

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Astrobiología de Tardígrados: Evaluación de su potencial para la vida en condiciones extremas

Luis Allcahuaman-Huauya^{1 2}

<https://orcid.org/0000-0001-7470-8579>

¹Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú

²Proyecto Tardígrado, Lima, Perú

E-mail: luis.allcahuaman.h@upch.pe

Recibido: 02/04/2025 • Revisado: 25/04/2025 • Aceptado: 07/05/2025

Resumen

Los tardígrados son organismos extremófilos que han demostrado una notable capacidad de supervivencia en condiciones adversas, lo que los convierte en sujetos de interés en astrobiología. El objetivo de este trabajo de revisión es analizar los mecanismos de resistencia de los tardígrados y evaluar su potencial para la vida en entornos extremos. Se revisan estudios recientes que investigan su tolerancia al vacío espacial, radiación y deshidratación, utilizando una metodología que incluye la recopilación y análisis de datos de proyectos como TARSE y TARDIS. Estos estudios evidencian que los tardígrados en anhidrobiosis presentan tasas de supervivencia superiores a las de los hidratados, destacando el papel de las proteínas de choque térmico y antioxidantes en la protección celular. Sin embargo, persisten limitaciones en la identificación de bioprotectores específicos y en la generalización de resultados entre diferentes especies. Además, las simulaciones de ambientes extraterrestres no han capturado completamente las condiciones reales que enfrentarían los tardígrados. Este trabajo concluye que, aunque los tardígrados son modelos prometedores para estudiar la vida en condiciones extremas, se requiere una investigación más integrada para comprender completamente los mecanismos moleculares y bioquímicos que sustentan su resistencia.

Palabras clave: Tardigrada, extremófilo, resistencia, bioprotector.

Citar como:

Allcahuaman-Huauya, L., Macedo-Bedoya, J., Calderón Ayala, L., & Vicente Ruiz, H. L. (2024). Astrobiología de Tardígrados: Evaluación de su potencial para la vida en condiciones extremas *Revista Científica de Astrobiología*, 2(1), 32–39. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n1.3>

RESEARCH ARTICLE

Astrobiología de Tardígrados: Evaluación de su potencial para la vida en condiciones extremas

Luis Allcahuaman-Huauya^{1 2}

<https://orcid.org/0000-0001-7470-8579>

¹Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú

²Proyecto Tardígrado, Lima, Perú

E-mail: luis.allcahuaman.h@upch.pe

Received: 02/04/2025 • Reviewed: 25/04/2025 • Accepted: 07/05/2025

Abstract

Tardigrades are extremophilic organisms that have demonstrated remarkable survival capabilities under adverse conditions, making them subjects of interest in astrobiology. The objective of this review is to analyze the resistance mechanisms of tardigrades and evaluate their potential for life in extreme environments. Recent studies investigating their tolerance to vacuum, radiation, and desiccation are reviewed, using a methodology that includes the collection and analysis of data from projects such as TARSE and TARDIS. These studies show that tardigrades in anhydrobiosis exhibit higher survival rates than hydrated ones, highlighting the role of heat shock proteins and antioxidants in cellular protection. However, limitations remain in identifying specific bioprotectors and generalizing results across different species. Additionally, simulations of extraterrestrial environments have not fully captured the real conditions that tardigrades would face. This work concludes that, while tardigrades are promising models for studying life in extreme conditions, more integrated research is needed to fully understand the molecular and biochemical mechanisms underlying their resistance.

Keywords: Tardigrada, extremophile, resistance, bioprotector.

Cite as:

Allcahuaman-Huauya, L. (2025). Evaluación de la supervivencia de los tardígrados en anoxibiosis: Límites de la criptobiosis en condiciones extremas. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(1), 32–39. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n1.3>

Introducción

Los científicos han encontrado organismos capaces de tolerar ambientes extremos en nuestro planeta, como *Pyrococcus furiosus* (Archaea) del Valle de la Muerte, *Colwellia* MT41 (Bacteria) de la Fosa de Challenger, *Artemia* del Mar Muerto (Crustáceo) (Swathi y Sravanti, 2020), *Friedmanniomyces endolithicus* de los valles secos antárticos de McMurdo (Coleine et al., 2020) y *Deinococcus peraridilitoris* del desierto de Atacama (Orellana et al., 2018). Asimismo, se ha hallado que los tardígrados son tolerantes y sintetizan compuestos protectores en su interior, lo que los convierte en un modelo de estudio en Astrobiología (Jönsson, 2007).

El término "tardígrado" significa "movimiento lento", nombre dado por el investigador Spallanzani (Sadowska-Bartosz y Bartosz, 2024). Son invertebrados microscópicos cilíndricos que miden hasta 2.1 mm de longitud, conformados por un segmento con cabeza, boca y ojos muy pequeños, mientras que los cuatro segmentos restantes están provistos de cuatro pares de patas. Además, Heterotardigrada y Eutardigrada son dos clases dentro de este phylum (Weronika y Łukasz, 2017), y habitan en ambientes terrestres (musgos, líquenes, suelo y hojarasca), marinos y limnoterrestres (Guidetti et al., 2011).

Los tardígrados son capaces de adoptar una forma esférica, conocida como "tun", donde la cabeza y las extremidades se contraen en dirección anteroposterior como resultado de cambios fisiológicos y anatómicos. En este estado, la tasa metabólica disminuye (Kasianchuk et al., 2023), la cantidad de agua corporal se evapora y la permeabilidad cuticular se reduce (Sadowska-Bartosz y Bartosz, 2024). La Proteína Asociada al ADN (Dsup) y las proteínas antioxidantes están presentes en el estado "tun" (Neves et al., 2020), lo que les confiere resistencia a bajas y altas temperaturas, radiación ionizante y no ionizante, ausencia de agua, compuestos tóxicos y escasez de oxígeno (Møbjerg y Neves, 2021). La forma "tun" representa un estado de suspensión metabólica reversible, conocido como criptobiosis, que se clasifica en cuatro tipos: anhidrobiosis, criobiosis, anoxibiosis y osmobiosis (Heidemann et al., 2016). La anhidrobiosis es inducida por la falta de agua en el entorno; la criobiosis es una respuesta a la baja temperatura; la osmobiosis es el resultado de cambios en las condiciones osmóticas; y la anoxibiosis es causada por la falta de oxígeno (Møbjerg y Neves, 2021).

En la actualidad, se han realizado diferentes experimentos para evaluar la supervivencia de los tardígrados. *Hypsibius exemplaris* posee genes capaces de detectar rayos ionizantes, manteniendo la integridad del ADN y activando constantemente la reparación del material genético (Clark-Hatchel et al., 2023). Por otro lado, Saigo et al. (2024) realizaron una comparación entre un tardígrado sensible a la desecación, *Grevenius myrops*, y *Ramazzottius varieornatus*. Ambos especímenes fueron sometidos a distintas dosis de radiación gamma, donde la esperanza de vida y las ovoposiciones de *Grevenius myrops* se vieron afectadas significativamente en comparación con *Ramazzottius varieornatus*. Otro estudio menciona que tanto el estado activo como el de criptobiosis del tardígrado *Paramacrobiotus areolatus* soporta la radiación X (May et al., 1964). Los especímenes limnoterrestres de tardígrados poseen la capacidad de tolerar altas dosis de radiación (Jönsson, 2019), donde distintos compuestos protectores actúan evitando la aparición de errores y la muerte celular. El objetivo de este trabajo es detallar, a través de búsquedas bibliográficas, los bioprotectores que se han estudiado y descubierto en las investigaciones sobre tardígrados en proyectos espaciales.

METODOLOGÍA

En el estudio sobre los tardígrados y sus bioprotectores en proyectos espaciales, se establecieron criterios específicos para la selección de artículos que garantizaran la relevancia y calidad de la información recopilada. En primer lugar, se priorizó la relevancia temática, eligiendo aquellos artículos que abordaran la resistencia de los tardígrados en contextos espaciales y los bioprotectores que estos organismos sintetizan. Además, se incluyeron tipos de estudio variados, como investigaciones experimentales, revisiones y artículos que presentaran datos sobre proyectos espaciales relacionados con los tardígrados. La fecha de publicación también fue un factor importante, considerando artículos publicados entre 2007 y 2023 para asegurar que la información fuera actual y pertinente. Asimismo, se prestó atención a la calidad de la publicación, priorizando aquellos artículos que aparecieran en revistas científicas de alto impacto y revisadas por pares, como PLOS, Nature, Hindawi y Astrobiology. La accesibilidad de los artículos fue otro criterio, seleccionando aquellos disponibles en bases de datos accesibles como ScienceDirect, Scopus, SciELO y Dialnet. Por último, se buscó incluir una diversidad de especies de tardígrados para obtener una visión más amplia de sus capacidades bioprotectoras. El tipo de revisión realizada fue principalmente una revisión bibliográfica, donde se llevó a cabo una recopilación y análisis exhaustivo de artículos relevantes sobre los tardígrados y sus bioprotectores en el contexto de proyectos espaciales. Se realizó un análisis comparativo entre diferentes estudios para identificar similitudes y diferencias en los hallazgos sobre los bioprotectores y la resistencia de los tardígrados. Finalmente, se llevó a cabo una síntesis de resultados que permitió ofrecer una visión general de los bioprotectores identificados y sus aplicaciones potenciales en campos como la agricultura, la medicina espacial y la medicina regenerativa.

RESULTADOS

En los últimos años, los tardígrados han capturado la atención de la comunidad científica, no solo por su resistencia a condiciones extremas, sino también por los bioprotectores que sintetizan, los cuales tienen implicaciones significativas en proyectos espaciales. Dos proyectos destacados, TARSE y TARDIKISS, han permitido explorar en profundidad estas capacidades.

Proyecto TARSE

Se centró en el envío de poblaciones de *Macrobiotus richtersi* a la órbita terrestre baja durante 12 días, tanto en estado deshidratado como hidratado. Los resultados del experimento revelaron que los tardígrados en estado de anhidrobiosis mostraron tasas de supervivencia significativamente superiores en comparación con aquellos que estaban hidratados. Este hallazgo sugiere que la deshidratación no solo actúa como un mecanismo de supervivencia, sino que también potencia la resistencia de estos organismos frente a las condiciones extremas de microgravedad y radiación del espacio (Rebecchi et al., 2009). La evaluación de la resistencia de los tardígrados destacó que los porcentajes de supervivencia en estado de anhidrobiosis (grupos F1 y F2) eran notablemente mayores que los de los grupos hidratados (F3 y F4). Además, al comparar estos grupos con los tardígrados sometidos a condiciones simuladas del espacio en el laboratorio (TC4), (Figura 1) se confirmó que los invertebrados deshidratados son más resistentes ante los desafíos que presenta el entorno

espacial. Esto resalta la importancia de la anhidrobiosis como un estado adaptativo crucial para la supervivencia de los tardígrados en condiciones extremas (Rebecchi et al., 2009).

Figura 1

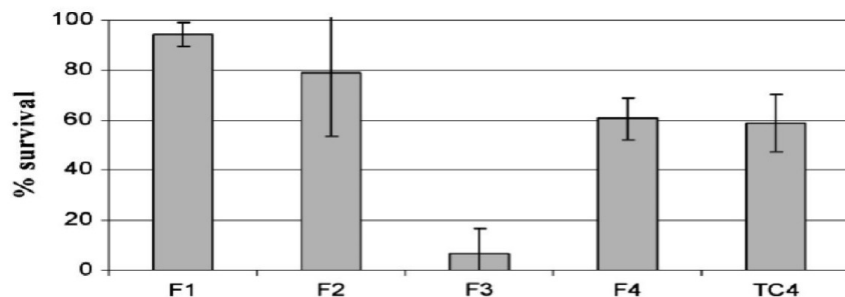


Figura 1. Poblaciones del *Macrobiotus richtersi* en el estado de anhidrobiosis (F1 y F2), hidratados (F3 y F4) y simulación espacial en laboratorio (TC4) (Extraído de Rebecchi et al., 2009).

Los estudios sobre los tardígrados enviados al espacio también revelaron la expresión de dos tipos de Proteínas de Choque Térmico (HSP 70 y HSP 90) en respuesta a condiciones de estrés ambiental (Figura 2). Estas proteínas desempeñan un papel fundamental en la protección celular, contribuyendo a la integridad y estabilidad de las organelas durante situaciones adversas. Además, se ha destacado la capacidad de los tardígrados para sintetizar antioxidantes, como el glutatión peroxidasa y la catalasa, que son esenciales para mitigar el daño oxidativo inducido por la radiación (Rebecchi et al., 2009).

Figura 2

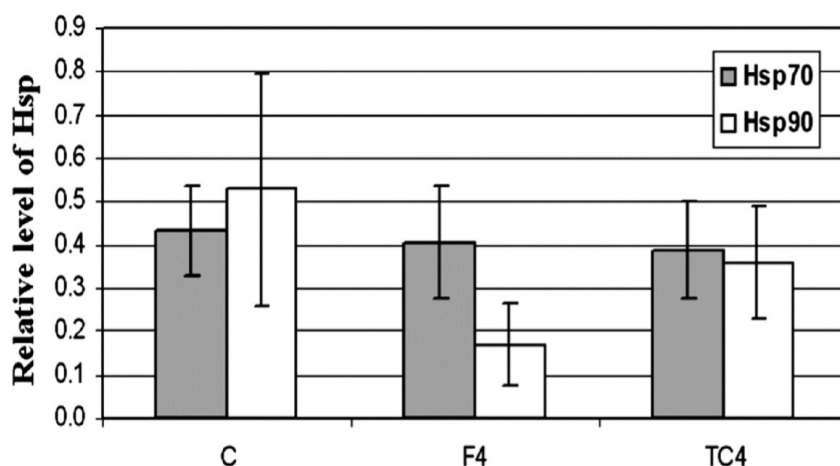


Figura 2. Poblaciones del *Macrobiotus richtersi* en el estado de anhidrobiosis (F1 y F2), hidratados (F3 y F4), simulación espacial en laboratorio (TC4) y control (T) (Extraído de Rebecchi et al., 2009).

Proyecto TARDIKISS

El Proyecto TARDIKISS amplió la investigación al comparar *Paramacrobiotus richtersi* con *Ramazzottius oberhaeuseri*. Este estudio no solo confirmó que ambos organismos pueden sintetizar moléculas protectoras en el espacio, sino que también reveló diferencias significativas en su contenido de proteínas totales y actividades enzimáticas. En particular, *Paramacrobiotus richtersi* mostró una mayor actividad de glutatión peroxidasa, lo que sugiere que este tardígrado podría ser más eficiente en la defensa contra el estrés oxidativo (Rizzo et al., 2015).

Otros proyectos espaciales

El Proyecto TARDIS se centró en evaluar la supervivencia de dos especies de tardígrados, *Richtersius coronifer* y *Milnesium tardigradum*, en condiciones extremas de vacío espacial (SV) y en una combinación de vacío espacial con radiación solar (SV + UVA, B). Durante 10 días, ambos especímenes fueron enviados a la Órbita Terrestre Baja, donde se observó que ambas poblaciones de microinvertebrados lograron sobrevivir en el vacío espacial. Sin embargo, la combinación de vacío espacial con radiación solar tuvo un impacto significativo en su supervivencia, afectando negativamente a ambos tipos de tardígrados (Jönsson et al., 2008). A pesar de estos hallazgos, no se lograron identificar las moléculas de protección que podrían haber influido en la resistencia de los tardígrados.

La investigación sobre la resistencia de los tardígrados, específicamente *Richtersius coronifer* y *Milnesium tardigradum*, ha sido objeto de estudios significativos como el Proyecto TARDIS y el proyecto RoTaRad. En el Proyecto TARDIS, se evaluó la supervivencia de estos microinvertebrados en condiciones extremas, incluyendo el vacío espacial (SV) y una combinación de vacío espacial con radiación solar (SV + UVA, B). Los resultados mostraron que ambas especies sobrevivieron en el vacío espacial, pero la combinación de vacío y radiación solar tuvo un impacto negativo considerable en su supervivencia (Jönsson et al., 2008). Sin embargo, una limitación notable de este estudio fue la falta de análisis sobre las moléculas de protección que podrían haber influido en la resistencia de los tardígrados.

Por otro lado, el proyecto RoTaRad se centró en el efecto de la radiación cósmica sobre *Richtersius coronifer* en la Órbita Terrestre Baja durante un periodo de 14 días. Los hallazgos indicaron que la tasa de supervivencia fue mayor en condiciones de baja dosis de radiación cósmica (CR 2 mGy), mientras que una dosis alta (CR 4 Gy) resultó en una disminución significativa de la supervivencia (Persson et al., 2011). Al igual que en el Proyecto TARDIS, los investigadores del RoTaRad no analizaron los compuestos químicos protectores que podrían haber contribuido a la supervivencia de los tardígrados.

Ambos estudios destacan la notable capacidad de los tardígrados para sobrevivir en condiciones extremas, pero también ponen de manifiesto una brecha crítica en la investigación: la falta de comprensión sobre los mecanismos moleculares y los factores bioquímicos que les permiten resistir tales condiciones. Esta omisión sugiere la necesidad de investigaciones futuras que se centren en identificar y analizar los bioprotectores involucrados en la supervivencia de estos organismos, lo que podría tener implicaciones significativas tanto en la biología de los tardígrados como en la búsqueda de vida en entornos extraterrestres.

Trabajos en laboratorio

La investigación sobre la supervivencia de tardígrados en condiciones extremas ha cobrado relevancia en los últimos años, especialmente en el contexto de la astrobiología y la búsqueda de vida en otros planetas. Un estudio significativo fue el realizado por Johnson et al. (2011), que simuló el ambiente marciano para evaluar la tolerancia de *Ramazzotius varieornatus* en estado de criptobiosis. Las condiciones experimentales, que incluyeron temperaturas que oscilaban entre -40 y 24 °C, radiación ultravioleta de 200 a 400 nm, presiones atmosféricas de 10 a 22 mbar y una alta concentración de CO₂ (95.3%), demostraron que estos invertebrados podían sobrevivir a un entorno que se asemeja al de Marte. Este hallazgo sugiere la posibilidad de que organismos similares puedan existir en el planeta rojo, aunque la investigación no logró identificar los bioprotectores que podrían haber facilitado esta resistencia.

Por otro lado, el estudio de Wilanowska et al., (2024) sobre *Paramacrobiotus experimentalis* en presencia de sales de perclorato de magnesio aporta una perspectiva adicional sobre la tolerancia de los tardígrados a condiciones adversas. A pesar de que la tasa de supervivencia disminuyó con el aumento de la concentración de sal, la población mostró una notable capacidad para tolerar tanto la deshidratación como la toxicidad asociada. Sin embargo, se observó un impacto en el tamaño corporal de los individuos, lo que sugiere que, aunque los tardígrados pueden resistir condiciones extremas, estas pueden tener efectos adversos en su fisiología.

Ambos estudios resaltan la notable resistencia de los tardígrados, pero también subrayan una limitación importante en la investigación actual: la falta de identificación de las moléculas protectoras que les permiten sobrevivir en tales condiciones. Este vacío en el conocimiento plantea preguntas sobre los mecanismos moleculares subyacentes a su resistencia y sugiere la necesidad de investigaciones futuras que se centren en desentrañar estos procesos. En conjunto, estos hallazgos no solo amplían nuestra comprensión de la biología de los tardígrados, sino que también alimentan la hipótesis de la existencia de vida en ambientes extraterrestres.

DISCUSIÓN

La investigación sobre la resistencia de los tardígrados a condiciones extremas, como las del espacio, ha revelado mecanismos bioquímicos y proteicos esenciales para su supervivencia, destacando especialmente los proyectos TARSE y TARDIKISS. Estos estudios han proporcionado información valiosa sobre la actividad enzimática y el contenido de antioxidantes en respuesta a factores estresantes, como el vacío espacial. En particular, el proyecto TARSE mostró una influencia significativa de estos factores en la actividad enzimática, mientras que TARDIKISS evidenció una relación menos pronunciada, sugiriendo que la respuesta de los tardígrados puede variar según las condiciones específicas del vuelo espacial. Esto plantea interrogantes sobre su adaptabilidad y capacidad para regular sus mecanismos de defensa en diferentes entornos.

Un componente crucial en esta resistencia son las proteínas de choque térmico (HSP), especialmente la Hsp 70, que desempeña un papel vital en la reparación de daños tisulares y en la proteostasis celular (Jönsson y O'Schill, 2007, Hu et al., 2022). Estas proteínas no solo facilitan el plegamiento correcto de otras proteínas, sino que también degradan aquellas que no se pliegan adecuadamente, lo que es esencial para mantener la integridad celular (Hu et al., 2022). La activación de los factores de transcripción de choque térmico (HSF)

en respuesta a estresores resalta la complejidad de las vías de regulación que permiten a los tardígrados mantener su homeostasis celular (Hu et al., 2022). Este mecanismo es fundamental para entender cómo estos organismos pueden sobrevivir en condiciones extremas, y su estudio podría ofrecer nuevas estrategias para mejorar la resistencia en otros organismos.

Un hallazgo notable en este contexto es la inserción del gen Hsp en cepas de *Escherichia coli*, que aumentó su supervivencia frente a la desecación. Este descubrimiento sugiere un potencial biotecnológico para estabilizar biomateriales y cultivos de plantas no tolerantes a la sequía, abriendo oportunidades en agricultura y biomedicina (Hibsman et al., 2023). La capacidad de manipular estos mecanismos de resistencia podría ser clave para enfrentar desafíos relacionados con el cambio climático y la seguridad alimentaria, especialmente en regiones vulnerables.

Además, las proteínas Dsup, asociadas con la protección contra la radiación, también son de gran interés. Su capacidad para unirse a la cromatina y actuar como un escudo contra las especies reactivas de oxígeno (ROS) indica un robusto mecanismo de defensa que podría ser aprovechado en aplicaciones biomédicas y espaciales (Chavez et al., 2019; Mínguez-Toral et al., 2020). Estudios han demostrado que las células humanas con Dsup sobrevivieron a la radiación UV-C, lo que resalta su potencial para proteger a los astronautas de los efectos nocivos de la radiación en el espacio (Ricci et al., 2021). La ingeniería genética de Dsup en organismos humanos o vegetales podría ofrecer nuevas estrategias para mitigar el daño genético y prevenir enfermedades como el cáncer, lo que abre un nuevo campo de investigación en la medicina regenerativa.

La inserción de Dsup en plantas ha mejorado su tolerancia a condiciones adversas, como la exposición a compuestos mutagénicos y radiaciones (Kirke et al., 2020; Ye et al., 2023). Esto sugiere que las proteínas Dsup podrían ser una solución viable para enfrentar desafíos agrícolas en entornos contaminados o en futuras colonias en Marte, donde la seguridad alimentaria será crucial. Por último, las proteínas secretoras abundantes solubles en calor (SAHS) han mostrado un papel protector en la resistencia a la deshidratación (Lim et al., 2024), lo que sugiere aplicaciones en la agricultura para mejorar la resiliencia de cultivos en zonas áridas y en conservación celular en medicina regenerativa (Kasianchuk et al., 2023). En resumen, los hallazgos de los proyectos TARSE y TARDIKISS no solo amplían nuestra comprensión de los mecanismos de resistencia de los tardígrados, sino que también abren nuevas vías para la investigación y aplicación en biotecnología, medicina y agricultura. La exploración de estos mecanismos podría tener un impacto significativo en cómo abordamos los desafíos relacionados con la supervivencia en condiciones extremas, tanto en la Tierra como en el espacio. A medida que avanzamos en la investigación, es fundamental realizar estudios más integrados que aborden tanto la supervivencia como los mecanismos moleculares subyacentes, lo que podría tener aplicaciones significativas en biotecnología y exploración espacial.

CONCLUSIONES

Los bioprotectores derivados de los tardígrados presentan un alto potencial para aplicaciones en medicina regenerativa, lo que sugiere que su estudio podría conducir a tratamientos innovadores para enfermedades degenerativas. Además, su investigación podría facilitar el desarrollo de cultivos más resistentes, mejorando la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola. Dada su capacidad para resistir la radiación, es crucial explorar cómo estos bioprotectores pueden proteger a los astronautas en misiones prolongadas en el espacio. Para ello, es fundamental desentrañar los mecanismos moleculares de síntesis de los bio-

protectores en los tardígrados, lo que permitirá optimizar su producción y aplicación. Por último, se recomienda fomentar la colaboración entre biólogos, bioquímicos y expertos en ingeniería genética para acelerar el desarrollo y la implementación de estos bioprotectores en diversas áreas.

Limitaciones

1. Falta de Identificación de Bioprotectores: Una de las limitaciones más significativas en los proyectos TARSE, TARDIKISS, TARDIS y RoTaRad es la falta de análisis sobre las moléculas específicas que contribuyen a la resistencia de los tardígrados en condiciones extremas. Aunque se han observado tasas de supervivencia y se han identificado algunas proteínas de choque térmico, no se han realizado estudios exhaustivos para determinar los bioprotectores que facilitan esta resistencia.
2. Condiciones Experimentales Limitadas: Los experimentos realizados en condiciones simuladas del espacio, aunque valiosos, pueden no replicar completamente la complejidad del entorno espacial real. Por ejemplo, el Proyecto TARSE y el Proyecto TARDIS se llevaron a cabo en un entorno controlado que podría no reflejar todas las variables presentes en el espacio, como la radiación cósmica de fondo y otros factores ambientales.
3. Variabilidad entre Especies: En el Proyecto TARDIKISS, aunque se compararon dos especies de tardígrados, los resultados pueden no ser generalizables a otras especies. Las diferencias en la actividad enzimática y la síntesis de moléculas protectoras entre *Paramacrobrotus richtersi* y *Ramazzottius oberhaeuseri* sugieren que la resistencia puede variar significativamente entre diferentes especies, lo que limita la aplicabilidad de los hallazgos.
4. Impacto de la Radiación Solar: En el Proyecto TARDIS, se observó que la combinación de vacío espacial con radiación solar tuvo un impacto negativo considerable en la supervivencia de los tardígrados. Sin embargo, no se identificaron las moléculas de protección que podrían haber influido en esta resistencia, lo que limita la comprensión de cómo estos organismos manejan el estrés combinado de vacío y radiación.
5. Efectos Fisiológicos No Evaluados: En los estudios de laboratorio, como el realizado por Wilanowska et al. (2024), aunque se demostró la capacidad de los tardígrados para tolerar condiciones adversas, se observó un impacto en el tamaño corporal de los individuos. Esto sugiere que, aunque pueden sobrevivir, las condiciones extremas pueden tener efectos adversos en su fisiología, un aspecto que no se ha explorado en profundidad en la mayoría de los estudios.
6. Limitaciones en la Simulación de Ambientes Extraterrestres: Aunque el estudio de Johnson et al. (2011) simuló el ambiente marciano, las condiciones experimentales pueden no haber capturado todos los factores que los tardígrados enfrentarían en Marte. La falta de identificación de bioprotectores en este contexto también limita la comprensión de cómo podrían sobrevivir en un entorno extraterrestre real.
7. Necesidad de Estudios Más Integrados: En general, todos los proyectos y estudios mencionados destacan la necesidad de realizar investigaciones más integradas que aborden tanto la supervivencia como los mecanismos moleculares subyacentes. La falta de un enfoque holístico limita la comprensión completa de la biología de los tardígrados y su capacidad para resistir condiciones extremas.

Conflictos de interés

El autor declara que no existe conflicto de interés.

Referencias bibliográficas

- Clark-Hachtel, C. M., Hibshman, J. D., Buysscher, T. D., & Goldstein, B. (2023). Tardigrades dramatically upregulate DNA repair pathway genes in response to ionizing radiation. En *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2023.09.07.556677>
- Coleine, C., Pombubpa, N., Zucconi, L., Onofri, S., Stajich, J. E., & Selbmann, L. (2020). Endolithic fungal species markers for harshest conditions in the McMurdo dry valleys, Antarctica. *Life*, *10*(2), 13. <https://doi.org/10.3390/life10020013>
- Guidetti, R., Altiero, T., & Rebecchi, L. (2011). On dormancy strategies in tardigrades. *Journal of Insect Physiology*, *57*(5), 567–576. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2011.03.003>
- Heidemann, N. W. T., Smith, D. K., Hygum, T. L., Stapane, L., Clausen, L. K. B., Jørgensen, A., Hélix-Nielsen, C., & Møbjerg, N. (2016). Osmotic stress tolerance in semi-terrestrial tardigrades. *Zoological Journal of the Linnean Society*, *178*(4), 912–918. <https://doi.org/10.1111/zoj.12502>
- Hibshman, J. D., Carra, S., & Goldstein, B. (2023). Tardigrade small heat shock proteins can limit desiccation-induced protein aggregation. *Communications Biology*, *6*, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-04512-y>
- Hu, C., Yang, J., Qi, Z., Wu, H., Wang, B., Zou, F., Mei, H., Liu, J., Wang, W., & Liu, Q. (2022). Heat shock proteins: Biological functions, pathological roles, and therapeutic opportunities. *MedComm*, *3*(3), e161. <https://doi.org/10.1002/mco2.161>
- Jönsson, K. I., & Schill, R. O. (2007). Induction of Hsp70 by desiccation, ionising radiation and heat-shock in the eutardigrade *Richtersius coronifer*. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part B, Biochemistry & Molecular Biology*, *146*(4), 456–460. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2006.10.111>
- Jönsson, K. I., Rabbow, E., Schill, R. O., Harms-Ringdahl, M., & Rettberg, P. (2008). Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit. *Current Biology*, *18*(17), 729–731. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.06.048>
- Johnson, A. P., Pratt, L. M., Vishnivetskaya, T., Pfiffner, S., Bryan, R. A., Dadachova, E., Whyte, L., Radtke, K., Chan, E., & Tronick, S. (2011). Extended survival of several organisms and amino acids under simulated martian surface conditions. *Icarus*, *211*(2), 1162–1178. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.11.011>
- Jönsson, K. I. (2019). Radiation tolerance in tardigrades: Current knowledge and potential applications in medicine. *Cancers*, *11*(9), 1333. <https://doi.org/10.3390/cancers11091333>
- Kasianchuk, N., Rzymiski, P., & Kaczmarek, L. (2023). The biomedical potential of tardigrade proteins: A review. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *158*(114063), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.114063>
- Kirke, J., Jin, X. L., & Zhang, X. H. (2020). Expression of a Tardigrade Dsup Gene Enhances Genome Protection in Plants. *Molecular Biotechnology*, *62*, 563–571. <https://doi.org/10.1007/s12033-020-00273-9>
- Lim, S., Reilly, C. B., Barghouti, Z., Marelli, B., Way, J. C., & Silver, P. A. (2024). Tardigrade secretory proteins protect biological structures from desiccation.

- Communications Biology*, 7, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s42003-024-06336-w>
- May, R., Maria, M., & Guimard, J. (1964). Actions différentielles des rayons x et ultraviolets sur le tardigrade *Macrobiotus areolatus*. *Bulletin Biologique de la France et de la Belgique*, 98, 349–367.
- Mínguez-Toral, M., Cuevas-Zuñiría, B., Garrido-Arandia, M., & Pacios, L. F. (2020). A computational structural study on the DNA-protecting role of the tardigrade-unique Dsup protein. *Scientific Reports*, 10, 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70431-1>
- Møbjerg, N., & Neves, R. C. (2021). New insights into survival strategies of tardigrades. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 254(110890), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.110890>
- Neves, R. C., Hvidepil, L. K. B., Sørensen-Hygun, T. L., Stuart, R. M., & Møbjerg, N. (2020). Thermotolerance experiments on active and desiccated states of *Ramazzottius varieornatus* emphasize that tardigrades are sensitive to high temperatures. *Scientific Reports*, 10, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56965-z>
- Orellana, R., Macaya, C., Bravo, G., Dorochesi, F., Cumsille, A., Valencia, R., Rojas, C., & Seeger, M. (2018). Living at the frontiers of life: Extremophiles in Chile and their potential for bioremediation. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1–25. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02309>
- Persson, D., Halberg, K. A., Jørgensen, A., Ricci, C., Møbjerg, N., & Kristensen, R. M. (2011). Extreme stress tolerance in tardigrades: surviving space conditions in low earth orbit. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 49, 90–97. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0469.2010.00605.x>
- Rebecchi, L., Altiero, T., Guidetti, R., Cesari, M., Bertolani, R., Negroni, M., & Rizzo, A. M. (2009). Tardigrade Resistance to Space Effects: first results of experiments on the LIFE-TARSE mission on FOTON-M3 (September 2007). *Astrobiology*, 9(6), 581–591. <https://doi.org/10.1089/ast.2008.0305>
- Ricci, C., Riolo, G., Marzocchi, C., Brunetti, J., Pini, A., & Cantara, S. (2021). The tardigrade damage suppressor protein modulates transcription factor and DNA repair genes in human cells treated with hydroxyl radicals and UV-C. *Biology*, 10, 1–14. <https://doi.org/10.3390/biology10100970>
- Rizzo, A. M., Altiero, T., Corsetto, P. A., Montorfano, G., Guidetti, R., & Rebecchi, L. (2015). Space flight effects on antioxidant molecules in dry tardigrades: The TARDIKISS experiment. *BioMed Research International*, 2015, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2015/167642>
- Sadowska-Bartosz, I., & Bartosz, G. (2024). Antioxidant defense in the toughest animals on the earth: Its contribution to the extreme resistance of tardigrades. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(15), 8393. <https://doi.org/10.3390/ijms25158393>
- Saigo, T., Satoh, K., & Kunieda, T. (2024). Comparative study of gamma radiation tolerance between desiccation-sensitive and desiccation-tolerant tardigrades. *En bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2024.06.26.600756>
- Weronika, E., & Łukasz, K. (2017). Tardigrades in Space Research – Past and Future. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 47(4), 545–553. <https://doi.org/10.1007/s11084-016-9522-1>
- Wilanowska, P., Rzymiski, P., & Kaczmarek, Ł. (2024). Long-term survivability of tardigrade *Paramacrobiotus experimentalis* (eutardigrada) at increased magnesium perchlorate levels: Implications for astrobiological research. *Life*,

14(3), 1–10. <https://doi.org/10.3390/life14030335>
Ye, C., Guo, J., Zhou, X. Q., Chen, D. G., Liu, J., Peng, X., Jaremko, M., Jaremko, L.,
Guo, T., Liu, C. G., & Chen, K. (2023). The Dsup coordinates grain development
and abiotic stress in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 205, 108184.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108184>