando	Tentáculos	Movimientos complejos	25–50 cm	2300 m	Flexible, teleoperado
Pez Robótico Blando	Liparidae	Familia que habita a mayor profundidad	22 cm	10900 m	Blando, ligero, auto-propulsado

3.3. Consideraciones para Estudios Astrobiológicos

El diseño de robots y vehículos para la exploración astrobiológica requiere herramientas que les permitan estudiar habitabilidad, bioindicadores, y los recursos necesarios para sostener la vida.

- **Capacidades de Vehículos y Robots para Estudios Astrobiológicos:** La planificación de misiones astrobiológicas depende de la capacidad de vehículos y robots para navegar en terrenos desconocidos y recolectar muestras. A través de navegación remota y sistemas de imagen avanzados como métodos LiDAR y sensores estereoscópicos, los robots pueden mapear entornos y realizar estudios astrobiológicos en planetas como Europa y Encélado (Helmick et al., 2009).
- **Biofirmas:** Las biofirmas, que incluyen tanto señales morfológicas (e.g., estromatolitos) como químicas (e.g., ácidos nucleicos, patrones de quiralidad en moléculas orgánicas), son esenciales para detectar indicios de vida pasada o presente en otros

mundos (Hays et al., 2017). Las biofirmas morfológicas, como estromatolitos o microestructuras biogénicas, señalan la actividad biológica pasada que pudo haber formado patrones característicos en rocas o sedimentos. Esto implica que un robot equipado con sistemas de imagen y análisis de microtexturas podría identificar estas estructuras sobre o bajo el hielo, o en sedimentos extraterrestres.

- **Recursos para Habitabilidad:** Los robots deben diseñarse para trabajar en entornos que pueden carecer de recursos como agua líquida o energía solar, pero que pueden contener fuentes de energía alternativas o solventes que los organismos biológicos en estos entornos utilizan para sobrevivir (Hays et al., 2017).

Tabla 4.

Comparación de Vehículos Submarinos

Vehículo	Tipo	Profundidad	Peso	Longitud
Oceanus Mini ROV	ROV	400 m	10.8 kg	52 cm
Theseus	AUV	1000 m	7940 kg	10.7 m
ROPOS	ROV	5000 m	3393 kg	3.05 m
OKPO-6000	AUV	6000 m	950 kg	3.8 m
Alvin	HOV	6500 m	20 toneladas	7 m
Jiaolong	HOV	7000 m	22 toneladas	8.3 m
Nereus	AUV	11000 m	2800 kg	4.5 m
Fendouzhe	HOV	11000 m	22 toneladas	10 m

4. Discusión

En relación con los robots que han sido construidos con el objetivo de explorar otros planetas como Marte, se tiene como ejemplo el Sojourner. Este fue lanzado en 1996 en la nave Pathfinder y es el primer vehículo de exploración espacial o rover con ruedas usado para explorar otro planeta en el Sistema Solar (NASA, s.f.-d; NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), s.f.-c). Otro robot, el Opportunity, que aterrizó en Marte en 2004 junto a un robot gemelo llamado Spirit, atravesó más de 45 km y operó durante más de 14 años, lo que lo volvió en dicho momento el rover con más recorrido (NASA, s.f.-c). Más recientemente, en 2020 fue lanzado el Perseverance con la misión de buscar rastros de vida microbiana (NASA, s.f.-b). Por otro lado, se destaca el VIPER (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover), cuyo objetivo es la exploración lunar bajo clima extremo, terreno abrupto y luminosidad variable, aunque todavía no ha sido lanzado (NASA, s.f.-g).

El costo de realizar estas exploraciones alcanza los miles de millones de dólares y aumenta constantemente año tras año (Crawford, 2012). Estados Unidos y Rusia son los principales países con mayores capacidades espaciales técnicas para llevar a cabo estas misiones. En paralelo, la humanidad se enfrenta a desafíos sociales desde implicaciones económicas hasta cambios culturales que exigen una cooperación internacional (Shaghaghi & Antonakopoulos, 2012).

Comparando la biomimética con las soluciones actuales, se observa que un diseño inspirado en principios naturales no solo es innovador sino también más sostenible, con menores costos de desarrollo y producción. Este enfoque tiene un gran potencial para mejorar la eficiencia operativa de los vehículos de exploración espacial al reducir el peso de sus estructuras y optimizar su diseño para abordar los desafíos de la exploración astrobiológica.

Los avances biomiméticos podrían revolucionar la ingeniería de robots destinados a la exploración de océanos subterráneos en lunas y exoplanetas. Al inspirarse en las adaptaciones biológicas únicas de organismos marinos, como su capacidad para resistir condiciones extremas de presiones mayores a 600 Pa y temperaturas inferiores a -150 °C, es posible desarrollar vehículos que puedan operar en entornos donde las tecnologías actuales fracasarían. Este enfoque, que utiliza las adaptaciones naturales de los organismos, ofrece una vía innovadora para crear robots capaces de funcionar en entornos extraterrestres extremos, como los océanos subterráneos de Europa o Encélado.

Sin embargo, la implementación de estos principios biológicos enfrenta desafíos significativos. El desarrollo de materiales que puedan soportar temperaturas extremadamente bajas y presiones elevadas sigue siendo un obstáculo clave. Además, los sistemas biológicos complejos no siempre tienen un equivalente directo en ingeniería, lo que requiere más investigación y un enfoque multidisciplinario para traducir estas adaptaciones en aplicaciones prácticas de robótica espacial.

A pesar de estos desafíos, la biomimética ofrece un camino prometedor hacia el diseño de la próxima generación de vehículos de exploración espacial. La investigación futura debería centrarse en refinar estos diseños a través de simulaciones, prototipos y pruebas en condiciones extremas. Para que estos principios biomiméticos se materialicen en soluciones viables, la colaboración entre biólogos, ingenieros y científicos espaciales será crucial para superar las barreras tecnológicas y avanzar en la exploración astrobiológica.

Conflictos de interés

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

Referencias

- Antunes, A., Olsson-Francis, K., & McGenity, T. J. (2020). Exploring deep-sea brines as potential terrestrial analogues of oceans in the icy moons of the outer solar system. *Current Issues in Molecular Biology*, 38(1), 123–126. <https://doi.org/10.21775/cimb.038.123>
- Ayers, J., Witting, J., Olcott, C., Mcgruer, N., & Massa, D. (2000). Lobster robots. *Robotics and Automation Magazine*, 5(4), 12–18.
- Bartol, I., Patterson, M., & Mann, R. (2001). Swimming mechanics and behavior of the shallow-water brief squid *Lolliguncula brevis*. *Journal of Experimental Biology*, 204(21), 3655–3682. <https://doi.org/10.1242/jeb.204.21.3655>
- Colgate, J. E., & Lynch, K. M. (2004). Mechanics and control of swimming: A review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(3), 660–673. <https://doi.org/10.1109/JOE.2004.833208>
- Crawford, I. A. (2012). Dispelling the myth of robotic efficiency. *Astronomy & Geophysics*, 53(2), 2.22–2.26. <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.2012.53222.x>
- Da Fonseca, R. R., Couto, A., Machado, A. M., Brejova, B., Albertin, C. B., Silva, F., Gardner, P., Baril, T., Hayward, A., Campos, A., Ribeiro, Á. M.,

- Barrio-Hernandez, I., Hoving, H., Tafur-Jimenez, R., Chu, C., Frazão, B., Petersen, B., Peñaloza, F., Musacchia, F., . . . Gilbert, M. T. P. (2020). A draft genome sequence of the elusive giant squid, *Architeuthis dux*. *GigaScience*, 9(1), giz152. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giz152>
- Duman, J. G. (2015). Animal ice-binding (antifreeze) proteins and glycolipids: An overview with emphasis on physiological function. *Journal of Experimental Biology*, 218(12), 1846–1855. <https://doi.org/10.1242/jeb.116905>
- Gao, F., Wang, Y., Wang, Z., Wang, Y., & Li, J. (2013). Prototype design of a kind of biomimetic cuttlefish underwater robot actuated by SMA wires. *Robot*, 35(3), 346. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1218.2013.00346>
- Hays, L. E., Graham, H. V., Marais, D. J. D., Hausrath, E. M., Horgan, B., McCollom, T. M., Parenteau, M. N., Potter-McIntyre, S. L., Williams, A. J., & Lynch, K. L. (2017). Biosignature preservation and detection in Mars analog environments. *Astrobiology*, 17(4), 363–400. <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1627>
- Helmick, D., Angelova, A., & Matthies, L. (2009). Terrain adaptive navigation for planetary rovers. *Journal of Field Robotics*, 26(4), 391–410. <https://doi.org/10.1002/rob.20292>
- Hendrix, A. R., Hurford, T. A., Barge, L. M., Bland, M. T., Bowman, J. S., Brinckerhoff, W. B., Buratti, B. J., Cable, M. L., Castillo-Rogez, J. C., Collins, G. C., et al. (2019). The NASA roadmap to ocean worlds. *Astrobiology*, 19(1), 1–27. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1955>
- Horikawa, D. D. (2012). Survival of tardigrades in extreme environments: A model animal for astrobiology. En *Anoxia: Evidence for Eukaryote Survival and Paleontological Strategies* (pp. 205–217). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1896-8_12
- Irvine, L., Palacios, D. M., Urbán, J., & Mate, B. (2017). Sperm whale dive behavior characteristics derived from intermediate-duration archival tag data. *Ecology and Evolution*, 7(19), 7822–7837. <https://doi.org/10.1002/ece3.3322>
- Li, G., Chen, X., Zhou, F., Liang, Y., Xiao, Y., Cao, X., Zhang, Z., Zhang, M., Wu, B., Yin, S., Xu, Y., Fan, H., Chen, Z., Song, W., Yang, W., Pan, B., Hou, J., Zou, W., He, S., . . . Yang, W. (2021). Self-powered soft robot in the Mariana Trench. *Nature*, 591, 66–71. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03153-z>
- Li, G., Wong, T., Shih, B., Guo, C., Wang, L., Liu, J., Wang, T., Liu, X., Yan, J., Wu, B., Yu, F., Chen, Y., Liang, Y., Xue, Y., Wang, C., He, S., Wen, L., Tolley, M. T., Zhang, A., . . . Li, T. (2023). Bioinspired soft robots for deep-sea exploration. *Nature Communications*, 14(1), 7097. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42882-3>
- Lingam, M., Hibberd, A., & Hein, A. M. (2024). A light sail astrobiology precursor mission to Enceladus and Europa. *Acta Astronautica*, 218, 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.02.040>
- NASA. (s.f.-a). *Europa: Facts - NASA Science*. Consultado el 28 de agosto de 2024, desde <https://science.nasa.gov/jupiter/moons/europa/europa-facts/>
- NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). (s.f.-a). *BRUIE*. Consultado el 28 de agosto de 2024, desde <https://www.jpl.nasa.gov/robotics-at-jpl/bruie>
- Olson, I. C., Kozdon, R., Valley, J. W., & Gilbert, P. U. P. A. (2012). Mollusk shell nacre ultrastructure correlates with environmental temperature and pressure. *Journal of the American Chemical Society*, 134(17), 7351–7358. <https://doi.org/10.1021/ja210808s>
- Phillips, B. T., Becker, K. P., Kurumaya, S., Gruber, D. F., & Wood, R. J. (2018). A dexterous, glove-based teleoperable low-power soft robotic arm for delicate

deep-sea biological exploration. *Scientific Reports*, 8(1), 14779.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-33138-y>

ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

La vida en Marte: ¿Qué puede decirnos el uso de biofirmas sobre nuestra comprensión del proceso de la vida?

Sávio Torres de Farias^{1,2}

¹Laboratório de Genética Evolutiva Paulo Leminski, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, Paraíba, Brazil.

²Network of Researchers on the Chemical Evolution of Life (NoRCEL), Leeds LS7 3RB, UK.

Email: stfarias@yahoo.com.br

<https://orcid.org/0000-0002-2997-3629>

Recibido: 05/07/2024 • Revisado: 13/07/2024 • Aceptado: 22/07/2024

Resumen

La astrobiología es uno de los campos científicos de más rápida expansión en la actualidad. Entre los diversos problemas a los que se enfrenta esta área del conocimiento, la búsqueda de vida fuera de nuestro planeta resulta especialmente desafiante. Cuando se trata de identificar vida más allá de nuestro planeta, uno de los desafíos más difíciles es el uso de firmas biológicas. Las biofirmas pueden verse como cualquier molécula o proceso, que proviene de la actividad biológica y puede indicar la existencia de vida en algún momento, en el presente o en el pasado, en cada ambiente. La identificación de biofirmas que puedan distinguir claramente entre evidencia de vida o simplemente un artefacto producido por otros procesos naturales representa un desafío práctico y teórico para la astrobiología. Dada la complejidad de esta discusión, es necesario abordar varios puntos, las posibles reacciones químicas dadas las condiciones locales del medio a estudiar, la universalidad del fenómeno de la vida tal como la conocemos en nuestro planeta, lo que entendemos como esencia del fenómeno de la vida, entre otros. La elección de biofirmas que puedan revelar señales de vida debe cumplir con varios criterios que buscan eliminar o minimizar la posibilidad de falsos positivos. Aquí espero discutir las implicaciones del uso de biofirmas considerando los avances recientes en la química prebiótica, así como nuevos marcos conceptuales para el fenómeno de la vida y sus implicaciones para el desarrollo de biofirmas de una manera no tipológica, lo que podría abrir un nuevo camino. para descubrir vida estructuralmente distinta de la que conocemos, y también permitirá una mejor comprensión de la vida tal como la conocemos en nuestro planeta.

Palabras clave: Biofirmas, concepto de vida, química prebiótica.

Citar como:

Torres de Farias, S. (2024). La vida en Marte: ¿Qué puede decirnos el uso de biofirmas sobre nuestra comprensión del proceso de la vida? *Revista Científica de Astrobiología*, 1(1), 31-40. <http://doi.org/10.1234/aspast.v1n1.1>

SCIENCE OUTREACH ARTICLE

Life on Mars: What can the use of biosignatures tell us about our comprehension of life process?

Sávio Torres de Farias^{1,2}

¹Laboratório de Genética Evolutiva Paulo Leminski, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, Paraíba, Brazil.

²Network of Researchers on the Chemical Evolution of Life (NoRCEL), Leeds LS7 3RB, UK.

Email: stfarias@yahoo.com.br

<https://orcid.org/0000-0002-2997-3629>

Received: 05/07/2024 • Reviewed: 13/07/2024 • Accepted: 22/07/2024

Abstract

Astrobiology is one of the fastest expanding scientific fields today. Among the various issues that this area of knowledge faces, the search for life outside our planet proves to be especially challenging. When it comes to identifying life beyond our planet, one of the most difficult challenges is the use of biosignatures. Biosignatures can be seen as any molecule or process, that comes from biological activity and can indicate the existence of life at some point, in the present or past, in each environment. The identification of biosignatures that can clearly distinguish between evidence of life or just an artifact produced by other natural processes represents a practical and theoretical challenge for astrobiology. Given the complexity of this discussion, several points must be addressed, the possible chemical reactions given the local conditions of the environment to be studied, the universality of the phenomenon of life as we know it on our planet, what we understand as the essence of the phenomenon of life, among others. The choice of biosignatures that may reveal signs of life must comply with several criteria that seek to eliminate or minimize the possibility of false positives. Here, I hope to discuss the implications of using biosignatures considering recent advances in prebiotic chemistry, as well as new conceptual frameworks for the phenomenon of life and its implications for the development of biosignatures in a non-typological way, which could open a new way to discover life structurally distinct from what we know, as well as will enable a better understanding of life as we know it on our planet.

Keywords: Biosignatures, Life concept, prebiotic chemistry

Cite as:

Torres de Farias, S. (2024). La vida en Marte: ¿Qué puede decirnos el uso de biofirmas sobre nuestra comprensión del proceso de la vida? *Revista Científica de Astrobiología*, 1(1), 31-40. <http://doi.org/10.1234/aspast.v1n1.1>

Introduction

In 1971, two years after the first man stepped foot on the moon, English singer David Bowie released his fourth album, *Hunky Dory*, which included the song "Life on Mars?" According to Bowie, the lyrics of this song were "a sensitive reaction of a young girl to the media". The question expressed in the song's title accurately represents society's perception of advances in space research at the time. This song recently celebrated its 50th anniversary, and the iconic question has remained in society's imagination while also becoming a fertile field of scientific investigation. Astrobiology is a large scientific field whose scope includes the search for life beyond our planet as well as the relationship of life with the universe. Astrobiology is one of the fastest-growing scientific fields today. One of the primary reasons for this rapid expansion is the multidisciplinary nature of this area, which brings together physics, chemistry, biology, philosophy, and other fields of knowledge in a collaborative effort. Reflections on the diversity of astrobiology-related areas reveal an infinite number of issues that have been addressed from the most diverse perspectives to better understand what characterizes and supports life on our planet, and based on this understanding, we seek evidence or elements that can support life in other environments outside our planet (Blumberg, 2011). One of the major topics of debate in astrobiology is the search for biosignatures that can be used to indicate the possibility of extraterrestrial life (Westall and Cockell, 2016, Walker et al., 2018, Catling et al., 2018, Schwieterman et al., 2018, Marshall et al., 2021, Green et al., 2021). Biosignatures can be seen as any molecule or process, that comes from biological activity and can indicate the existence of life at some point, in the present or past, in each environment. Advances in space observation and exploration technologies have allowed open new horizons in the search for life outside our planet.

The possibility of carrying out studies that reveal the composition of a given planet has been heating up theoretical discussions about how we can differentiate, on these planets, compounds originating from purely chemical processes from those that can be generated by biological activity. At the heart of this discussion is the search for biosignatures that are universally produced by biological activity. Clearly this is not a simple activity, since compounds produced on our planet by biological activity can often be produced on other planets, under other conditions, as part of permitted or possible chemical reactions (Fujii et al. 2018, Schwieterman et al., 2018, Catling et al., 2018, Meadows et al., 2018, Martins 2020) Clearly, the search for good biosignatures has a background in life as we know it on Earth, and we cannot escape the constraints involved in solving this problem. In this regard, many of the biosignatures that are discussed and used today are the result of metabolic pathways found in specific groups of organisms. I must emphasize that the observations I punctuated are not only in the sense that we may not be observing life forms based on different organizations and structures using terrestrial biosignatures, but also the implications of finding signs of life using the biosignatures observed in organisms as we know them.

In this sense, we cannot leave aside the discussion of how we understand the phenomenon of life, and in this discussion, we cannot focus on groups of molecules or processes, but on what really distinguishes the phenomenon of life from other natural phenomena. It is undeniable that life is the result of a differentiated organization of matter, so we must ask ourselves, what new and exclusive property emerged from this new organization of matter that we can call life? The discovery of biosignatures as well as life beyond our planet should spark important debates about how we understand life as a phenomenon in the universe. In this essay, I will seek to explore new findings from pre-biotic chemistry, as well as new

views on the nature of the phenomenon of life and how these points can be incorporated into the discussion on biosignatures, as well as, I will also discuss the consequences of the possibility of the existence of life outside our planet and how can change our view of life as we know it.

Biosignatures, origin of life and prebiotic chemistry

The search for understanding the conditions and phenomena that led to the organization of matter to the formation of life has been a field of intense debate. The identification of the transition point between the living and the non-living is essential for the development of models and concepts that better describe the phenomenon of life. In this sense, different points of view regarding the moment in which life emerged lead to different understandings of what characterizes this phenomenon. These questions have a profound impact on the formulation of experiments that seek to identify the possibility of life outside our planet, as they can lead to the search for processes that do not reveal the possibility of life, but only which necessary elements would be present in certain environments, however without describing the other conditions for these elements to organize and interact to structure life. Thus, we must look at what the phenomenon of life is from a broader perspective, moving away from the typological characteristics of living beings that we know and focusing on the processes that distinguish the phenomenon of life from the non-living organization of matter. Many of the methods for detecting biological activity outside our planet are based on determining the composition of the atmosphere of the planet under analysis, as well as studies on our planet that show that such compounds are produced exclusively by biological activity. Furthermore, recent missions to the planet Mars have collected and analyzed the composition of this planet and assessed whether there is any evidence of past or present life. However, all of these approaches are anchored in characteristics observed in organisms on our planet, which has evidently limited our detection power.

The astrobiology community is increasingly concerned with how to improve the accuracy of biosignature detection. These efforts have recently been seen in the work of Green et al. (2021) and the report of the NASA workshop on life detection (2021). Green et al. (2021) raises several current issues, both in detecting signs of life beyond our planet and in how these results are presented to the scientific community and society, which can lead to misunderstandings about the true scientific value of such results. As a result, it proposes a progressive scale that can aid identify the signs until a positive result is confirmed. Green et al. (2021) highlights the environmental relevance of such signals, the discrimination of abiotic false positives, the identification of other biosignatures together, the elimination of alternative hypotheses that could explain the detected signal, and contamination with materials from our planet as important points. In a complementary sense, the report of the NASA workshop on life detection (2021) starts off one broad discussion about the possible origins of biosignatures, raising critical questions in the most diverse directions and prompting us to think more carefully about the possible outcomes and their implications for detecting life beyond our planet. One of the points raised, which I believe is critical to emphasize, is the importance of taking a closer look at the results of prebiotic chemistry studies when deciding and interpreting positive results on biological signals. At this point, I would like to suggest a thought experiment. Assume we discover signs of life on Mars using biosignatures derived from terrestrial organisms. The first question is whether this reaction can occur in the absence of life. Although it may appear to be a trivial question for researchers, new prebiotic chemistry elements can lead to new ways of interpreting this

type of data. Several studies have shown that many basal metabolic pathways, such as glycolysis (Keller et al., 2014), pentose pathway (Keller et al., 2016), citric acid cycle (Muchowska et al., 2019), and others (Barge et al., 2020) can occur with chemical catalysts under prebiotic conditions. These findings raise new questions about how life might have evolved on our planet, as we can imagine that some of the most fundamental metabolic pathways could have existed in a prebiotic environment and that life co-opted these reactions for its survival. Take, for example, pyruvate, the product of the glycolytic pathway, but we can think of any other product of the basal metabolic pathways. Currently, practically all pyruvates found on our planet are products of biological activity, so we can infer that if we find pyruvate on another planet, we have a strong indication of biological activity on that planet. However, studies have shown that under prebiotic conditions, it is possible that practically all glycolysis reactions occur with chemical catalysts (Keller et al., 2014, 2016).

Considering these new data, some authors have proposed that several metabolic pathways considered exclusively biological may have emerged from the chemistry possible in the atmospheric conditions of primitive Earth and were incorporated by organisms during the maturation process of biological systems (Prosdocimi and Farias 2022). Thus, these new data pose new challenges, because, if we find a biosignature, we must know whether under the conditions of that planet this biosignature can be produced by non-biological processes. So, how are we to interpret the identification of biosignatures on another planet? Were they real signs of life? Or could they indicate signs of the possibility of life development? We can think that what we now know as the products of living organisms may have been products of prebiotic chemistry on early Earth. These points were raised at the NASA workshop on life detection and should be debated and evaluated more thoroughly, including incorporation into biosignature detection protocols like the one proposed by Green et al (2021). In this regard, another point to consider in this discussion is the possibility of testing the synthesis of biotic compounds on Mars under prebiotic conditions. We currently have a lot of knowledge about the current atmosphere (Changela et al. 2021), as well as good evidence of Mars' primitive atmosphere (Kobayashi et al. 1997), which allows for experiments to be carried out to see if the synthesis of compounds that can support the organization and maintenance of a biological system is possible in such conditions (Kobayashi et al. 1999).

Concepts of life and biosignatures

The search for and the identification of biosignatures that can really distinguish abiotic events from biotic events requires a deep understanding of what the phenomenon of life is in a universal context, in addition to a prior understanding of the biology of known organisms. In this context, the formulation of more precise concepts or those that point to universal characteristics is necessary for broader biosignature formulations. Despite having more than 100 conceptual formulations about the phenomenon of life, we still have difficulties obtaining a widely accepted concept that does not present exceptions within our knowledge of life on Earth. Farias et al. (2021) divide conceptual formulations about life into three major groups: those based on physical characteristics, those based on cellular structure, and those based on molecular structure. Cellular and molecular approaches to conceptualizing life are currently the most accepted and used, even if indirectly, in the choice of biosignatures, since the metabolic processes of organisms that fit these concepts are preferred. Evidently, we cannot claim that such choices are wrong, as they are within

the known spectrum of biological activity. However, both concepts based on cellular structures and on molecular structures use the typological organization of living beings as an argument, which at first may not represent a problem if life is organized on other planets with a typology like the one that we know for the planet Earth. However, this type of approach restricts our observational power, not allowing us to identify the phenomenon of life if it is organized under another typological structure. In the present context, we must understand typological characteristics as the physical characteristics presented by living beings. In this sense, the physical approach is broader in terms of the possibility of identifying phenomena that we could infer as alive. However, the physical approach, due to its amplitude power, cannot make a clear conceptual distinction, even on our planet, between merely physical events and biological events. Several authors have proposed a change to the conceptual paradigm in order to solve this impasse, shifting the conceptual analysis of biological entities to the processes performed by these entities (Dupré and Nicholson, 2018, Simons 2018, Farias et al. 2021). This type of approach seeks to evade typological characterization, thus concentrating its efforts on general processes that may occur under another typological framework, but which we can identify as processes carried out by living organisms. Dupré and Nicholson (2018) argue that even entities can be understood as specific temporal stages of stable processes. The spatial-temporal organization processes, together with their causal and temporal relationships with other processes, will determine the stability and persistence of those entities. Simons (2018) suggested that material entities should be understood as some sort of precipitation of the processes that maintain and stabilize them. Farias et al. (2021) analyzed the structures or processes that are unique and exclusive to living beings and propose that the processing of encoded information is a characteristic that is present in all living beings and is exclusive to this type of organization, making it impossible to identify encoded information outside the biological sphere.

A similar approach had already been suggested by Claus Emmeche (1998), who proposed that the concept of life should be based on the code-structural nature of biological systems. For this author, "life is the functional interpretation of signs in self-organizing material 'code-systems' that construct their own 'umwelts'" (Emmeche, 1998). In a similar sense, Sebeok (1988) proposes that semiosis is what distinguishes all that is animate from the lifeless. Their studies have established important characteristics identified in biological codes, such as: (i) the code must connect two words, one defined as the signal and the other described as the biological sense; (ii) a code must have an adapter that establishes the rules of correlation and makes contact between the signal and its meaning; and, (iii) the code must be a natural convention; even if the information is changed experimentally, it must still act as a code (Barbieri, 2014; Hofmeyr, 2018). Thus, we suggest that such observations about biological systems be considered in the process of identifying and selecting biosignatures, as approaches such as those indicated can expand the search field and identify the phenomenon of life regardless of the typological structure in which such a phenomenon is structured on another planet. Evidently, we must not abandon typological approaches in the study of biosignatures, but rather incorporate concepts that can increase our exploratory power. The development of markers that can identify coded information processing structures could represent a new milestone in the exploration of environments outside our planet.

What if we find life on mars?

Another situation that we should investigate is whether we confirm the existence of organisms outside our planet. How can this discovery change the way we understand the phenomenon of life on our planet? Currently, we have extensive knowledge of how life may have emerged and evolved on our planet. Our data indicate that life as we know it had a unique origin and diversified through processes such as mutation, natural selection, gene drift, migration, among others. The use of biosignatures based on the organisms we know has as a background the idea that the processes that led to the formation of living beings on planet Earth can be universal and that the processes carried out by living beings, given the appropriate conditions, would occur in a similar way off our planet. This idea, in a way, has principles contrary to knowledge about current evolutionary biology. In this way, the discovery of life outside our planet can drastically change the fundamentals that support the understanding of life on our own planet. Let us imagine the following situation: We found life on Mars, and when we analyze these Martian organisms, we identify that they have DNA as an informational molecule, have certain metabolic pathways in common with terrestrial organisms, as well as a similar structural organization. How can we eliminate the possibility of terrestrial contamination on Mars? At first, the general organization of these bodies would be similar. Could we think that life originated elsewhere in space and dispersed to Earth and Mars independently? Or is life a deterministic process in the universe and thus, given the proper circumstances, life could appear similarly at different points in the universe? If we have an affirmative answer to the last question, could we say that the evolutionary process that guides life on our planet would be a universal process? Is life a cosmic imperative? and thus always organizing under the same rules and operation?

In addition to the possible consequences in our scientific understanding of biological processes, we cannot forget the profound changes that such data can generate in human social bases. The perception that life is not an organization exclusive to planet Earth can affect several fields of human understanding, among them, we can mention discussions involving religious aspects, our relationship with our planet and the changes it has been going through in last years, among others. These questions may appear trivial, but by delving deeply into them and considering the implications of each possible answer, we can start a broad discussion about the true nature of life on our planet, which will undoubtedly improve the resolution of our search tools for life on other planets. In this way, we can also believe that by focusing on the issues presented, new ways of thinking about space exploration can be evidenced.

Last considerations

For decades, artists and scientists have been inspired by the search for life beyond our planet. Advances in knowledge about living beings, as well as advances in technology, have made it increasingly possible to explore environments beyond our planet. In this sense, astrobiology has solidified itself as the science of the future, bringing together disparate fields to both understand more and more life on our planet and increase the likelihood of finding similar phenomenon in other parts of the universe. The correct use of biosignatures proves difficult not only for correctly identifying a true vital signal, but also to interpret this phenomenon as universal.

Astrobiology philosophy must anticipate facts and devise ways to interpret future discoveries that have the potential to profoundly impact our understanding of how we un-

derstand life on our own planet. In this context, to improve the potential for detecting life outside our planet, we cannot leave aside new data on the chemical possibilities in atmospheres with conditions different from ours, as well as new discussions about what and how we understand the phenomenon of life. These two new approaches can add to the existing ones and help us to put together this picture of how life may have emerged and whether this process that led to the emergence of life is exclusive to an extremely particular condition that existed on primitive Earth, or if it is a cosmic imperative and has been repeating itself in different parts of the universe. So, I end this brief essay with the following question: if we find life on Mars, what would that mean?

References

- Barbieri, M. (2014). From Biosemiotics to Code Biology. *Biological Theory*, 9, 239–249.
- Barge, L. M., Flores, E., VanderVelde, D. G., Weber, J. M., Baum, M. M., & Castonguay, A. (2020). Effects of geochemical and environmental parameters on abiotic organic chemistry driven by iron hydroxide minerals. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(11), e2020JE006423. <https://doi.org/10.1029/2020JE006423>
- Blumberg, B. S. (2011). Astrobiology, space and the future age of discovery. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369(1936), 508–515. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0239>
- Catling, D. C., Krissansen-Totton, J., Kiang, N. Y., Crisp, D., Robinson, T. D., DasSarma, S., Rushby, A. J., Del Genio, A., Bains, W., & Domagal-Goldman, S. (2018). Exoplanet Biosignatures: A Framework for Their Assessment. *Astrobiology*, 18(6), 709–738. <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1737>
- Changela, H. G., Chatzitheodoridis, E., Antunes, A., Beaty, D., Bouw, K., Bridges, J. C., Capova, K. A., Cockell, C. S., Conley, C. A., Dadachova, E., Dallas, T. D., de Mey, S., Dong, C., Ellery, A., Ferus, M., Foing, B., Fu, X., Fujita, K., Lin, Y., Jheeta, S., Hicks, L. J., Hu, S., Kereszturi, A., Krassakis, A., Liu, Y., Oberst, J., Michalski, J., Ranjith, P. M., Rinaldi, T., Rothery, D., Stavrakakis, H. A., Selbmann, L., Sinha, R. K., Wang, A., Williford, K., Vaci, Z., Vago, J. L., Waltemathe, M., & Hallsworth, J. E. (2021). Mars: New Insights and Unresolved Questions. *International Journal of Astrobiology*, 20(6), 394–426. <https://doi.org/10.1017/S1473550421000276>
- Dupré, J., & Nicholson, D. (2018). A manifesto for a processual philosophy of biology. In D. J. Nicholson & J. Dupré (Ed.). *Everything flows: Towards a processual philosophy of biology* (pp. 3–45). Oxford, United Kingdom.
- Emmeche, C. (1998). Defining life as a semiotic phenomenon. *Cybernetics And Human Knowing*, 5(1), 3–17.
- Farias, S. T., Prosdociimi, F., & Caponi, G. (2021). Organic Codes: A Unifying Concept for Life. *Acta biotheoretical*, 69(4), 769–782. <https://doi.org/10.1007/s10441-021-09422-2>
- Fujii, Y., Angerhausen, D., Deitrick, R., Domagal-Goldman, S., Grenfell, J. L., Hori, Y., Kane, S. R., Pallé, E., Rauer, H., Siegler, N., Stapelfeldt, K., & Stevenson, K. B. (2018). Exoplanet Biosignatures: Observational Prospects. *Astrobiology*, 18(6), 739–778. <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1733>
- Green, J., Hoehler, T., Neveu, M., Domagal-Goldman, S., Scalice, D., & Voytek, M. (2021). Call for a framework for reporting evidence for life beyond Earth. *Nature*, 598(7882), 575–579. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03804-9>

- Hofmeyr, J. S. (2018). The first Special Issue on code biology - A bird's-eye view. *Biosystems*, 164, 11-15. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2017.12.007>
- Marshall, S. M., Mathis, C., Carrick, E., Keenan, G., Cooper, G., Graham, H., Craven, M., Gromski, P. S., Moore, D. G., Walker, S. I., & Cronin, L. (2021). Identifying molecules as biosignatures with assembly theory and mass spectrometry. *Nature Communication*, 12(1), 3033. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23258-x>
- Martins, Z. (2020). Detection of Organic Matter and Biosignatures in Space Missions. *Current issues in molecular biology*, 38(1), 53–74. <https://doi.org/10.21775/cimb.038.053>
- Meadows, V. S., Reinhard, C. T., Arney, G. N., Parenteau, M. N., Schwieterman, E. W., Domagal-Goldman, S. D., Lincowski, A. P., Stapelfeldt, K. R., Rauer, H., DasSarma, S., Hegde, S., Narita, N., Deitrick, R., Lustig-Yaeger, J., Lyons, T. W., Siegler, N., & Grenfell, J. L. (2018). Exoplanet Biosignatures: Understanding Oxygen as a Biosignature in the Context of Its Environment. *Astrobiology*, 18(6), 630–662. <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1727>
- Muchowska, K. B., Chevallot-Beroux, E., & Moran, J. (2019). Recreating ancient metabolic pathways before enzymes. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 27(12), 2292–2297. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2019.03.012>
- Keller, M. A., Turchyn, A. V., & Ralser, M. (2014). Non-enzymatic glycolysis and pentose phosphate pathway-like reactions in a plausible Archean ocean. *Molecular Systems Biology*, 10(4), 725. <https://doi.org/10.1002/msb.20145228>
- Keller, M. A., Zylstra, A., Castro, C., Turchyn, A. V., Griffin, J. L., & Ralser, M. (2016). Conditional iron and pH-dependent activity of a non-enzymatic glycolysis and pentose phosphate pathway. *Science Advance*, 2(1), e1501235. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501235>
- Kobayashi, K., Sato, T., Kajishima, S., Kaneko, T., Ishikawa, Y., & Saito, T. (1997). Possible complex organic compounds on Mars. *Advances in Space Research*, 19(7), 1067–1076. [https://doi.org/10.1016/s0273-1177\(97\)00355-4](https://doi.org/10.1016/s0273-1177(97)00355-4)
- Kobayashi, K., Kaneko, T., & Saito, T. (1999). Characterization of complex organic compounds formed in simulated planetary atmospheres by the action of high energy particles. *Advances in Space Research*, 24(4), 461–464. [https://doi.org/10.1016/s0273-1177\(99\)00088-5](https://doi.org/10.1016/s0273-1177(99)00088-5)
- Prosdocimi, F., & Farias, S. T. (2022). Entering the labyrinth: A hypothesis about the emergence of metabolism from protobiotic routes. *BioSystems*, 220, 104751. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2022.104751>
- Schwieterman, E. W., Kiang, N. Y., Parenteau, M. N., Harman, C. E., DasSarma, S., Fisher, T. M., Arney, G. N., Hartnett, H. E., Reinhard, C. T., Olson, S. L., Meadows, V. S., Cockell, C. S., Walker, S. I., Grenfell, J. L., Hegde, S., Rugheimer, S., Hu, R., & Lyons, T. W. (2018). Exoplanet Biosignatures: A Review of Remotely Detectable Signs of Life. *Astrobiology*, 18(6), 663–708. <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1729>
- Sebeok, T. A. (1988). Communication, language and speech: Evolutionary considerations. In: Herzfeld, Michael; Melazzo, Lucio (Eds.), *Semiotic Theory and Practice: Proceedings of the Third International Congress of the IASS Palermo*, (Vol. II. pp. 1083–1091). Mouton de Gruyter.
- Simons, P. (2018). Process and precipitates. In D. J. Nicholson & J. Dupré (Ed), *Everything flows: Towards a processual philosophy of biology* (pp. 49-60), Oxford, United Kingdom.
- Walker, S. I., Bains, W., Cronin, L., DasSarma, S., Danielache, S., Domagal-Goldman, S.,

- Kacar, B., Kiang, N. Y., Lenardic, A., Reinhard, C. T., Moore, W., Schwieterman, E. W., Shkolnik, E. L., & Smith, H. B. (2018). Exoplanet Biosignatures: Future Directions. *Astrobiology*, 18(6), 779–824. <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1738>
- Westall, F., & Cockell, C. S. (2016). Biosignatures for Astrobiology. *Origin of Life and Evolution of Biospheres*, 46(1), 105–106. <https://doi.org/10.1007/s11084-015-9459-9>.