

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 (Cortese 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 (Cortese, 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 (Cortese 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

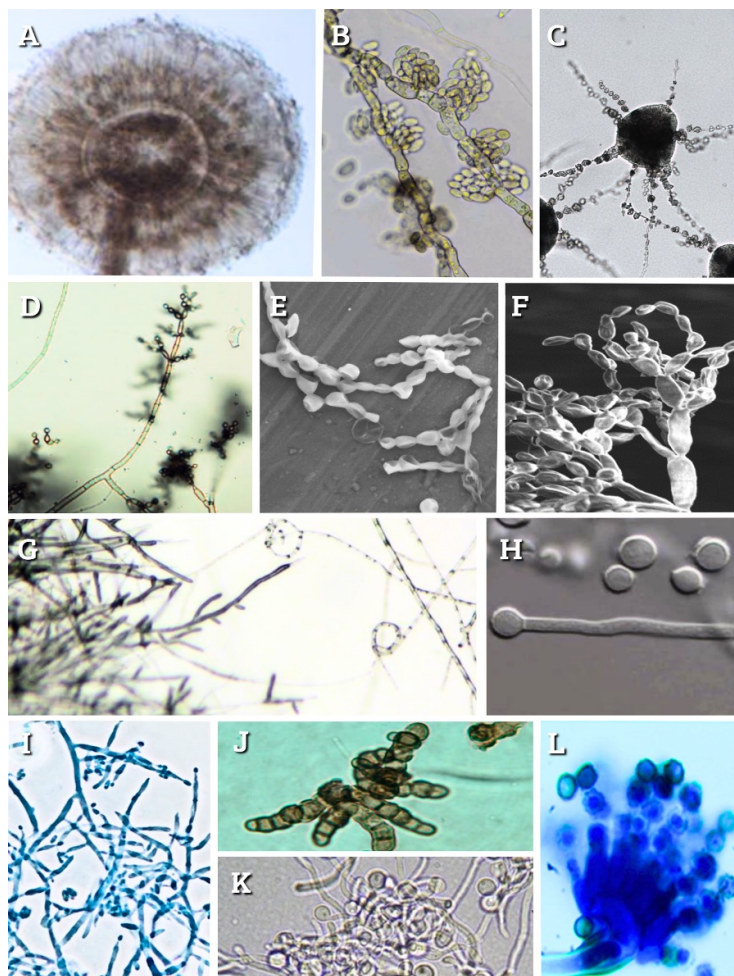


Nota. Imagen de la Estación Espacial Internacional (ISS), fotografiada por uno de los miembros de la tripulación de la misión STS-105 desde el transbordador Discovery después de separarse de la ISS (Créditos: Nasa).

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

- fungal 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>
- Cortesão, M. F. (2022). *Morphological and molecular adaptation of Aspergillus niger to simulated spaceflight and Mars-like conditions*. [Thesis]. University Goettingen Repository, Alemanha.
- Cortesão, 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
- Cortesão, 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>