

REVISTA CIENTÍFICA DE
ASTROBIOLOGÍA



ASPAST

Asociación Española de Astrobiología

Revista Científica de Astrobiología

Vol. 2 / N° 1 enero-junio, 2025

© Asociación Peruana de Astrobiología
Calle Santa Cruz MZ A Lt 8 Las Flores de Villa
Lima, Peru
aspast@astrobiologia.pe
Depósito Legal N° 2024-08782
ISSN: 3028-9866 (En línea)
doi: 10.69976/aspast.v1n1

Equipo Editorial

Dr. Octavio A. Chon Torres

Director Editorial

Asociación Peruana de Astrobiología / Universidad de Lima

COMITÉ EDITORIAL

Melissa Gutiérrez Arias

Asociación Peruana de Astrobiología

Dra. Roxana Yesenia Pastrana Alta

Universidad Nacional de Ingeniería

Med. Vet. César André Murga-Moreno

Universidad Nacional de Cajamarca

Blga. Meissy Montes

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Maricelo 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

Duverlyn 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

<https://revistadeastrobiologia.com/>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Flora vascular altoandina del Perú y su potencial uso en ecosíntesis planetaria

Michael S. Vega Chávez^{1,2}

<https://orcid.org/0000-0003-2091-6000>

¹Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

²Sociedad Científica de Astrobiología del Perú (SCAP), Lima, Perú.

Email: 0800michael@gmail.com

Recibido: 29/09/2024 • Revisado: 24/10/2024 • Aceptado: 15/01/2025

Resumen

El presente artículo muestra ejemplos de algunas plantas que forman parte de las comunidades vegetales de las zonas altoandinas del Perú, que debido a sus adaptaciones ecológicas y sus mecanismos reproductivos, no sólo son capaces de sobrevivir y perpetuarse en este ecosistema tan hostil, sino que además, muy posiblemente dichas plantas estarían entre los primeros organismos vegetales superiores o plantas vasculares (que poseen xilema y floema) que podrían ser enviadas a planetas como Marte para su eventual ecosíntesis (“terraformación”).

Palabras clave: Flora altoandina, adaptaciones ecológicas, ecosíntesis planetaria, terraformación.

Citar como:

Vega Chávez, M. S. (2025). Flora altoandina, adaptaciones ecológicas, ecosíntesis planetaria, terraformación. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(1), 1–23.

<https://doi.org/10.69976/aspast.v2n1.1>

RESEARCH ARTICLE

High Andean vascular flora of Peru and its potential use in planetary ecosynthesis

Michael S. Vega Chávez^{1,2}

<https://orcid.org/0000-0003-2091-6000>

¹Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

²Sociedad Científica de Astrobiología del Perú (SCAP), Lima, Perú.

Email: 0800michael@gmail.com

Recibido: 29/09/2024 • Revisado: 24/10/2024 • Aceptado: 15/01/2025

Abstract

This article shows examples of some plants that are part of the plant communities of the high Andean areas of Peru, which due to their ecological adaptations and reproductive mechanisms, are not only capable of surviving and perpetuating themselves in this hostile ecosystem, but also, very possibly, said plants would be among the first higher plant organisms or vascular plants (which have xylem and phloem) that could be sent to planets like Mars for eventual ecosynthesis ("terraforming").

Keywords: High Andean flora, ecological adaptations, planetary ecosynthesis, terraforming.

Cite as:

Vega Chávez, M. S. (2025). Flora altoandina, adaptaciones ecológicas, ecosíntesis planetaria, terraformación. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(1), 1–23.

<https://doi.org/10.69976/aspast.v2n1.1>

Introducción

Cuando se piensa en la terraformación de otros planetas, como por ejemplo Marte, los primeros organismos que nos vienen a la mente para enviar a colonizar dichos planetas son las cianobacterias y otros microorganismos extremófilos, y es que dadas las duras condiciones ambientales que existen fuera de nuestro planeta Tierra, estos organismos son los que estarían mejor adaptados para sobrevivir y reproducirse bajo dichas condiciones extremas. Sin embargo, dado que la finalidad del proceso de terraformación, o ecosíntesis planetaria, es obtener, en otro planeta fuera de la Tierra, un medio ambiente habitable para los seres humanos (Molina 2018), será indispensable conseguir que las plantas vasculares también puedan crecer fuera del planeta Tierra y formar ecosistemas sostenibles y funcionales.

Las plantas vasculares comprenden a los helechos y afines (antiguamente conocidas como “Pteridophytas”), las gimnospermas o “coníferas”, y las angiospermas o “plantas con flores”. Todos estos grupos comparten en común, además de poseer haces vasculares (xilema y floema), que también son los principales elementos que componen la diversidad y la estructura de las comunidades vegetales en los ecosistemas terrestres (Margalef 1993). La gran mayoría de las especies vegetales que el ser humano utiliza en su alimentación, obtención de materias primas, y/o para su simple confort, también son plantas vasculares (Font Quer 1978). De allí la importancia de que, si la especie humana decide colonizar otros planetas, las plantas vasculares también puedan crecer en estos “nuevos mundos”.

Muy posiblemente Marte será el primer, planeta después de la Tierra, que la especie humana conseguirá habitar, y es por eso que la mayor parte de la bibliografía que habla acerca del tema de terraformación y ecosíntesis planetaria se centra en ese planeta. Entonces, ¿cuáles serían las primeras plantas vasculares que podrían crecer en Marte? El planeta Marte en la actualidad es un desierto congelado con baja presión atmosférica, temperaturas por debajo de cero, y altos niveles de radiación (McKay & Maninova 2001, Graham 2004, McKay 2009), condiciones ambientales tan hostiles hacen casi imposible que la mayoría de especies vegetales con las que los humanos convivimos en nuestro día a día puedan crecer y desarrollarse. Sin embargo, aquí mismo en la Tierra encontramos condiciones ambientales muy similares a las de Marte en los ecosistemas de alta montaña (Molina et al. 2014, Molina 2018), y pese a ello, estos ecosistemas poseen una amplia biodiversidad vegetal poco estudiada y aprovechada, en especial en países andinos como el Perú (Weberbauer 1945, Brako & Zarucchi 1993, Ulloa et al. 2004, Van der Werff & Consiglio 2004, Sklenář et al. 2005, Cano et al. 2005, 2006, 2010, 2011).

“Bajando por la montaña”

Graham (2003, 2004, 2006) ha planteado cuál sería la sucesión ecológica que se daría en Marte en el caso de una eventual terraformación de ese planeta, y la comparó a la sucesión ecológica que se observa al ir desplazándose desde los hielos polares hacia latitudes con clima más templado, o bajando desde la cima nevada de una montaña hacia altitudes medias con clima más cálido. Tomando el ejemplo de la montaña (Figura 1), en su cima nevada o “zona nival”, los únicos organismos que pueden sobrevivir y formar comunidades bióticas residentes son los microorganismos; mientras que al bajar hacia las zonas descubiertas de hielo, también denominadas zonas periglaciales (MINAM 2015, 2018), aparecen las primeras formas de vida macroscópicas, siendo evidente la presencia de plantas no vasculares, tales como los líquenes (organismos formados por la unión simbiótica de un hongo y un alga) y los briófitos (musgos, hepáticas, y antocerotas). Estas mismas comunidades

bióticas son las que podrían establecerse a lo largo de las diferentes etapas de la terraformación de Marte, una vez consigamos aumentar la temperatura y la presión atmosférica del planeta para mejorar sus condiciones de habitabilidad (Pazar 2018).

Figura 1



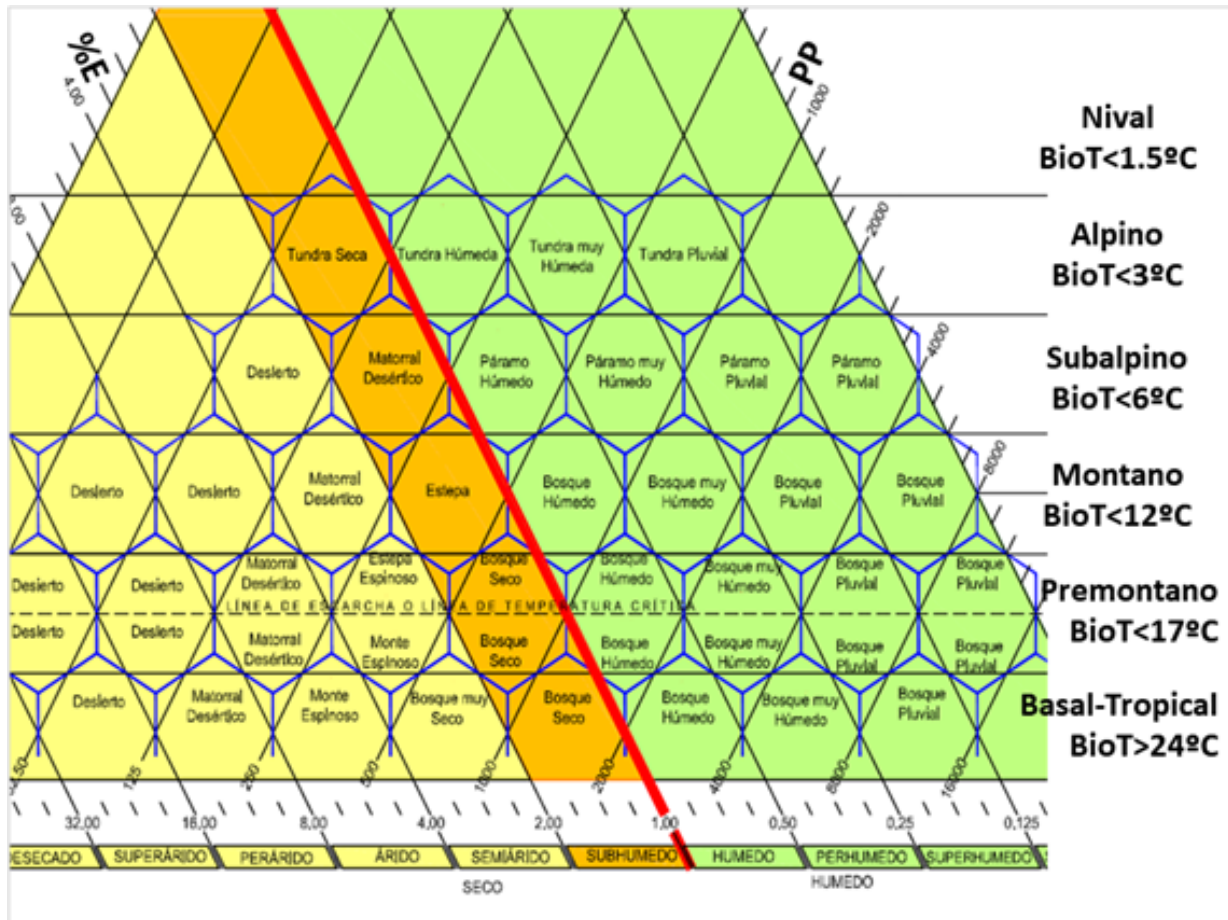
Nota. Vista de la Cordillera Blanca (departamento de Ancash), mostrando los diferentes tipos de ecosistemas que pueden encontrarse al ir “bajando por la montaña” desde su cima: 1). Zona nival, similar al Marte actual, sin vida aparente, salvo por algunos microorganismos capaces de sobrevivir al frío y otras condiciones extremas de esta; 2). Zona periglacial, en dónde aparecen las primeras comunidades de plantas no vasculares como líquenes y briófitos, tal y como Graham (2003, 2004, 2006) afirma que ocurriría en las primeras etapas de la terraformación de Marte; 3). Tundras, en dónde las condiciones ambientales permiten la formación de las primeras comunidades vegetales con plantas vasculares; 4). Ecosistema templado, en dónde se puede apreciar la aparición de comunidades vegetales más complejas y diversas, tales como las estepas (“pajonales”), matorrales, y bosques, equivalentes a lo que se esperaría encontrar en las etapas finales de la terraformación de Marte.

Continuando con el descenso por la montaña (Figura 1), encontramos las primeras comunidades vegetales con plantas vasculares, en dónde las condiciones ambientales permiten el ensamblaje de ecosistemas más complejos. El primero de estos ecosistemas, según el sistema ecológico de zonas de vida de Holdridge (Camacho & Lavado-Casimiro 2017) (Figura 2), es la Tundra (ver Figura 3), palabra que en ruso significa “tierra sin árboles”,

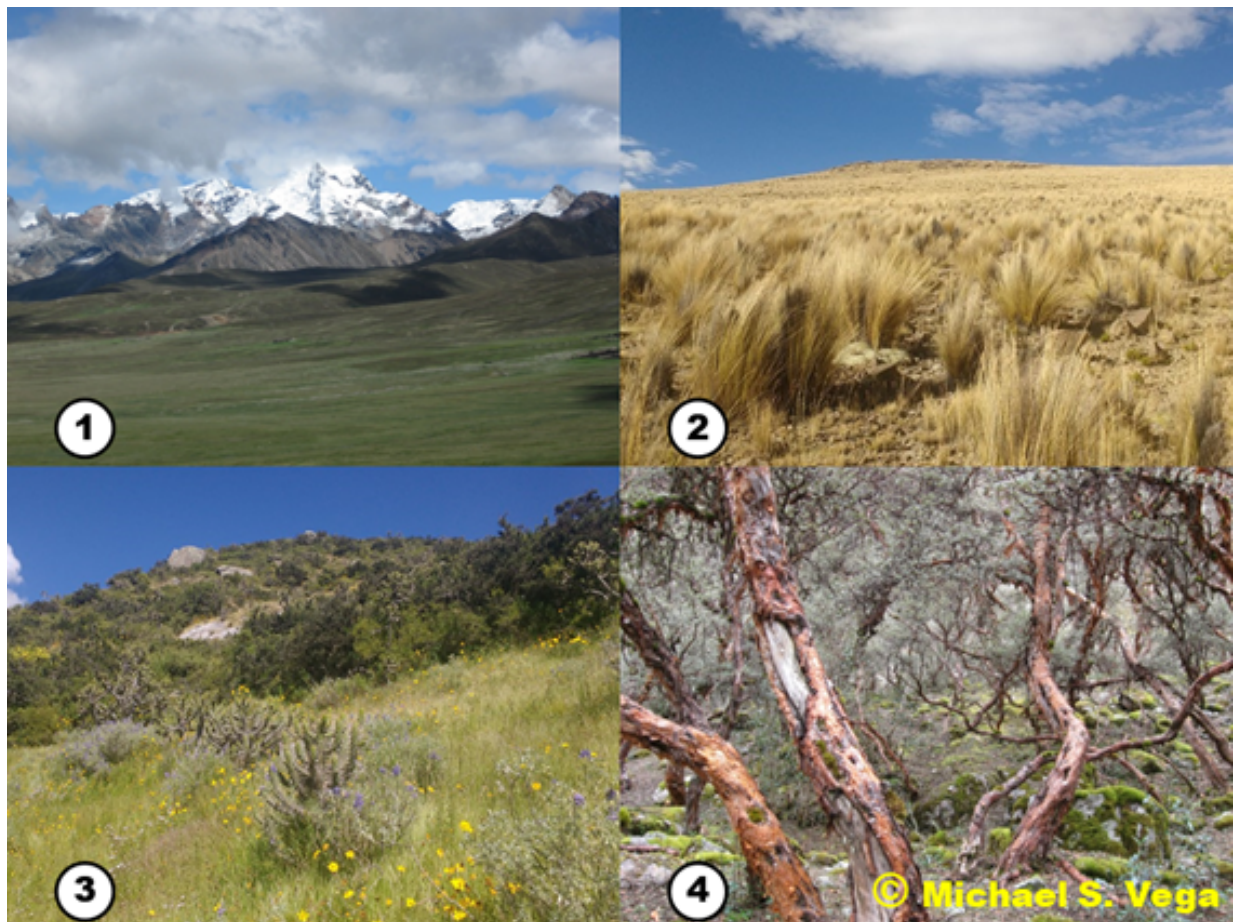
ya que aquí sólo pueden crecer hierbas cespitosas (“en forma de césped”) pegadas al suelo para protegerse mejor del viento congelado y las bajas temperaturas que aún prevalecen en estas zonas. Otra característica de la Tundra es la presencia de un permafrost, es decir una capa de hielo bajo su suelo, el cual presenta una dinámica cíclica de congelamiento y descongelamiento producto de la diferencia de temperatura entre el día y la noche, lo que provoca el desplazamiento de materiales y nutrientes entre las distintas capas u horizontes del suelo. A esto se le suele llamar suelo crioturbado, y le confiere a las comunidades vegetales que crecen sobre los suelos de la Tundra características particulares en lo que respecta a su diversidad, estructura, fisiología y ecología (Peterson et al. 2003, Cano et al. 2010, 2011).

Finalmente, en las partes más bajas y cálidas de la montaña encontramos a los ecosistemas templados, y en dónde se tiene a las comunidades vegetales más complejas y diversas (ver Figura 3). En primer lugar, tenemos a las Estepas, también llamadas “Pajonales” aquí en Perú, y cuyo nombre hace referencia a las gramíneas (familia Poaceae) del género *Stipa* y demás géneros relacionados (como por ejemplo el género *Jarava*, nativo de los andes peruanos), debido a que son estas plantas el elemento más abundante y característico de estas comunidades vegetales. Junto a las Estepas se tienen además a las comunidades de plantas leñosas como lo son los Matorrales, y Bosques altoandinos. Según Graham (2003, 2004, 2006) y Molina (2018), estas mismas comunidades vegetales podrían también ensamblarse en Marte en las etapas más avanzadas y finales de su proceso de terraformación (Figura 4).

Figura 2

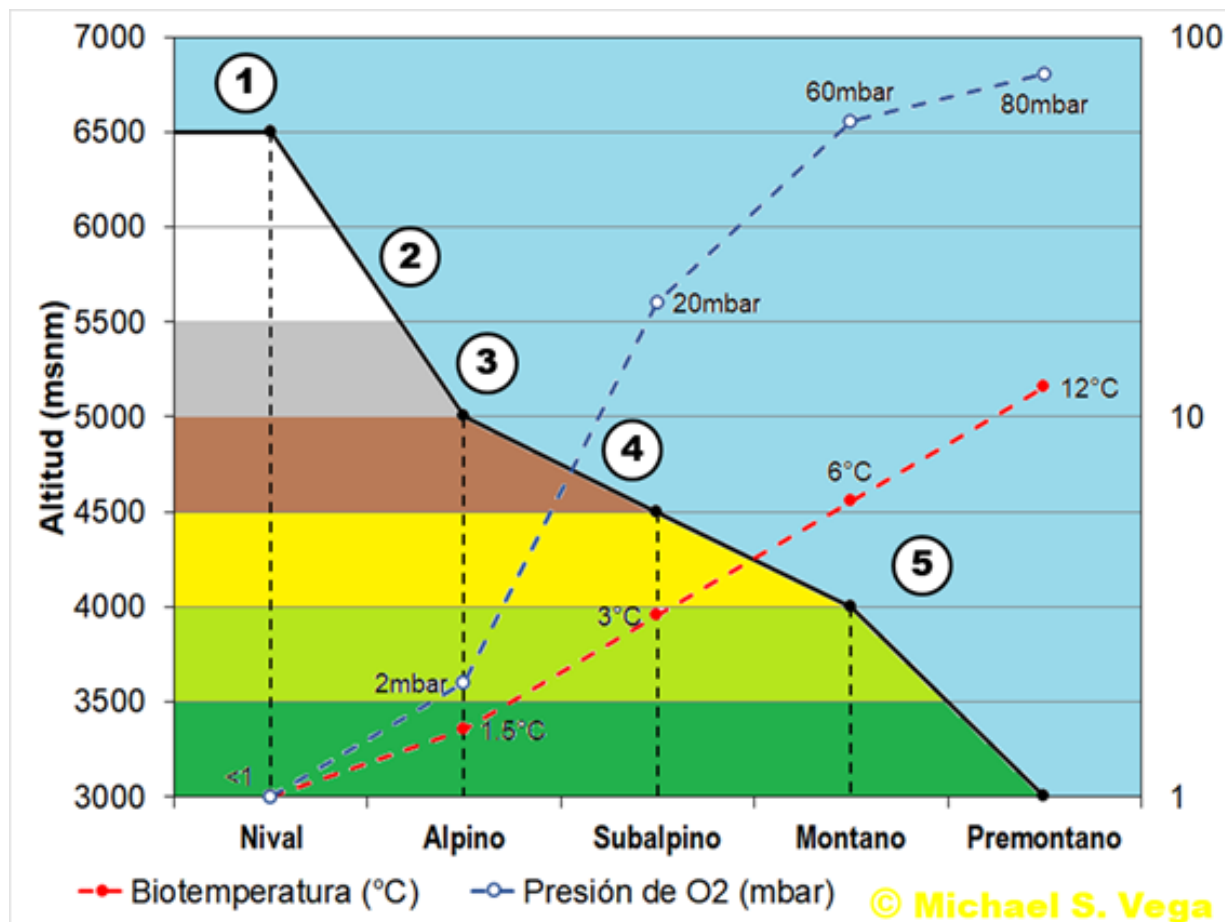


Nota. Esquema de zonas de vida de Holdridge (modificado a partir de Camacho & Lavado-Casimiro 2017). Se basa en el uso de 3 variables: la precipitación (PP) o lluvia, el porcentaje de evapotranspiración (%E) o transpiración de las plantas, y la biotemperatura (BioT) o temperatura a la cual las plantas realizan sus procesos metabólicos como la fotosíntesis. Con estas 3 variables, a manera de un triángulo, y considerando además la región latitudinal y el piso altitudinal, se establece el tipo de vegetación potencial que puede desarrollarse bajo esas condiciones ambientales, y la cual sería la zona de vida bajo este sistema ecológico.

Figura 3

Nota. Diferentes ejemplos de comunidades vegetales altoandinas con plantas vasculares: 1). Tundra en el Callejón de Conchucos (departamento de Ancash) sobre los 4500 msnm; 2). Pajonal en la Reserva Nacional de Pampas Galeras (departamento de Ayacucho) sobre los 4000 msnm; 3). Matorral andino en la comunidad de Santiago de Vado (departamento de Ayacucho) sobre los 3600 msnm; 4). Bosque de queñual en el Parque Nacional Huascarán (departamento de Ancash) sobre los 3500 msnm.

Figura 4



Nota. Etapas de la terraformación ecológica de Marte según Graham (2003, 2004, 2006), relacionándolas con los pisos altitudinales del sistema ecológico de Holdridge. 1). Marte actual, cuyas condiciones ambientales son completamente hostiles y desfavorables para la vida; 2). Ecosistema Microbiano, formado por aquellos microorganismos capaces de soportar las condiciones ambientales extremas que se encuentran en las zonas nivales altoandinas, y las mismas que son similares a las de Marte; 3). Plantas no vasculares, las cuales aparecen al bajar de la zona nival, lo mismo que ocurriría en Marte a medida que mejoren las condiciones de habitabilidad del planeta producto de la acción de los microorganismos que se establecieron en la fase anterior; 4). Plantas vasculares, las cuales aparecen en las Tundras (piso “Alpino” en el esquema de Holdridge), así como se podrían añadir al ecosistema de Marte una vez que la temperatura y la presión de O₂ aumenten lo suficiente como para permitir su crecimiento; 5). Ecosistemas templados, es decir las estepas, matorrales y boques que se encuentran en las laderas de las montañas, y ecosistemas que también podrían ensamblarse en Marte en las fases finales de su ecosíntesis planetaria. Los datos de temperatura (biotemperatura) y presión de O₂ utilizados como referencia fueron sacados de Graham (2004) y de Molina (2018).

La diversidad es la clave

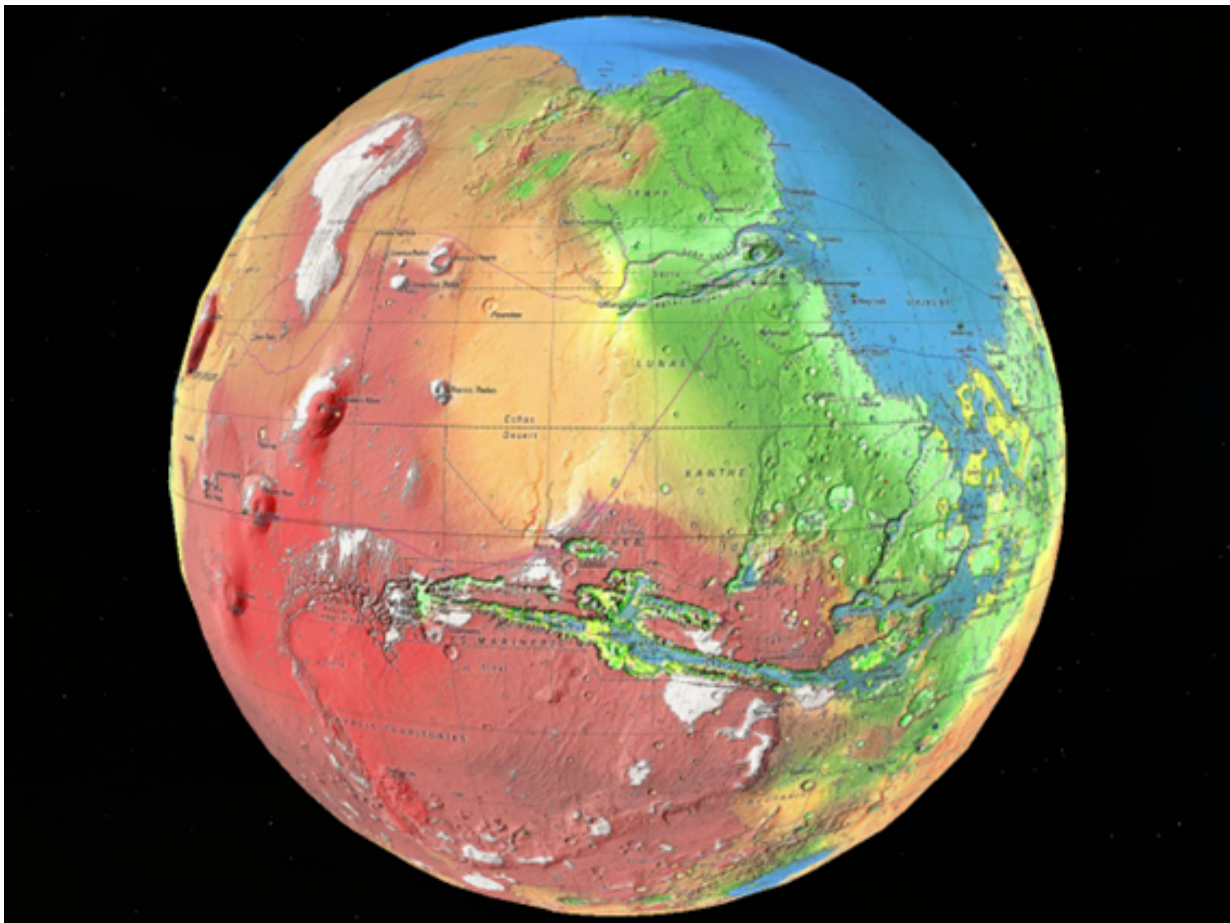
La mayor parte de los ejemplos examinados por Graham (2003, 2004, 2006), con plantas vasculares que podrían ser utilizadas para ensamblar los primeros ecosistemas y comunidades vegetales en Marte durante su proceso de terraformación, son con plantas de los hábitats boreales de Norteamérica y Europa, los cuales son ecosistemas con una muy baja

diversidad de especies; sin embargo, estas mismas son las únicas que cuentan con suficiente información publicada para ser examinadas. También cabe mencionar que dicha información en su mayor parte proviene de investigaciones básicas sobre fenómenos biológicos que no están directamente relacionados con temas de astrobiología.

Muchos de estos estudios, se generaron a partir de la preocupación existente en las últimas décadas del siglo XX por el agujero en la capa de ozono sobre la Antártida, principalmente en temas relacionados a los efectos de la radiación UV sobre varios organismos, particularmente microorganismos y algunas plantas. De igual manera hoy ocurre una situación similar con la preocupación por el calentamiento global y los estudios de adaptación de ciertas especies y ecosistemas sensibles a los cambios climáticos producto de este. Por ejemplo, los estudios de Cano et al. (2010, 2011) sobre flora y vegetación en ambientes crioturbados se enmarcan en este contexto, ya que estos ecosistemas al depender de sus ciclos de congelamiento y descongelamiento son especialmente sensibles al cambio climático. Esta clase de estudios, igualmente como en el pasado, podrían también ayudarnos en la búsqueda de más especies de plantas vasculares que podrían utilizarse para ensamblar los primeros ecosistemas sobre la superficie de Marte, sobre todo si tenemos en cuenta que estudiar terraformación y ecosíntesis planetaria es prácticamente lo mismo que estudiar un proceso de cambio climático.

Figura 5

Mapa del planeta Marte terraformado elaborado a partir de la obra de ciencia ficción “Trilogía marciana” (“Mars trilogy”) de Kim Stanley Robinson (1992-1996).



Otro estudio importante sobre ecosíntesis planetaria es el de Molina (2018) con *Pinus hartwegii* (Pinaceae), una especie de pino que crece por encima de los 4000 msnm, lo que la convierte en la especie arbórea capaz de crecer a mayor altitud del mundo, y por lo que es utilizada en dicho estudio como modelo para determinar las condiciones de sitio necesarias para el establecimiento de plantas vasculares en un Marte en proceso de terraformación. Dicho estudio se realizó en el Pico Orizaba (México); localidad que además posee una amplia biodiversidad.

Graham (2004), recomienda más bien por su parte estudiar los ecosistemas de alta montaña tropicales, como es el caso de los andes peruanos, los cuales son mucho más diversos en especies que las zonas circumpolares del hemisferio norte (Sklenář et al. 2005). La importancia de contar con una mayor cantidad de opciones de especies para ensamblar ecosistemas a la hora de plantear una ecosíntesis planetaria, está en que a mayor diversidad de especies más estable y funcional será el ecosistema resultante (Margalef 1993). Por eso, al tener una mayor variedad de organismos para ensamblar ecosistemas en Marte, el proceso de terraformación de ese planeta también podría acelerarse (Graham 2004). Esto permitiría a los futuros colonos humanos en el planeta Marte disfrutar de los beneficios de la ecosíntesis en mucho menos tiempo (Ver Figura 5). A ese respecto Cano et al. (2010, 2011) enfatizan la escasez de estudios de flora altoandina, principalmente por sobre los 4500 msnm, y que es justo donde se encontrarían las especies de plantas vasculares de interés en ecosíntesis planetaria, debido a que estas cuentan con una serie de adaptaciones para sobrevivir y reproducirse bajo condiciones de frío extremo, bajos niveles de oxígeno, y alta radiación (Hill 1909, Tovar 1993, Sklenář et al. 2005, Cano et al. 2010, 2011), las cuales son las mismas condiciones ambientales que deberán afrontar en caso de ser llevadas a otros planetas, como por ejemplo Marte (Graham 2003, 2004, 2006, Molina 2018), para intentar terraformarlos.

La flora altoandina

A continuación se pasará a mencionar a algunas familias botánicas de plantas vasculares representativas de las zonas altoandinas, muchas de estas mencionadas también por Graham (2003, 2004, 2006) como posibles colonos para crecer en los primeros ecosistemas marcianos formados por plantas terrestres. También se explicarán las principales características y adaptaciones que poseen estas plantas para sobrevivir bajo las duras y extremas condiciones ambientales de las zonas altoandinas, y que como se ha venido explicando, son similares a las condiciones extremas que tendrían que soportar en Marte durante su proceso de terraformación, lo que convierte a estas especies en interés astrobiológico.

Figura 6

Jarava ichu (Poaceae).



Poaceae (Figura 6) es la familia botánica de las gramíneas y los pastos. En las zonas altoandinas del Perú (entre los 4000 y 5000 msnm) su especie más representativa es *Jarava ichu*, el “ichu” (“paja” en quechua); pero además existen muchos otros géneros como *Festuca*, *Agrostis*, *Calamagrostis*, *Poa*, etc (Tovar 1993, Sklenář et al. 2005). Todos estos géneros pertenecen la subfamilia Pooideae o Festucoideae, o simplemente “festucoides”. Las gramíneas festucoides se caracterizan por tener hojas duras y punzantes, y por crecer en macollos, además de ser especialmente diversas y abundantes en los ambientes fríos y zonas circumpolares. La especie *Deschampsia* antártica incluso es capaz de crecer en la Antártida. Sólo para Perú se reportan hasta 254 especies y 45 géneros de gramíneas festucoides (Tovar 1993). ¿Por qué estas plantas son tan diversas y abundantes en estos ambientes tan fríos y hostiles? Una explicación sería su tipo de polinización. Las flores de la familia Poaceae en general son aclamídeas, es decir, no poseen pétalos ni sépalos que atraigan a los animales polinizadores, así que su polinización debe realizarse a través del viento, lo que se conoce como “polinización anemófila”. Este tipo de polinización también se presenta en otras plantas gramíneas, es decir, plantas morfológicamente similares a Poaceae, como es el caso de las familias Cyperaceae y Juncaceae, y las que también son abundantes en las zonas altoandinas (Sklenář et al. 2005). La polinización anemófila es dominante en las plantas que habitan en regiones con climas polares y de alta montaña, ya que aquí los polinizadores animales son muy escasos o poco fiables (Graham 2004).

Figura 7

Hypochaeris sessiliflora (Asteraceae).



Asteraceae (Figura 7), antiguamente llamada también “Compuesta”, es la familia botánica de las margaritas y los girasoles. Las zonas altoandinas son particularmente diversas en especies de esta familia (Sklenář et al. 2005). Muchas especies altoandinas poseen flores sumamente coloridas y vistosas, como lo son en los géneros *Hypochaeris*, *Paranephelium*, *Perezia*, *Werneria*, entre muchos otros; mientras que otras especies más bien poseen flores poco llamativas, como en los géneros *Belloa*, *Erigeron*, *Gnaphalium*, *Loricaria*, *Mniodes*, *Xenophyllum*, y por lo que estas muy difícilmente pueden atraer polinizadores (Sklenář et al. 2005). En muchas especies de Asteraceae se ha reportado la reproducción por apomixis (Graham 2004), un tipo de reproducción asexual donde el óvulo que va a producir la semilla se fecunda a sí mismo, y por lo que al germinar dichas semillas producirán individuos genéticamente idénticos a la planta madre. Una ventaja de la apomixis es que permite producir una gran cantidad de semillas y ocupar grandes porciones de terreno en muy poco tiempo, razón por la cual las plantas con esta estrategia suelen ser malezas o invasoras de cultivos. En Asteraceae, *Taraxacum officinale* o “diente de león”, suele ser un buen ejemplo de una especie invasora muy bien estudiada que utiliza esta estrategia reproductiva para propagarse.

Figura 8

Astragalus sp (*Fabaceae*).



Fabaceae (Figura 8) es la familia botánica de las leguminosas, tales como el frijol, la soya, y las habas (“faba” significa “haba” en latín, siendo esto lo que le da su nombre a la familia). Los géneros andinos que crecen a mayor altitud son *Astragalus* y *Lupinus* (Cano et al. 2010, 2011). Muchas de las especies de Fabaceae además de poseer polinización cruzada pueden autofecundarse, lo que se conoce como polinización autógama (Graham 2004). A diferencia de la apomixis, en la polinización autógama sí ocurre recombinación genética, por lo que la pérdida de variabilidad no es tan severa. Este tipo de plantas que poseen polinización autógama, y que además potencialmente pueden ser polinizadas por animales, serían de mucha ayuda en las primeras comunidades vegetales que podrían colonizar otros planetas como Marte, ya que ayudarían también a establecer a los primeros animales polinizadores una vez que estos puedan ser introducidos dentro del proceso de ecosíntesis.

Figura 9

Pycnophyllum molle (Caryophyllaceae).



Caryophyllaceae (Figura 9) es la familia botánica de los claveles (*Dianthus caryophyllum*) y los nadeshiko (*D. japonicus*), pero también aquí pertenecen una amplia gama de especies que habitan en las zonas templado-frías de todo el mundo (Font Quer 1978). Incluso la especie *Colobanthus quitensis* es capaz de habitar tanto en las zonas altoandinas como en la Antártida, y en dónde es llamada “perla antártica” o “clavel antártico” (Sklenář et al. 2005). Dentro de las zonas altoandinas del Perú encontramos géneros como *Pycnophyllum* y *Arenaria* (Cano et al. 2010, 2011). Estas plantas crecen formando tapetes o cojines compactos, propagándose también por estolones. Sus flores suelen ser inconspicuas (Sklenář et al. 2005), es decir permanecen cerradas hasta la polinización, lo cual favorece a la polinización autógama, y les da una estrategia reproductiva muy similar a la mencionada para Fabaceae.

Figura 10*Ephedra rupestris* (Ephedraceae)

Ephedraceae (Figura 10) es una familia que pertenece a la división de las coníferas o Gimnospermas, y suele estar formada por pequeños arbustos que crecen en las zonas boreales y árido-desérticas de todo el mundo (Font Quer 1978). En la zona altoandina contamos con dos especies del género *Ephedra* (Cano et al. 2005, 2006, 2010, 2011). Estas especies suelen ser pequeñas plantas leñosas decumbentes o postradas sobre el suelo para protegerse de los vientos congelados, sus hojas son escamiformes por lo que su tallo se encarga principalmente de la fotosíntesis (Sklenář et al. 2005), cosa que además le permite optimizar el uso del agua al evitar su pérdida por transpiración. La capacidad para optimizar el uso del agua para resistir estrés hídrico también es una característica deseable en las plantas vasculares que se estaría planeando enviar a Marte para ensamblar ecosistemas, ya que en las primeras etapas de la terraformación la disponibilidad de agua será escasa (Graham 2004). *Ephedra* se presenta como una candidata ideal para ser utilizada en la ecosíntesis planetaria, no sólo por ser una planta resistente a la falta de agua (estas especies también pueden ser encontradas habitando en el desierto costero peruano), sino que además al ser una Gimnosperma, no posee flores propiamente dichas sino que sus verticilos florales se encuentran expuestos y al aire libre, por lo que su reproducción no depende de polinizadores animales (Sklenář et al. 2005), tal y como ya se ha examinado en los grupos de plantas anteriores.

Figura 11

Austrocyllindropuntia floccosa (Cactaceae).



Cactaceae (Figura 11), como su nombre lo indica es la familia de los cactus, y después de Bromeliaceae es la familia endémica del continente americano más grande en especies, siendo además los andes peruanos una de las regiones de su mayor diversidad (Ostolaza 2019). Las plantas de esta familia se caracterizan por poseer la capacidad de almacenar agua en sus tejidos, razón por la cual también se les denomina “plantas suculentas”, y esta característica unida a su fotosíntesis CAM (“metabolismo del ácido crasuláceo” por sus siglas en inglés), convierte a Cactaceae en una de las familias botánicas que mejor soporta la sequía y el estrés hídrico, debido a su uso más eficiente del agua (Anderson 2001). El principal género de Cactaceae que presenta especies capaces de crecer en zonas altoandinas por encima de los 4000 msnm es *Austrocyllindropuntia* (Sklenář et al. 2005, Ostolaza 2019), el cual además pertenece a la subfamilia Opuntioideae, grupo donde las plantas forman sus semillas predominantemente por apomixis (Castro 2006).

Figura 12

Nototriche pinnata (Malvaceae).



Malvaceae (Figura 12) es la familia botánica de las malvas, las cucardas, la jamaica, el algodón y un largo etcétera (Font Quer 1978). En los ecosistemas altoandinos el género *Nototriche* es sumamente diverso y está muy bien adaptado a este medio ambiente (Hill 1909, Chanco y Ulloa 2004, Cano et al. 2010, 2011). Aunque la polinización en Malvaceae es principalmente mediada por insectos como las abejas, en cultivos de algodón (*Gossypium barbadense*) se ha encontrado que esta planta también es capaz de autopolinizarse si sus flores no llegan a ser visitadas. Es posible que *Nototriche* también tenga esta misma estrategia, tal y como también se ha mencionado para Fabaceae y Caryophyllaceae. Sin embargo, ¿qué pasaría si también existieran insectos polinizadores capaces de adaptarse al medio ambiente marciano? Aunque sí existen insectos capaces de vivir cerca de las zonas polares y de alta montaña, el factor limitante para estos durante la ecosíntesis de Marte será el oxígeno. No existen estudios sobre los requerimientos de oxígeno mínimo para los insectos, pero si existiesen especies capaces de sobrevivir con presiones de oxígeno menores a 20 mbar (que es lo mínimo que se estima para hacer crecer plantas vasculares en Marte, ver Figura 3), se podría ampliar en mayor medida el número de especies vegetales para ser utilizadas en ecosíntesis planetaria.

Figura 13*Saxifraga magellanica* (Saxifragaceae)

Saxifragaceae (Figura 13) es una familia relacionada con las “siempre vivas” (familia Crassulaceae), y distribuida principalmente en las regiones árticas y templado-frías de todo el mundo. Su nombre deriva del latín “saxum” = “piedra”, y “frangere” = “romper” o “quebrar”; ya que estas plantas suelen ser rupícolas (crecen sobre las rocas) y sus raíces suelen afianzarse al sustrato penetrando entre las fisuras de las rocas, lo que termina por erosionarlas y fragmentarlas (Font Quer 1978). En el Perú la única especie de esta familia es *Saxifraga magellanica*, la cual es capaz de crecer hasta cerca de los 5000 msnm (Cano et al. 2005, 2006, 2010, 2011). Entre las especies de Saxifragaceae de la región ártica se ha encontrado resistencia a condiciones de anoxia (falta total de oxígeno), lo cual sería una adaptación de estas especies para sobrevivir cuando terminan cubiertas por la nieve y el hielo que se forma en su hábitat (Graham 2004). Esta adaptación muy posiblemente también se encuentre presente en las demás familias botánicas mencionadas en el presente artículo, sobre todo en aquellas plantas que son perennes.

Figura 14

Distichia muscoides (Juncaceae).



Juncaceae (Figura 14), como su nombre lo indica, es la familia de los juncos (género *Juncus*); aunque no todas las plantas que se conocen comúnmente como “junco” pertenecen a esta familia, ya que el término hace referencia de forma genérica a cualquier planta acuática o ligada a zonas húmedas, con tallos erectos y cilíndricos, descripción que abarca a muchas especies graminoides de otras familias que ya han sido mencionadas como Cyperaceae y Poaceae. A esta familia pertenece la especie *Distichia muscoides*, la cual es una de las especies clave de los bofedales o turberas altoandinas (Figura 15), que son formaciones vegetales hidromórficas que se desarrollan en fondos de quebradas, pendientes o planicies andinas por encima de los 3000 msnm (Cano et al. 2005, 2006, Gonzáles et al. 2016). Esta especie es una planta acuática que crece formando densos cojines o almohadillas, los cuales retienen el agua a manera de esponjas, y mantienen al ecosistema del bofedal. Lo que hace interesante desde el punto de vista astrobiológico a las plantas acuáticas altoandinas es su capacidad de sobrevivir con niveles mínimos de oxígeno, por lo que Graham (2004) menciona que las primeras plantas vasculares que podrían ser enviadas a terraformar Marte podrían ser plantas acuáticas, como los son en este caso *Distichia muscoides* y otras especies que habitan los bofedales altoandinos. En lo que respecta a su reproducción, en *Distichia muscoides* predomina la reproducción asexual por formación de estolones que expanden la cobertura de sus cojines; sin embargo su reproducción sexual también se da con significativa frecuencia, debiendo a ser esta una especie dioica (hay plantas que sólo producen flores masculinas, y otras sólo flores femeninas), lo que obliga a la polinización

cruzada, y lo que mantiene su variabilidad genética (González et al. 2016).

Figura 15

Bofedal en el Callejón de Conchucos (departamento de Ancash) sobre los 4500 msnm.



Isoetaceae, es una pequeña familia de plantas vasculares sin semillas, lo que antiguamente se conocía como “pteridófitos”, pero lo cierto es que las plantas de esta familia se encuentran emparentadas con los licopodios (división Lycophyta), y no con los helechos verdaderos (división Monilophyta). El género *Isoetes* está formado por especies que habitan principalmente en ambientes acuáticos y pantanosos como los bofedales altoandinos por encima de los 4000 msnm (Sklenář et al. 2005), y en donde permanecen casi siempre sumergidos en el agua o en la turba de materia orgánica que conforma estos ambientes, de modo que apenas la parte superior de sus hojas consigue salir a la superficie, lo que obliga a estas plantas a soportar condiciones de hipoxia (“poco oxígeno”). Además, aunque la fotosíntesis CAM se ha registrado en algunas especies epífitas de plantas vasculares sin semillas, esta también se ha observado en las especies altoandinas de *Isoetes* (León 2002). En *Isoetes andicola*, la cual también se caracteriza por no presentar estomas, se registró por primera vez un caso de asimilación de CO₂ a través de las raíces (Keeley et al. 1984, Raven 1993). Estas características, sumadas a su reproducción por esporas que libra a estas plantas de la dependencia de otros organismos polinizadores, también hacen que las especies altoandinas de Isoetaceae puedan ser consideradas de interés para la ecosíntesis planetaria.

Conclusiones

Lo que vuelve de interés astrobiológico a la flora vascular de las zonas altoandinas, en especial para ser utilizada en ecosíntesis planetaria, son sus adaptaciones para soportar el frío extremo, la baja presión atmosférica, bajos niveles de oxígeno, estrés hídrico, y altos niveles de radiación, ya que son estos mismos factores los que deberán soportar en planetas como Marte incluso durante las etapas finales de su proceso de terraformación. También es fundamental tener en cuenta su tipo de reproducción, ya que esto además será el factor que les permitirá perpetuarse y colonizar otros ambientes fuera del planeta Tierra.

En este sentido, las especies altoandinas aventajan a las especies de las zonas boreales y circumpolares en su mucho mayor diversidad. Al ensamblar un ecosistema con un mayor número de especies este puede ser más estable y funcional, y en el caso la ecosíntesis planetaria, ayudar a acelerar el proceso en sí.

Aunque en el presente artículo se han mencionado ejemplos de sólo 10 familias de la flora vascular altoandina del Perú, lo cierto es que muy posiblemente el resto de familias que habitan estos ecosistemas también sean de interés astrobiológico, dado que estas deben de soportar las mismas condiciones medioambientales extremas de los altos andes. Sin embargo, la flora del Perú aún se encuentra muy lejos de estar completamente estudiada, existiendo zonas del país que no han sido debidamente exploradas y de las que se desconoce su flora, y aún peor, existe escasa o nula información sobre aspectos básicos de la biología de muchas de las especies ya conocidas. Esto dificulta el saber con precisión qué especies de la flora altoandina serían las más adecuadas para soportar las condiciones ambientales de planetas como Marte, y para ser utilizadas en ecosíntesis planetaria.

Conflictos de interés

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

Referencias

- Anderson, E. F. (2001). *The Cactus Family*. Timber Press.
- Brako, L. & Zarucchi, J. L. (1993). *Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Peru*. Missouri Botanical Garden.
- Camacho, C. L. A., & Lavado-Casimiro, W. (2017). Atlas de zonas de vida del Perú: guía explicativa. Nota Técnica No 003 SENAMH-DHI-2017. *Repositorio Institucional SENAMHI* 19. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/259>
- Cano, A., La Torre, M. I., Monsalve, C., Roque, J., Mendoza, W., Salinas, I., Castillo, S. & Aponte, H. (2005). *Las Plantas Comunes de San Marcos (Huari, Ancash)*. Guía de Campo. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Museo de Historia Natural. Serie de divulgación N° 12.
- Cano, A., La Torre, M. I., Castillo, S., Aponte, H., Morales, M., Mendoza, W., León, B., Roque, J., Salinas, I., Monsalve, C. & Beltrán, H. (2006). *Las Plantas Comunes del Callejón de Conchucos (Ancash, Perú)*. Guía de Campo. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Museo de Historia Natural. Serie de divulgación N° 13.
- Cano A, Delgado A, Mendoza W, Castillo S, Morales M, La Torre M. I., Chanco M, Aponte H, Delgado A, Valencia N, Vega N. (2010). Flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 95-103. <https://doi.org/10.15381/rpb.v17i1.56>

- Cano A, Delgado A, Mendoza W, Trinidad H, Gonzáles P, La Torre M. I., Chanco M, Aponte H, Roque J, Valencia N, Navarro E. (2011). Flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados en los alrededores del abra Apacheta, Ayacucho – Huancavelica (Perú). *textitRevista Peruana de Biología*, 18(2), 169-178.
<https://doi.org/10.15381/rpb.v18i2.224>
- Castro V. (2006). *Taxonomía de la familia Cactaceae en el valle de río Chillón, Lima: cerro Umarcata y quebrada Orobel*. [Tesis Magister, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio de la UNALM.
- Chanco, M., & Ulloa, C. U. (2004). Las especies de Nototriche (Malvaceae) de Ecuador. *SIDA Contributions To Botany*, 21(2), 693-703.
<https://sis.unmsm.edu.pe/en/publications/las-especies-de-nototriche-malvaceae-de-ecuador>
- Font Quer, Pio. (1978). *Botánica Pintoresca*. Ramón Sopena S. A.
- Gonzáles P. Suni M., Deanna R., Scaldaferrero M. A., Castañeda E., Ramirez D. W., Valencia N., & Cano A. (2016). Biología reproductiva y citogenética de *Distichia muscoides* (Juncaceae). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 51(1), 123-133. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v51.n1.14422>
- Graham J. M. (2003). Stages in the Terraforming of Mars: The Transition to Flowering Plants. *AIP Conference Proceedings*, 654(1), 1284.
<https://doi.org/10.1063/1.1541431>
- Graham J. M. (2004). The Biological Terraforming of Mars: Planetary Ecosynthesis as Ecological Succession on a Global Scale. *Astrobiology* 4(2), 168-195.
<https://doi.org/10.1089/153110704323175133>
- Graham J. M. (2006). Planetary Ecosynthesis as Ecological Succession. *Gravitational and Space Biology*, 19(2), 105-120. <https://typeset.io/pdf/planetary-ecosynthesis-as-ecological-succession-4sb2vhua41.pdf>
- Hill, A. (1909). A Revision of the Genus *Nototriche*, Turcz. *Transactions of the Linnean Society of London. 2nd Series. Botany*, 7(12), 201-266.
<https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1909.tb00179.x>
- Keeley J. E., Osmond C. B. & Raven J. A. (1984). Stylites, a vascular land plant without stomata absorbs CO₂ via its roots. *Nature*, 310, 694-695.
<https://doi.org/10.1038/310694a0>
- León, B. (2002). Los helechos y los ambientes xéricos. *Quepo*, 16, 84-87.
- Margalef, R. (1993). *Teoría de los Sistemas Ecológicos*. Publicacions Universitat de Barcelona.
- McKay, C. P. & Maninova M. M. 2001. The Physics, Biology, and Environmental Ethics of Making Mars Habitable. *Astrobiology*, 1(1), 89-109.
<https://doi.org/10.1089/153110701750137477>
- McKay, C. P. (2009). Planetary ecosynthesis on Mars: restoration ecology and environmental ethics. In C. M. Bertka (Ed.), *Exploring the Origin, Extent, and Future of Life: Philosophical, Ethical and Theological Perspectives* (pp. 245–260). Cambridge University Press.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2015). Mapa Nacional de Cobertura Vegetal. Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural. *Ministerio del Ambiente*.
<https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/178>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2018). Definiciones Conceptuales de los Ecosistemas del Perú. Viceministerio de Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales, Dirección General de Diversidad Biológica. *Ministerio del Ambiente*.

- <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/definiciones-conceptuales-ecosistemas-peru>
- Molina P., Navarro-González R. McKay C. P., Martínez-Sosa P., & Ezquível-Hernández L. (2014). Effect of soil quality on determining the timberline at the pico de Orizaba. *AGU fall meeting*.
<https://agu.confex.com/agu/fm14/meetingapp.cgi/Paper/17808>
- Molina P. (2018). *Evaluación de las condiciones de sitio en un medio extremo: el caso del pico de Orizaba (Citlaltépetl) con una perspectiva de colonización de Marte*. [Tesis Magister Universidad Nacional Autónoma de México]. UNAM.
- Ostolaza, C. (2019). *Todos los Cactus del Perú. Segunda edición corregida y actualizada*. Sociedad Peruana de Cactáceas y Suculentas (SPECS).
- Pazar, C. C. (2018). *Terraforming of Terrestrial Earth-sized Planetary Bodies*. B.A. Earth and Planetary Sciences, University of Colorado Boulder.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20309.12009>
- Peterson, R.A., Walker, D.A., Romanovsky, V.E., Knudson, J.A., Raynolds M.K. & Krantz, W.B. (2003). A differential frost heave model: cryoturbation-vegetation interactions. In: Phillips M., Springman S. M. & Arenson, U. (eds). *Permafrost, Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost*. Institute for Geotechnical Engineering, Zürich, Switzerland. Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, The Netherlands, II, 885–890.
- Raven, J. A. (1993). The Evolution of Vascular Plants in Relation to Quantitative Functioning of Dead Water-Conducting Cells and Stomata. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 68(3), 337-363.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-185x.1993.tb00735.x>
- Robinson, K. S. (1992-1996). *Mars trilogy (Vols. 1-3)*. Bantam Spectra publisher.
- Sklenář, P., Luteyn, L., Ulloa, C., Jørgensen, P. & Dillon, M. (2005). *Flora Genérica de los Páramos. Guía Ilustrada de las Plantas Vasculares*. Memoirs of the New York Botanical Garden.
- Tovar, O. (1993). *Las Gramíneas (Poaceae) del Perú*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <https://bibdigital.rjb.csic.es/records/item/1525858-las-gramineas-poaceae-del-peru?offset=1>
- Ulloa, C.; Zarucchi, J. & León, B. (2004). *Diez Años de Adiciones a la Flora Peruana, 1993 – 2003*. [PDF en línea]
- Van der Werff H. & Consiglio T. (2004). Distribution and conservation significance of endemic species of flowering plants in Peru. *Biodiversity and Conservation*, 13(9), 1699-1713. <https://doi.org/10.1023/b:bioc.0000029334.69717.f0>
- Weberbauer, A. (1945). *El Mundo Vegetal de los Andes Peruanos. Estudio Fitogeográfico. Estación Experimental Agrícola de La Molina*. Ministerio de Agricultura. Lume.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Evaluación de la supervivencia de los tardígrados en anoxibiosis: límites de la criptobiosis en condiciones extremas

Luis Allcahuaman-Huauya^{1 2}

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

Jehoshua Macedo-Bedoya^{1 3 4}

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

Luisa Calderón Ayala⁵

<https://orcid.org/0009-0004-7665-5895>

Hugo L. Vicente Ruiz³

<https://orcid.org/0009-0004-3167-438X>

¹Asociación Peruana de Astrobiología, Lima, Perú

²Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú

³Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

⁴Red de Investigadores en Biodiversidad, Ecología y Conservación

⁵Bioinorganic Chemistry in Medicine, Environmental and Technology, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Email: jehoshua.macedo@unmsm.edu.pe

Recibido: 02/03/2025 • Revisado: 19/03/2025 • Aceptado: 02/04/2025

Resumen

Los tardígrados son un grupo de micro invertebrados muy conocidos por la notable capacidad de sobrevivir en condiciones extremas y muchas veces hostiles para otros organismos, lo que los ha hecho muy importantes y recurrentes en estudios astrológicos. No existe ningún trabajo sobre la evaluación de la supervivencia de los heterotardígrados expuestos a la estratosfera. El objetivo del estudio fue estimar la viabilidad de los heterotardígrados enviados a la estratosfera, se utilizó el criterio de viabilidad para definir individuos vivos y muertos. Los individuos fueron transportados a la estratosfera (3500 m.s.n.m) por medio de 10 viales en una gradilla diseñada para este trabajo. Los resultados indican que los heterotardígrados no sobrevivieron ya que estos no realizaron algún movimiento corporal, lo que sugiere limitaciones en las estrategias de supervivencia de estos organismos en este ambiente y proporciona una nueva perspectiva sobre la resistencia a la vida en condiciones extremas.

Palabras clave: Astrobiología, extremófilos, tardígrados, estratósfera.

Citar como:

Allcahuaman-Huauya, L., Macedo-Bedoya, J., Calderón Ayala, L., & Vicente Ruiz, H. L. (2025). Evaluación de la supervivencia de los tardígrados en anoxibiosis: Límites de la criptobiosis en condiciones extremas. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(1), 24–31. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n1.2>

RESEARCH ARTICLE

Evaluation of the survival of tardigrades in anoxybiosis: limits of cryptobiosis in extreme conditions

Luis Allcahuaman-Huauya^{1 2}

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

Jehoshua Macedo-Bedoya^{1 3 4}

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

Luisa Calderón Ayala⁵

<https://orcid.org/0009-0004-7665-5895>

Hugo L. Vicente Ruiz³

<https://orcid.org/0009-0004-3167-438X>

¹Asociación Peruana de Astrobiología, Lima, Perú

²Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú

³Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

⁴Red de Investigadores en Biodiversidad, Ecología y Conservación

⁵Bioinorganic Chemistry in Medicine, Environmental and Technology, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Email: jehoshua.macedo@unmsm.edu.pe

Received: 02/03/2025 • Reviewed: 19/03/2025 • Accepted: 02/04/2025

Abstract

Tardigrades are a group of microinvertebrates well known for their remarkable ability to survive in extreme conditions, often hostile to other organisms, which has made them very important and recurrent in astrological studies. There is no work on the evaluation of the survival of heterotardigrades exposed to the stratosphere. The objective of the study was to estimate the viability of heterotardigrades sent to the stratosphere, the viability criterion was used to define live and dead individuals. The individuals were transported to the stratosphere (3500 m.a.s.l.) by means of 10 vials in a rack designed for this work. The results indicate that the heterotardigrades did not survive because they did not perform any body movement, which suggests limitations in the survival strategies of these organisms in this environment and provides a new perspective on the resistance to life in extreme conditions.

Keywords: Astrobiology, extremophiles, tardigrades, stratosphere.

Cite as:

Allcahuaman-Huauya, L., Macedo-Bedoya, J., Calderón Ayala, L., & Vicente Ruiz, H. L. (2025). Evaluación de la supervivencia de los tardígrados en anoxibiosis: Límites de la criptobiosis en condiciones extremas. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(1), 24–31. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n1.2>

Introducción

Los tardígrados, también conocidos como “osos de agua”, son un grupo de invertebrados microscópicos con al menos 1488 especies descritas (Degma & Guidetti, 2024). Pertenecen al filo Tardigrada y presentan un cuerpo segmentado con cuatro pares de patas terminadas en garras o discos adhesivos (Nelson et al., 2015). Se agrupan en dos clases principales: Eutardigrada y Heterotardigrada (Nelson et al., 2015). Su distribución es cosmopolita, colonizando una amplia variedad de hábitats (Nelson et al., 2015). Se encuentran principalmente en ecosistemas terrestres entre musgos y líquenes (Schuster, & Greven, 2007; Anguas-Escalante et al., 2018), así como en ambiente marinos (Rubal et al., 2023) y dulceacuícolas (McFatter et al., 2007). Además, han sido registrados en ambientes extremadamente hostiles como glaciares (Zawierucha et al., 2019).

Estos organismos han ganado una gran atención debido a su notable resistencia a condiciones extremas en los ambientes que habitan, tales como altas dosis de radiación, amplios rangos de temperatura y la hipoxia (Møbjerg et al., 2011; McGrath, 2024). Pueden tolerar dosis letales de radiación (Horikawa et al., 2006; Fernandez et al., 2016), temperaturas y presiones extremas, así como la ausencia prolongada de oxígeno y agua (Rebecchi et al., 2020; Arakawa, 2022). Estas características han despertado un gran interés en la astrobiología, ya que sugieren que podrían sobrevivir en entornos extraterrestres (Jönsson, 2007; Weronika & Lukasz, 2017). Por ejemplo, el Proyecto TARSE consistió en la evaluación de la supervivencia de *Macrobiotus richtersi* en la Órbita Terrestre Baja, y los micro invertebrados resistieron por la síntesis de proteínas antioxidantes (Rebecchi et al., 2009), mientras el Proyecto TARDIKISS cuantificó las proteínas antioxidantes acumuladas en los individuos diferentes (*Paramacrobiotus richtersi* y *Ramazzottius oberhaeuseri*) comprobando sus efectos protectores en las condiciones extremas del Órbita Terrestre Baja (Risso et al., 2015); por último, la población *Macrobiotus* sp. anhidrobióticos sobrevivieron después de la exposición en la estratosfera (Allcahuaman & Porrás, 2023). Por otro lado, el proyecto RoTaRad (Rotíferos, Tardígrados y Radiación) fue el único trabajo sobre la evaluación de *Echiniscus testudo* enviados a la Órbita Terrestre Baja, comprobando la supervivencia de los heterotardígrados (Persson et al., 2011).

En la actualidad, no existe un trabajo peruano sobre la evaluación de heterotardígrados expuestos a las condiciones inhóspitas de la estratosfera, debido a la falta de conocimiento de la existencia de los osos de agua. En el presente estudio, investigamos la capacidad de supervivencia de los heterotardígrados en la estratosfera, una región atmosférica hostil caracterizada por temperaturas fluctuantes, bajas presiones y altos niveles de radiación.

METODOLOGÍA

Área de estudio: El estudio se llevó a cabo en la región de Ica, Perú, abarcando diversas localidades dentro de la provincia. El lanzamiento del globo se realizó en el distrito de Yauca del Rosario, su trayecto estuvo influenciado por las condiciones atmosféricas y la geografía del terreno. Finalmente, el globo cayó en el distrito de Santiago, ubicado en el sur de la provincia. Santiago es un distrito con un relieve accidentado presentando colinas que enmarcan valles y pampas (Municipalidad Distrital de Santiago, 2020).

Figura 1

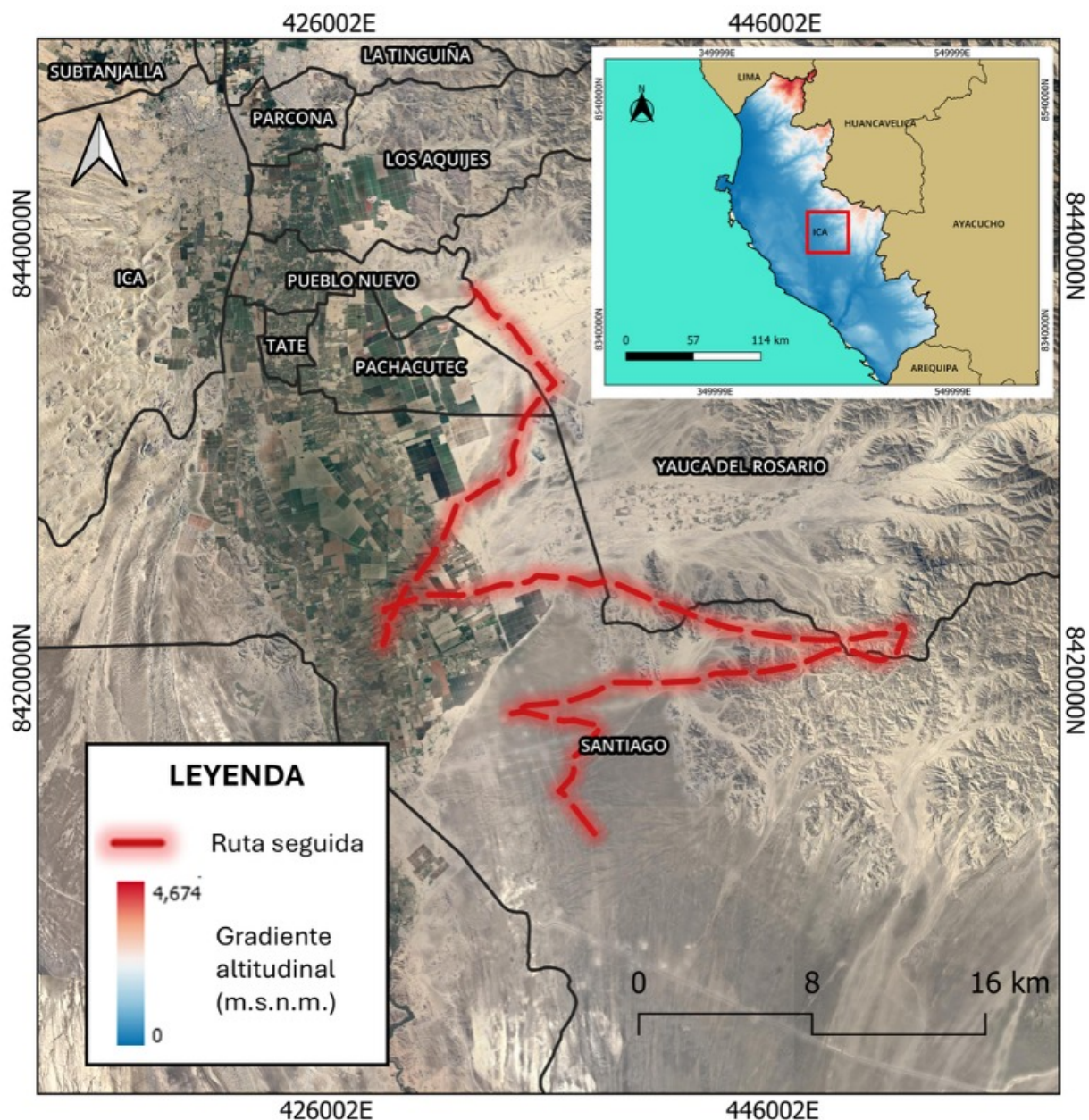


Figura 1. Trayectoria realizada por el globo estratosférico en la ciudad de Ica, Perú.

Materiales y métodos: Los tardígrados utilizados en este experimento fueron obtenidos de musgos recolectados en Huaschahura situado en la zona sur de la ciudad de Huamanga ($13^{\circ}9'55.20''S$, $74^{\circ}14'56.30''O$) a 3118 m.s.n.m., en el departamento de Ayacucho. El musgo fue cuidadosamente recolectado y empacado en condiciones estériles para su transporte al laboratorio. Una vez en el laboratorio, las muestras de musgo fueron cuidadosamente analizadas bajo el microscopio para identificar y extraer los tardígrados presentes que se encontraban en anoxibiosis. En la muestra de Ayacucho se encontró solamente clase Heterotardigrada. Se seleccionaron cuidadosamente 350 tardígrados, que se distribuyeron en 10 viales pequeños de 2 ml con agua y se diseñó una gradilla para sostener los tubos que contenían a las muestras de tardígrados que fue puesta en una cápsula, equipada con un solo medidor Strato Track 4, que permitió la medición y verificación de las temperaturas en distintas altitudes a lo largo del vuelo. El uso del medidor fue crucial para recopilar datos

precisos sobre las condiciones extremas (temperatura y presión). Una vez que la cápsula fue recuperada, se evaluó el estado de los tardígrados, utilizando el criterio de viabilidad donde los individuos con movimiento se consideran vivos, mientras que los invertebrados muertos son aquellos que se encuentran inmóviles (Persson et al., 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contrario a nuestras expectativas y a pesar de la resistencia conocida de los tardígrados a condiciones extremas en la Tierra, los tardígrados no lograron sobrevivir a las condiciones estratosféricas según el criterio de viabilidad, es decir, los individuos no realizaron ningún movimiento. Los individuos enviados a la estratósfera estuvieron expuestos a condiciones ambientales extremas, con temperaturas que descendieron hasta los -47°C y presiones cercanas a 1 hPa a altitudes de hasta 35,000 m s. n. m., factores que pudieron haber comprometido su viabilidad a pesar de su notable resiliencia (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2024). La altitud máxima alcanzada fue aproximadamente de 32,000 a 35,000 m s. n. m., donde la temperatura disminuyó cerca de -4°C a -25°C . Además de presentar cambios extremos durante el vuelo desde los 24 a -47°C . Asimismo otro factor crítico es la rápida variación térmica experimentada en el descenso del globo estratosférico. En general, los valores sugieren que los organismos estuvieron expuestos a temperaturas bajas por un tiempo prolongado, lo que podría haber inducido un estado de criptobiosis que se hace presente hasta temperaturas de -196°C , aunque también se puede explicar la presencia total de muertes a los daños metabólicos irreversibles debido a congelamiento intracelular irregular, lo que detuvo su metabolismo, por tal razón no se regularon las biomoléculas protectoras contra el choque frío (Hengherr & Schill, 2018; Joseph et al., 2022; Kaczmarek, 2021; Kamilari et al., 2019; Møbjerg et al., 2011; Vecchi et al., 2021). Este hallazgo subraya la importancia de la investigación continua sobre la resistencia de los tardígrados y otros organismos extremófilos a condiciones extremas, y apoyan la necesidad de una mayor investigación para entender completamente los límites de la supervivencia de la vida en entornos extremos y extraterrestres.

Figura 2

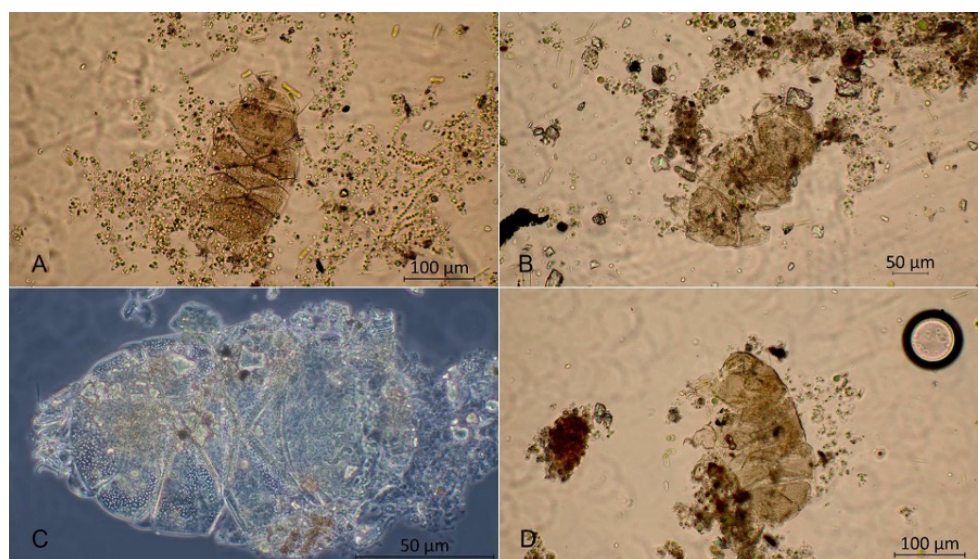


Figura 2. Ejemplares del Orden Echiniscoidea transportados a la estratósfera, este género es caracterizado por una serie de placas dorsales y ventrales lisas con pequeñas punteaduras

Conflictos de interés

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

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores contribuyeron tanto en la realización de la investigación como en la redacción del presente manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Octavio Chon Torres por organizar la salida a Ica, sin él esta investigación no se hubiera podido llevar a cabo. Además agradecemos a Alexandra Elbakyan por su contribución al acceso libre al conocimiento científico mediante Sci-Hub, facilitando la consulta de artículos clave para este trabajo.

FINANCIAMIENTO

Al Proyecto Estratósfera por brindarnos el transporte y los materiales necesarios para llevar a cabo nuestra investigación.

Referencias bibliográficas

- Anguas-Escalante, A., Pech, W. A. P., Guidetti, R., Cutz-Pool, L. Q., & León, H. O. (2018). Tardígrados asociados a una plantación de cítricos de traspatio en la comunidad de El Palmar en Quintana Roo, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (73), 20–26.
- Arakawa, K. (2022). Examples of extreme survival: tardigrade genomics and molecular anhydrobiology. *Annual Review of Animal Biosciences*, 10(1), 17–37. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-021419-083711>
- Degma, P., & Guidetti, R. (2017). Actual checklist of Tardigrada species (2009–2024: 01-07-2024). Disponible en <https://iris.unimore.it/retrieve/8d15cef0-2c1a-4d90-a2e2-815dcf1404c5/Actual>
- Fernandez, C., Vasanthan, T., Kisson, N., Karam, G., Duquette, N., Seymour, C., & Stone, J. R. (2016). Radiation tolerance and bystander effects in the eutardigrade species *Hypsibius dujardini* (Parachaela: Hypsibiidae). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 178(4), 919–923. <https://doi.org/10.1111/ZOJ.12481>
- Hagelbäck, P., & Jönsson, I. (2023). An experimental study on tolerance to hypoxia in tardigrades. *Frontiers in Physiology*, 14, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1249773>
- Hengherr, S., & Schill, R. O. (2018). Environmental adaptations: Cryobiosis. *Springer Nature Link*, 295-310. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95702-9_11
- Horikawa, D., Sakashita, T., Katagiri, C., Watanabe, M., Kikawada, T., Nakahara, Y., Hamada, N., Wada, S., Higashi, S., Kobayashi, Y., Okuda, T., & Kuwabara, M. (2006). Radiation tolerance in the tardigrade *Milnesium tardigradum*. *International Journal of Radiation Biology*, 82, 843–848. <https://doi.org/10.1080/09553000600972956>

- Joseph, K. M., O'Dell, H. M., Clark, T. A., Crislip, J. R., Smythers, A. L., Hicks, L. M., & Kolling, D. (2022). Physical and mechanistic characterization of tardigrade cryptobiotic states in response to environmental stressors. *The FASEB Journal*, *36*(S1). <https://doi.org/10.1096/FASEBJ.2022.36.S1.R3808>
- Jönsson, K. I. (2007). Tardigrades as a potential model organism in space research. *Astrobiology*, *7*(5), 757–766. <https://doi.org/10.1089/ast.2006.0088>
- Kaczmarek, Ł. (2021). Tardigrada: An emerging animal model to study the endoplasmic reticulum stress response to environmental extremes. *Progress in Molecular and Subcellular Biology*, *59*, 305–327. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67696-4_14
- Kamilari, M., Jørgensen, A., Schiøtt, M., & Møbjerg, N. (2019). Comparative transcriptomics suggest unique molecular adaptations within tardigrade lineages. *BMC Genomics*, *20*(1), 607. <https://doi.org/10.1186/S12864-019-5912-X>
- McGrath, C. (2024). Highlight: Tardigrades and the science of extreme survival. *Genome Biology and Evolution*, *16*(1), evad234. <https://doi.org/10.1093/gbe/evad234>
- Mcfatter, M., Meyer, H., & Hinton, J. (2007). Nearctic freshwater tardigrades: A review. *Journal of Limnology*, *66*, 84–89. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2007.s1.84>
- Møbjerg, N., Halberg, K. A., Jørgensen, A., Persson, D., Bjørn, M., Ramløv, H., & Kristensen, R. M. (2011). Survival in extreme environments – on the current knowledge of adaptations in tardigrades. *Acta Physiologica*, *202*(3), 409–420. <https://doi.org/10.1111/J.1748-1716.2011.02252.X>
- Municipalidad Distrital de Santiago. (2020). Plan de acción distrital de seguridad ciudadana 2020 Santiago-Ica. https://www.munisantiagoica.gob.pe/assets/archivos/CODISEC/PLAN_DE_ACCION_DE_SEGURIDAD_CIUADADANA.pdf
- Nelson, D., Guidetti, R., & Rebecchi, L. (2015). Phylum Tardigrada. En *Reference Module in Life Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385026-3.00017-6>
- Persson, D., Halberg, K., Jørgensen, A., Ricci, C., Møbjerg, N., & Kristensen, R. (2010). Extreme stress tolerance in tardigrades: Surviving space conditions in low earth orbit. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, *49*, 1–8. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0469.2010.00605.x>
- Pilato, G., & Binda, M. G. (2010). Definition of families, subfamilies, genera and subgenera of the Eutardigrada, and keys to their identification. *Zootaxa*, *2404*(1), 1–54. <https://doi.org/10.11646/ZOOTAXA.2404.1.1>
- Rebecchi, L., Boschetti, C., & Nelson, D. R. (2020). Extreme-tolerance mechanisms in meiofaunal organisms: A case study with tardigrades, rotifers and nematodes. *Hydrobiologia*, *847*(12), 2779–2799. <https://doi.org/10.1007/s10750-019-04144-6>
- Schuster, R., & Greven, H. (2007). A long-term study of population dynamics of tardigrades in the moss *Rhytidiadelphus squarrosus* (Hedw.) Warnst. *Journal of Limnology*, *66*, 141. <https://www.jlimnol.it/index.php/jlimnol/article/view/jlimnol.2007.s1.141>
- Rubal, M., Fontoura, P., & Veiga, P. (2023). New records of marine tardigrades (Arthotardigrada) from the Iberian Peninsula: Biogeographical implications. *Diversity*, *15*. <https://doi.org/10.3390/d15020210>
- Sadowska-Bartoszyńska, I., & Bartoszyński, 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>
- Vecchi, M., Kossi Adakpo, L., Dunn, R. R., Nichols, L. M., Penick, C. A., Sanders, N. J., Rebecchi, L., & Guidetti, R. (2021). The toughest animals of the earth versus

- global warming: Effects of long-term experimental warming on tardigrade community structure of a temperate deciduous forest. *Ecology and Evolution*, 11(14), 9856–9863. <https://doi.org/10.1002/ECE3.7816>
- Vasanthan, T., Alejaldre, L., Hider, J., Patel, S., Husain, N., Umapathisivam, B., & Stone, J. (2017). G-equivalent acceleration tolerance in the eutardigrade species *Hypsibius dujardini*. *Astrobiology*, 17(1), 55–60. <https://doi.org/10.1089/AST.2015.1439>
- Yoshida, Y., Koutsovoulos, G., Laetsch, D. R., Stevens, L., Kumar, S., Horikawa, D. D., Ishino, K., Komine, S., Kunieda, T., Tomita, M., Blaxter, M., & Arakawa, K. (2017). Comparative genomics of the tardigrades *Hypsibius dujardini* and *Ramazzottius varieornatus*. *PLOS Biology*, 15(7), e2002266. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PBIO.2002266>
- Weronika, E., & Łukasz, K. (2017). Tardigrades in space research—Past and future. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 47(4), 545–553. <https://doi.org/10.1007/s11084-016-9522-1>
- Zawierucha, K., Buda, J., Azzoni, R. S., Niškiewicz, M., Franzetti, A., & Ambrosini, R. (2019). Water bears dominated cryoconite hole ecosystems: Densities, habitat preferences and physiological adaptations of Tardigrada on an alpine glacier. *Aquatic Ecology*, 53(4), 543–556. <https://doi.org/10.1007/s10452-019-09707-2>

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), 32-43. <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

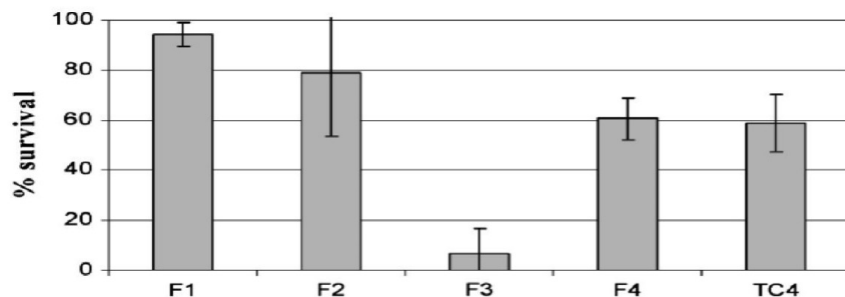


Figura 1. Poblaciones del *Macrobiotus richtersi* en el estado de anhidrobiosis (F1 y F2), hidratados (F3 y F4) y simulación espacial en laboratorio (TC4) (Extraído de Rebecchi et al., 2009).

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

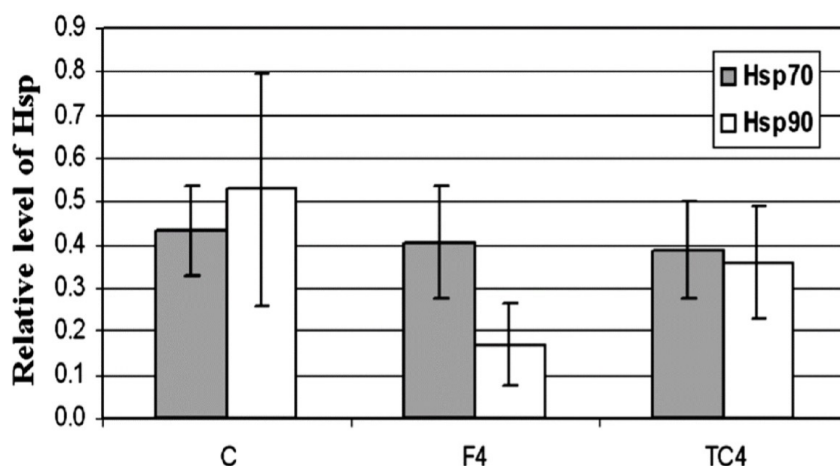


Figura 2. Poblaciones del *Macrobiotus richtersi* en el estado de anhidrobiosis (F1 y F2), hidratados (F3 y F4), simulación espacial en laboratorio (TC4) y control (T) (Extraído de Rebecchi et al., 2009).

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 *Macrobotus 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-Bartos, 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 *Paramacrobotus 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>