

# EXPLORANDO LA VIDA EN UN AMBIENTE EXTREMO: EXTREMÓFILOS EN EL CRÁTER VOLCÁNICO RINCÓN DE PARANGUEO, GUANAJUATO

Janet Sánchez-Sánchez <sup>1\*</sup> y Mariano Cerca <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla, 3001, 76230, Juriquilla, Querétaro, México.

<sup>2</sup>Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla, 3001, 76230, Juriquilla, Querétaro, México.

\*[janetsan@geociencias.unam.mx](mailto:janetsan@geociencias.unam.mx) (autora para correspondencia)

## RESUMEN

En la Tierra existen microorganismos que viven desafiando los límites de la vida tal y como la conocemos y son llamados “extremófilos”. Hasta hace poco, creíamos que la vida sólo era capaz de desarrollarse en ciertas condiciones. Pero en los últimos años, científicos de todo el mundo han encontrado vida microscópica creciendo en condiciones ambientales extremas. En la historia de la Tierra, los microorganismos extremófilos han dejado su huella en forma de microbialitas. En la actualidad, estos pequeños seres aún participan en la formación de microbialitas en muchas partes del mundo. En México se han reportado en varios sitios, como los lagos de cráteres volcánicos en el centro del país, y Rincón de Parangueo es uno de ellos. El lago cráter Rincón de Parangueo es producto de una explosión freatomagmática que hasta hace pocas décadas contenía un lago en su interior; desafortunadamente, las actividades humanas han contribuido a la disminución del nivel del lago. La reducción paulatina del lago ha sido acompañada por el aumento significativo de la salinidad y el pH del agua, propiciando un ambiente extremo para el desarrollo de la vida microbiana extremófila. Dentro del cráter, comunidades microbianas precipitan carbonatos como parte de su actividad biológica, contribuyendo a la formación de microbialitas. Estudios geobiológicos realizados en diferentes zonas del cráter han reportado comunidades microbianas capaces de sobrevivir a las condiciones extremas del lugar. El desarrollo de comunidades microbianas extremófilas se ha documentado principalmente en tres zonas del cráter: 1) antigua costa del lago, 2) pozas remanentes y 3) sedimentos profundos del lago. El desarrollo de microorganismos extremófilos en ambientes tan peculiares como Rincón de Parangueo es de especial importancia para entender el origen, evolución y distribución de la vida en la Tierra. Además, son fuente de conocimiento científico y tecnológico, que puede ser aplicado en la búsqueda de vida en otros planetas con características extremas similares a las identificadas en la Tierra.

**Palabras clave:** microbialitas, cráter lago, Rincón de Parangueo, microorganismos extremófilos, ambiente extremo.

## ABSTRACT

*On Earth, some microorganisms that live defying the limits of life as we know it are called "extremophiles". Until recently, it was believed that life was only capable of developing under certain conditions. But in recent years, scientists around the world have found microscopic life growing in extreme environmental conditions. In Earth history, extremophile microorganisms have left their mark in the form of fossil microbialites. At present, these small beings still participate in the formation of microbialites in many parts of the world. In Mexico they have been reported in several places, such as volcanic crater lakes in the center of the country and Rincón de Parangueo is one of them. The Rincón de Parangueo crater lake is the product of a phreatomagmatic explosion, which until a few decades ago contained a perennial lake inside, unfortunately, human activities have contributed to the water level decrease. The gradual desiccation of the lake has been accompanied by a significant increase in the salinity and pH of the water, providing an extreme environment for the development of extremophile microbial life. Within the crater, microbial communities precipitate carbonates as part of their biological activity, contributing to the formation of microbialites. Geobiological studies carried out in different areas of the crater have reported microbial communities capable of surviving the extreme conditions of the place. The development of extremophile microbial communities has been documented mainly in three areas of the crater: 1) the former lake shoreline, 2) remnant pools, and 3) deep lake sediments. The development of extremophile microorganisms in such peculiar environments as Rincón de Parangueo is of special importance to understand the origin, evolution, and distribution of life on Earth. In addition, they are a source of scientific and technological knowledge that can be applied in the search for life on other planets with extreme characteristics similar to those identified on Earth.*

**Keywords:** microbialites, crater lake, Rincón de Parangueo, extremophile microorganisms, extreme environment.

## INTRODUCCIÓN

Prepárate porque estás a punto de conocer un lugar en nuestro planeta que pareciera salir de un cuento de ciencia ficción. A pesar del importante papel que juegan los microorganismos en el ambiente, muchos de nosotros tenemos una percepción negativa sobre los microbios en nuestra vida diaria. Conocemos a los microbios por su potencial de causar enfermedades en el ser humano. Sin embargo, olvidamos que son esenciales para sostener la vida en la Tierra y que la mayoría de ellos no causan enfermedades.

Para cambiar la percepción negativa sobre los microorganismos es necesario que el conocimiento científico sea transmitido a la sociedad. Entender qué son los microorganismos, cómo funcionan y la estructura de sus comunidades es necesario para saber cuál es su papel en la naturaleza. Este conocimiento nos podría ayudar a especular sobre la pregunta de si existe vida en otros planetas. Hasta el momento es una pregunta que no es posible contestar con certeza, pero hoy sabemos que existe una gran posibilidad de que la respuesta sea sí. Hasta hace poco, creíamos que la vida sólo era capaz de desarrollarse en las condiciones que consideramos “normales” como son la presencia de oxígeno, una temperatura cercana a 25 °C, presión cercana a 1 atmósfera, pH neutro, ausencia de radiación y ausencia de gases tóxicos.

En algunos lugares de la Tierra, se han descubierto microorganismos llamados “extremófilos” (derivado del Latin “*extremus*” que significa extremo y del Griego “*philia*” que significa amor) capaces de crecer y reproducirse en condiciones muy alejadas de lo que consideramos normal y que serían letales para otras formas de vida (Wharton, 2007; Horikoshi *et al.*, 2010). Organismos extremófilos han sido identificados y aislados aquí en la Tierra en lugares que parecen salir de cuentos de ciencia ficción: por ejemplo, ambientes con temperaturas superiores a los 100 °C como fumarolas submarinas, cráteres volcánicos y fuentes hidrotermales (Combie y Runnion, 1996). Otros pueden vivir en medios extremadamente fríos, como el hielo del océano Ártico y los lagos subglaciales del permafrost en la Antártica, con temperaturas de hasta -20 °C (Nicolau *et al.*, 2000). En cambio, otros se han adaptado a vivir en ambientes ácidos como los que existen en las fuentes hidrotermales o en los residuos mineros (Johnson, 2009). También se desarrollan en lugares con una alta concentración de sales y alta radiación solar, como es el caso del desierto de Atacama (Connon *et al.*, 2007).

El objetivo de este trabajo es transmitir al público en general conceptos básicos sobre microorganismos extremófilos, contribuir al desarrollo de materiales que faciliten su aprendizaje e informar sobre la existencia de lugares en México y el mundo donde este tipo de microorganismos se desarrollan, en particular Rincón de Parangueo en el estado de Guanajuato, un sitio de gran valor para la comunidad científica. Aquí exploramos la presencia de microorganismos extremófilos en un cráter volcánico y buscamos que este texto y su material audiovisual sirvan como guía para el conocimiento ambiental de la zona.

### Microbialitas: las primeras formas de vida en la Tierra

En la historia de la Tierra los microorganismos extremófilos han dejado su huella en forma de microbialitas. El registro fósil más antiguo de microbialitas conocido hasta el momento se encuentra en Warrawoona, Australia, con más de 3 450 millones de años de antigüedad (Allwood *et al.*, 2006). En la actualidad, comunidades

de microorganismos siguen formando microbialitas en condiciones extremas. Un ejemplo son las estructuras más abundantes y diversas descubiertas en 1954 en la costa de Hamelin Pool Shark Bay en Australia, las cuales se desarrollaron en un ambiente marino hipersalino donde la salinidad puede alcanzar hasta 70 ‰ (partes por mil) o 7 %, el doble del agua de mar normal (Papineau *et al.*, 2005). Otro ejemplo son las aguas termales y géiseres en el Parque Nacional Yellowstone, en los Estados Unidos, donde habitan comunidades bacterianas y algas a temperaturas de hasta 70 °C (Combie y Runnion, 1996). Se desarrollan además en lagos de cráteres intercontinentales con condiciones de alta alcalinidad: tal es el caso de Lake Van en Turquía, donde se han reportado las estructuras más grandes conocidas hasta el momento con una altura de hasta 40 metros. Otras se desarrollan en lagos con regímenes tectónicos activos, como es el caso de África del Este, donde existen condiciones como alta alcalinidad, salinidad y altas temperaturas: ejemplo de ello son el lago Bogoria y el lago Magadi en Kenia; el lago Natron, el lago Magadi y el lago Embagi en Tanzania (Casanova, 1986).

### ¿Existen microbialitas en México?

Si, claro. No es necesario ir muy lejos para encontrarlas. En México el desarrollo de comunidades de microbios produciendo microbialitas se ha reportado en diversos sitios tales como la laguna de Bacalar en el estado de Quintana Roo, la Laguna Mormona y San Quintín en Baja California, Cuatro Ciénegas en Coahuila, Bahía Concepción en Baja California Sur y en los lagos cráter Alchichica en Puebla y Rincón de Parangueo en Valle de Santiago en Guanajuato. En particular, en las zonas volcánicas del centro de México los científicos han identificado comunidades microbianas formadoras de microbialitas en diferentes lagos dentro de cráteres volcánicos, entre los que destacan Alchichica en Puebla; Rincón de Parangueo, La Alberca y Joya de Yuriria, en Guanajuato; y Quechulac, Alberca Los Espinos, Aljojuca, La Preciosa, Tecuitlapa y Atexcac en Michoacán (Iniesto *et al.*, 2021). Estos cráteres son el producto de una explosión freático-magmática, es decir una explosión consecuencia del contacto entre magma y agua subterránea (Figura 1a). Suelen llenarse de agua años después de su formación y crean lagos de poca profundidad (Figura 1b) que en muchas ocasiones contienen agua con una alta salinidad y alcalinidad, lo que permite el desarrollo de microbialitas.

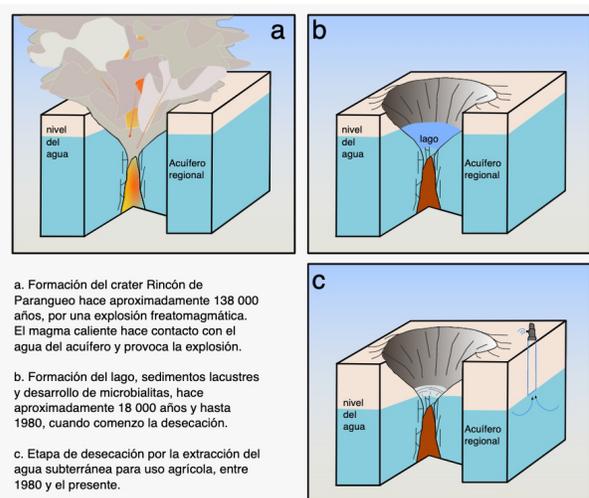


Figura 1. Esquema de la formación y evolución de Rincón de Parangueo en Guanajuato.

En este trabajo presentamos un lugar accesible en el centro de México donde se puede llevar a cabo una excursión para observar de primera mano cómo los microbios pueden crecer en ambientes extremos. Como material de apoyo se elaboró un video con la finalidad de presentar las microbialitas formadas por las comunidades microbianas en este lugar y sus principales características. El video se puede consultar en la siguiente dirección electrónica:

<https://www.youtube.com/watch?v=m5Txi1yAUM>

## RINCÓN DE PARANGUEO

### Un ambiente extremo para el desarrollo de vida extremófila

El cráter lago Rincón de Paranguero (Figura 2a) es clasificado como un ambiente extremo debido a las características fisicoquímicas del agua y a los sedimentos que se encuentran en su interior, tales como un alto contenido de sales, presencia de carbonatos, un pH alcalino  $\sim 10$ , altos niveles de radiación, altas tasas de evaporación y baja precipitación durante la mayor parte del año (Tabla 1, Sánchez-Sánchez *et al.*, 2021). La desecación del lago a partir del año 1980 debido a la sobreexplotación de agua subterránea para su uso en la producción agrícola de la zona (Figura 1c) ha provocado la salinización del agua remanente y ha dejado al descubierto estructuras sedimentarias (microbialitas) constituidas por comunidades microbianas (Figura 2c). Gracias a estudios geobiológicos realizados en Rincón de Paranguero se han identificado comunidades microbianas formadoras de microbialitas pertenecientes a los tres dominios de la vida (*Bacteria*, *Arquea* y *Eucaria*) y que además son capaces de sobrevivir a las condiciones extremas del cráter (Sánchez-Sánchez *et al.*, 2019).

Tabla 1. Datos generales del cráter Rincón de Paranguero y algunas propiedades fisicoquímicas del agua.		
	Valor	Referencia
Coordenadas	20° 25' N, -101° 15' W	GPS diferencial
Altura sobre el nivel del mar	1700 m	Aranda-Gómez <i>et al.</i> , 2013
Diámetro del cráter	1300 m	Aranda-Gómez <i>et al.</i> , 2017
Edad en miles de años	137 ± 89	Aranda-Gómez <i>et al.</i> , 2013
pH	10-11	Sánchez-Sánchez <i>et al.</i> , 2021
Conductividad	165 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Armienta <i>et al.</i> , 2008
Temperatura	30 °C	<i>In situ</i>
Tipo de agua	CO <sub>2</sub> -Cl-Na	Armienta <i>et al.</i> , 2008
Nivel de radiación	Alto	www.wunderground.com
Tasa de evaporación	1935 mm/año	Escolero y Alcocer, 2004
Precipitación	715- 738 mm/año	Escolero y Alcocer, 2004

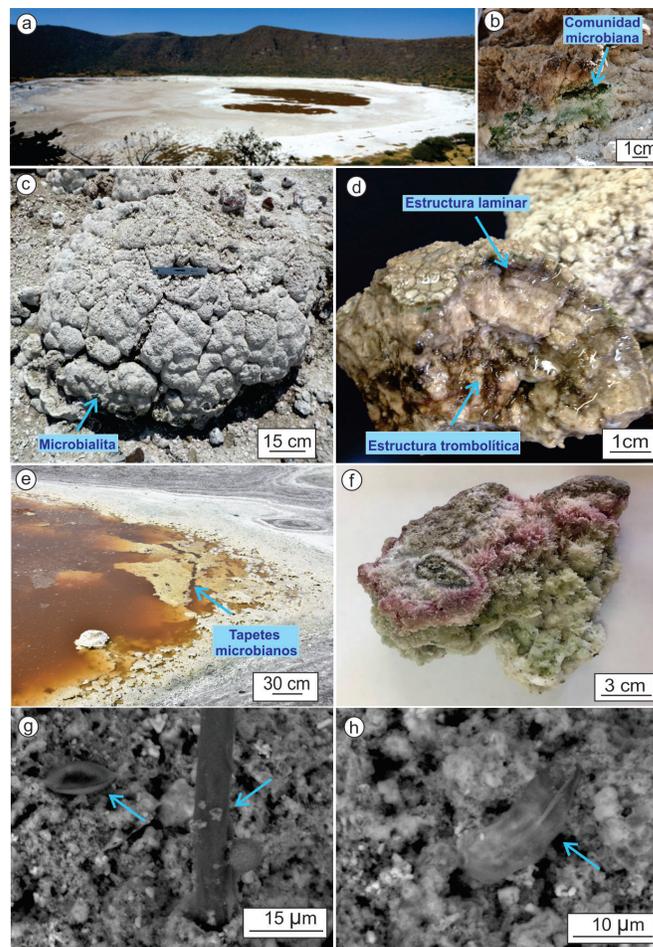


Figura 2. a) Vista panorámica del lago cráter Rincón de Paranguero. Pequeñas charcas se observan en la parte central. b) Sedimentos carbonatados ubicados en la falla geológica principal. El desarrollo de comunidades microbianas se puede apreciar por el color verde de los sedimentos. c) Microbialitas ubicadas en la falla principal del cráter. d) Estructura interna de las microbialitas, caracterizada por una estructura estromatolítica en la parte superficial y una estructura trombolítica hacia la parte central. e) Pequeñas pozas de agua en el centro del cráter. El tamaño y color varían durante el año. f) Tapetes microbianos formados en las pozas. Los colores del tapete son característicos del crecimiento de microorganismos. g), h) Imágenes de microscopía electrónica de muestras de sedimentos. En las imágenes se pueden observar microorganismos (flechas azules).

El desarrollo de comunidades microbianas se ha reconocido especialmente en tres zonas:

1. Antigua costa del lago: en esta zona se ubican las microbialitas con mayor tamaño en todo el cráter, que en promedio alcanzan un tamaño de 1 m de ancho y 1.8 m de largo (Figura 2c). Su estructura interna está caracterizada por una sedimentación laminar o estromatolítica en la parte superficial y una estructura trombolítica, es decir amorfa e irregular, hacia el núcleo (Figura 2d). El desarrollo de microbialitas forma un anillo concéntrico discontinuo alrededor de todo el cráter, que coincide además con la falla geológica principal. Su cercanía a la falla habla del aporte de gases volcánicos, principalmente CO<sub>2</sub>, que son emitidos a través de ella y son utilizados por los microorganismos (Figura 2b) para la precipitación de carbonatos, determinando así un mayor desarrollo de microbialitas en comparación con otras zonas del cráter.

2. Pozas remanentes: en la actualidad la mayor parte del lago se encuentra seco, únicamente el 10 % de la zona que cubría el lago permanece cubierto de agua, por lo cual solo existen pequeñas pozas o charcas. Las pozas pueden variar en tamaño y profundidad (siempre menor a 1 metro) dependiendo de la temporada de lluvia o sequía y contienen una gran cantidad de sales carbonatadas, mayormente producto de la evaporación del agua. Dentro de ellas (Figura 2e) habitan comunidades microbianas suspendidas en el agua creando tapetes microbianos, una especie de "balsa" que flota en el agua, y que se forman mayormente en la temporada de sequía. La presencia de microbios en los tapetes microbianos se manifiesta con colores rosa y verde que es posible observar a simple vista (Figura 2f). No solo en los tapetes microbianos existen microorganismos: una gran cantidad de ellos se encuentran también suspendidos flotando en el agua, lo que explica el cambio de color con las estaciones.

3. Sedimentos profundos del lago: si lo anterior te parece poco, también es posible que estos diminutos seres puedan sobrevivir en el subsuelo del cráter, en los sedimentos que quedaron sepultados hace miles de años. Muestras tomadas a una profundidad de 4 m fueron analizadas en un microscopio electrónico sugiriendo la existencia de microorganismos en los sedimentos (Figuras 2g y 2h). Lo anterior ha llevado a los científicos a hacerse varias preguntas: ¿Hasta dónde es posible que exista la vida en lo profundo de los sedimentos del cráter? o ¿Es posible que microorganismos como los encontrados en Rincón de Parangueo existan en lo profundo de los sedimentos en otros cráteres?

El especial interés en los microorganismos extremófilos identificados en Rincón de Parangueo es debido a las capacidades específicas de adaptación y supervivencia para desarrollarse en un ambiente tan peculiar. Hoy sabemos que dentro del cráter existen microorganismos capaces de resistir altos niveles de salinidad, radiación intensa y altos índices de evaporación, así como microorganismos capaces de sobrevivir a temperaturas relativamente altas ~ 60 °C.

Algunos de los microorganismos extremófilos identificados en Rincón de Parangueo también se han identificado en sitios del mundo con características similares, como una alta salinidad, alcalinidad y altas temperaturas (se presenta una lista con ejemplos en la Tabla 2). Sin embargo, algunos microorganismos reconocidos son exclusivos de este lugar (endémicos), por lo que es posible identificar especies con características únicas y especiales que las convierten en potenciales fuentes de conocimiento científico y tecnológico para el desarrollo de biotecnología aplicada (producción de alimentos, bebidas, antibióticos, biofertilizantes, etc.) en diferentes industrias a nivel global.

### ¿VIDA EN OTROS PLANETAS?

Como ya te pudiste dar cuenta, las comunidades microbianas descubiertas en Rincón de Parangueo viven en un ambiente extremo y su capacidad para desarrollar estrategias de supervivencia es un punto clave. Por ejemplo, algunos microorganismos pueden crecer en un medio hipersalino gracias a mecanismos celulares como la acumulación de grandes concentraciones de KCl en el citoplasma y tienen la capacidad de producir proteínas resistentes a las altas concentraciones de sal (DasSarma y DasSarma, 2017). Otros cuentan con mecanismos de reparación para el material genético dañado por la alta radiación solar (Crowley *et al.*, 2006) y también existen los que

**Tabla 2.** Principales microorganismos extremófilos identificados en Rincón de Parangueo y que también se han encontrado en otras partes del mundo.

Género	Especie	Ubicación
<i>Rhodobaca sp.</i>	<i>Rhodobaca bogoriensis</i> <i>Rhodobaca barguzinensis</i>	Agua y sedimentos del Lago Bogoria, Kenia Lago Barguzin valley, Siberia
<i>Nitiliruptor sp.</i>	<i>Nitiliruptor alkaliphilus</i>	Sedimentos del lago Estepa de Kulunda, Rusia
<i>Nocardiopsis sp.</i>	<i>Nocardiopsis valliformis</i>	Sedimentos del lago Xinjiang, China
<i>Psychroflexus sp.</i>	<i>Psychroflexus salis</i> <i>Psychroflexus planctonicus</i>	Lago salado en la provincia Qinghai, China
<i>Defluviimonas sp.</i>	<i>Defluviimonas indica</i>	Chimenea hidrotermal, mar del suroeste de India
<i>Microvirga sp.</i>	<i>Microvirga subterranea</i>	Agua del acuífero hidrotermal Great Craft Basin
<i>Elioraea sp.</i>	<i>Elioraea tepidiphila</i>	Fuente termal en la isla de Sao Miguel, Azores
<i>Rubrobacter sp.</i>	<i>Rubrobacter radiotolerans</i>	Fuente termal Sao Pedro do Sul, Portugal
<i>Belliella sp.</i>	<i>Belliella pelovolcani</i>	Lodo volcánico en Wandan, Taiwán
<i>Cecembia sp.</i>	<i>Cecembia lonarensis</i>	Agua de lago en Maharashtra, India
<i>Thermomicrobium sp.</i>	<i>Thermomicrobium carboxidum</i>	Tapetes microbianos del volcán Kilauea Hawái, USA
<i>Salinarimonas sp.</i>	<i>Salinarimonas ramus</i>	Suelo salino de un yacimiento petrolero en Shengli, China
<i>Porphyrobacter sp.</i>	<i>Porphyrobacter tepidarius</i>	Tapetes microbianos en aguas termales en Shidzuoka, Japón
<i>Picocystis sp.</i>	<i>Picocystis salinarum</i>	Lagos salinos y chimeneas hidrotermales en África del Este
<i>Halosimplex sp.</i>	<i>Halosimplex carlsbadense</i>	Cristales de sal de la formación Salado en el sureste de Nuevo México
<i>Natronolimnobius sp.</i>	<i>Natronolimnobius innermongolicus</i>	Lagos en el interior de Mongolia, China
<i>Natrialba sp.</i>	<i>Natrialba aegyptiaca</i>	Suelos hipersalinos en Asuán, Egipto
<i>Methanosalsum sp.</i>	<i>Methanosalsum natronophilum</i>	Sedimentos de lagos salados en la estepa de Kulunda, Rusia
<i>Methanolobus sp.</i>	<i>Methanolobus oregonensis</i>	Agua de lago salino en el cráter Lonar, India

producen vesículas de gas dentro de sus células que les permiten flotar a lugares donde la concentración de oxígeno es mayor (Pfeifer, 2015). Algunos, además, tienen la capacidad de colonizar los poros de las rocas y/o las fisuras de los sedimentos evitando cambios drásticos de temperatura y humedad, lo que les da una ventaja para sobrevivir (Sajjad *et al.*, 2022). El desarrollo de comunidades extremófilas en ambientes tan peculiares es de especial importancia para entender el origen, evolución y distribución de la vida en la Tierra. Este conocimiento puede ser aplicado en la búsqueda de vida en planetas con características extremas similares a las identificadas en la Tierra. La posibilidad de que microorganismos extremófilos puedan sobrevivir en otros planetas es intrigante. Microorganismos adaptados a altas concentraciones de sal, altas temperaturas y radiación solar pueden ser modelos clave en la búsqueda de vida en otras partes del universo. Comunidades microbianas similares a las descubiertas en Rincón de Parangueo y en otros lugares de la Tierra podrían estar escondidas dentro de las rocas y/o los sedimentos en planetas como Marte, donde no existe una fuente abundante de agua, los nutrientes son escasos, el suelo contiene sales y existe una alta radiación solar.

## CONCLUSIONES

Estudiar lugares con características extremas como el cráter Rincón de Parangueo en el estado de Guanajuato es muy importante para entender el desarrollo de la vida en nuestro planeta y tal vez aún más lejos. Microorganismos extremófilos podrían sobrevivir no sólo en la Tierra sino también en otros planetas. Por ello, es importante alentar a la conservación de sitios donde se desarrolla la vida extrema, pues son el hogar de una diversidad enorme de microorganismos que han sobrevivido por miles de años. Sería lamentable que lugares con características tan peculiares desaparecieran como consecuencia del impacto que las actividades humanas tienen en ellos. Desafortunadamente, Rincón de Parangueo es también un lugar donde la sobreexplotación de agua subterránea, deforestación, contaminación y uso recreativo de forma inapropiada han provocado el deterioro ambiental en los últimos años, convirtiéndose en un grave problema. La buena noticia es que aún estamos a tiempo de rescatar este hermoso lugar. La planeación e implementación de estrategias que ayuden a la conservación de las estructuras microbianas requieren de la interacción entre los tomadores de decisiones, científicos y la comunidad local.

## REFERENCIAS

Altermann, W. (2008). Accretion, trapping and binding of sediment in Archean stromatolites—morphological expression of the antiquity of life. *Space Science Reviews*, 135(1), 55-79.

Allwood, A. C., Walter, M. R., Kamber, B. S., Marshall, C. P., y Burch, I. W. (2006). Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia. *Nature*, 441(7094), 714-718.

Aranda-Gómez, J. J., Levresse, G., Pacheco Martínez, J., Ramos-Leal, J. A., Carrasco-Núñez, G., Chacón-Baca, E. y Noyola-Medrano, C. (2013). Active sinking at the bottom of the Rincón de Parangueo Maar (Guanajuato, México) and its probable relation with subsidence faults at Salamanca and Celaya. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 169-188.

Aranda-Gómez, J. J., Cerca, M., Rocha-Treviño, L., Carrera-Hernández, J. J., Levresse, G., Pacheco, J. y Beraldi-Campesi, H. (2017). Structural evidence of enhanced active subsidence at the bottom of a maar: Rincón de Parangueo, México. *Geological*

*Society*, London, Special Publications, 446(1), 225-254.

Armienta, M. A., Vilaclara, G., De la Cruz-Reyna, S., Ramos, S., Cenicerros, N., Cruz, O. y Arcega-Cabrera, F. (2008). Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(2), 249-258.

Casanova, J. (1986). East African rift stromatolites. *Geological Society*, London, Special Publications, 25(1), 201-210.

Combie, J., y Rynnion, K. (1996). Looking for diversity of Yellowstone extremophiles. *Journal of industrial microbiology and biotechnology*, 17(3-4), 214-218.

Connon, S. A., Lester, E. D., Shafaat, H. S., Obenhuber, D. C., y Ponce, A. (2007). Bacterial diversity in hyperarid Atacama Desert soils. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G4).

Crowley, D. J., Boubriak, I., Berquist, B. R., Clark, M., Richard, E., Sullivan, L., y McCready, S. (2006). The *uvrA*, *uvrB* and *uvrC* genes are required for repair of ultraviolet light induced DNA photoproducts in *Halobacterium* sp. NRC-1. *Saline systems*, 2, 1-13.

DasSarma, S., y DasSarma, P. (2017). Halophiles. *eLS*, 1-13.

Escolero, O., y Alcocer, J. (2004). Desecación de los lagos cráter del Valle de Santiago, Guanajuato. In: El agua en México vista desde la Academia. (Eds: Jiménez, B., y Marín, L) México City, Academia Mexicana de Ciencias, 99-115.

Horikoshi, K., Antranikian, G., Bull, A. T., Robb, F. T., y Stetter, K. O. (2010). *Extremophiles handbook*: Springer Science y Business Media.

Iniesto, M., Moreira, D., Reboul, G., Deschamps, P., Benzerara, K., Bertolino, P., y López-García, P. (2021). Core microbial communities of lacustrine microbialites sampled along an alkalinity gradient. *Environmental Microbiology*, 23(1), 51-68.

Johnson, D. B. (2009). *Extremophiles: acidic environments*. The desk encyclopedia of microbiology, 463-480.

Nicolaus, B., Lama, L., Esposito, E., Bellitti, M. R., Improta, R., Panico, A., y Gambacorta, A. (2000). Extremophiles in Antarctica. *Italian Journal of Zoology*, 67(S1), 169-174.

Papineau, D., Walker, J. J., Mojzsis, S. J., y Pace, N. R. (2005). Composition and structure of microbial communities from stromatolites of Hamelin Pool in Shark Bay, Western Australia. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(8), 4822-4832.

Pfeifer, F. (2015). Haloarchaea and the formation of gas vesicles. *Life*, 5(1), 385-402.

Sajjad, W., Ilahi, N., Kang, S., Bahadur, A., Zada, S., y Iqbal, A. (2022). Endolithic microbes of rocks, their community, function and survival strategies. *International Biodeterioration y Biodegradation*, 169, 105387.

Sánchez-Sánchez, J., Cerca, M., Alcántara-Hernández, R. J., Lozano-Flores, C., Carreón-Freyre, D., Levresse, G. y Aranda-Gómez, J. J. (2019). Extant microbial communities in the partially desiccated Rincón de Parangueo maar crater lake in Mexico. *FEMS microbiology ecology*, 95(5), f02051.

Sánchez-Sánchez, J., Cerca, M., Alcántara-Hernández, R. J., Aranda-Gómez, J. J., Carreón-Freyre, D., Lozano-Flores, C., y Varela-Echavarría, A. (2021). Mobile mud layer underneath the desiccated maar lake of Rincón de Parangueo and insights into its microbial fingerprints. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38(3), 178-192.

Wharton, D. A. (2007). *Life at the limits: organisms in extreme environments*. Cambridge University Press.

Manuscrito recibido: 7 de octubre de 2022

Manuscrito corregido recibido: 14 de marzo de 2023

Manuscrito aceptado: 18 de marzo de 2023