

Microorganismos xerófilos cultivables de la zona semiárida de la Tatacoa (Colombia)

Culture xerophile microorganisms from the Tatacoa semiarid zone (Colombia)

Hermes Hernán Bolívar Torres¹, Yael Natalia Méndez², Jimena Sánchez Nieves³,
María Angélica Leal⁴, Elkin Marcelo Ruiz⁵

Resumen

Introducción. Los microorganismos xerófilos han adquirido una mayor relevancia para la realización de investigaciones relacionadas con sus mecanismos adaptativos frente al estrés hídrico, así como la caracterización e identificación de sus hábitats. En Colombia, las zonas semiáridas y desérticas como el desierto de la Tatacoa han sido poco estudiadas a nivel microbiano. **Objetivo.** Aislar y caracterizar microorganismos xerófilos provenientes del suelo de la zona semiárida de la Tatacoa del departamento del Huila (Colombia). **Materiales y métodos.** Se colectaron muestras en los sectores denominados localmente como Cuzco y La Victoria, las cuales fueron procesadas para el aislamiento de microorganismos xerófilos en medio selectivo M40Y para posterior caracterización macro y microscópica, así como evaluación mediante pruebas bioquímicas para la utilización de sustratos. **Resultados.** Fueron aislados 29 morfotipos entre los cuales se pudieron diferenciar: Bacilos y cocos Gram positivos presentes exclusivamente en el sector del Cuzco y bacterias filamentosas ramificadas (actinobacterias) únicamente en el

1. Laboratorio de microbiómica. Universidad Nacional Autónoma de México ENES Morelia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5700-8199>

CVLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000085665

2. Grupo de Caracterización Tecnológica de Minerales. Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6306-7737>

CVLAC: http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001585081

3. Profesora Asociada. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-7056>

CVLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000152773

4. Docente PEAMA Sumapaz. Universidad Nacional de Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-6903-4132>.

CVLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001445410

5. Laboratorio microbiología del suelo. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3103-7768>

CVLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001640658

Correo electrónico de correspondencia: hhbolivart@unal.edu.co

Institución donde se realizó el estudio: Universidad Nacional de Colombia.

sector de La Victoria. Se estableció la presencia de los géneros *Streptomyces*, *Micrococcus* y *Corynebacterium*. **Conclusiones.** La presencia de microorganismos relacionados con los géneros anteriormente mencionados permitirá comprender las posibles interacciones que se presentan en este ecosistema, lo que aportará al desarrollo de este lugar como un posible análogo para estudios de búsqueda de vida en otros planetas como Marte. Además, incentivar estudios más detallados donde se puedan recuperar microorganismos que sean de utilidad para diferentes procesos biotecnológicos.

Palabras claves: bacterias, desecación, zona árida, exobiología, Colombia, Marte.

Abstract

Introduction. Xerophilic microorganisms have become more relevant for conducting research related to their adaptive mechanisms against water stress, as well as the characterization and identification of their habitats. In Colombia, semi-arid and desert areas such as the Tatacoa desert have been little studied at the microbial level. **Objective.** Isolation and characterization of cultivable xerophilic microorganisms from the soil of the semi-arid zone of Tatacoa, in the department of Huila (Colombia). **Material and methods.** For this, samples were collected in the sectors locally called Cuzco and La Victoria, which were processed for the isolation of xerophilic microorganisms in selective M40Y medium for subsequent macro and microscopic characterization, as well as evaluation by biochemical tests for the use of substrates. **Results.** 29 morphotypes were isolated among which it was possible to differentiate: Gram-positive bacilli and cocci present exclusively in the Cuzco sector and branched filamentous bacteria (Actinobacteria) only in the La Victoria sector. The presence of the genera *Streptomyces*, *Micrococcus* and *Corynebacterium* was established. **Conclusions.** The presence of microorganisms related to the mentioned genera will allow us to understand the possible interactions that occur in this ecosystem, which will contribute to the development of this place as a possible analogue of studies for the search for life on other planets such as Mars. In addition, promote more detailed studies where microorganisms that are useful for different biotechnological processes can be recovered.

Keywords: bacteria, desiccation, arid zone, exobiology, Colombia, Mars.

Introducción

Se han definido los microorganismos xerófilos como “organismos extremófilos que requieren una baja disponibilidad de agua”(1), el término “xerófilo” se ha aplicado principalmente en hongos y éste fue acuñado por Scott (2), para referirse a este tipo de organismos (3). De acuerdo con Gargaud (1), este tipo de microorganismos pueden llegar a sobrevivir con una actividad acuosa inferior a 0,8.

El estudio de microorganismos xerófilos en otras áreas del conocimiento ha sido limitado puesto que son pocos los estudios de su aislamiento a partir de muestras de suelo a través de métodos de cultivo convencional (4). Más recientemente el estudio de estos microorganismos se ha enfocado especialmente en hongos que crecen en alimentos preservados con altas concentraciones de sal y azúcar (4–6), debido a que muchos frutos y granos suelen ser secos y se guardan en lugares en donde las condiciones de humedad son muy bajas, y suele presentarse contaminación por este tipo de organismos.

Actualmente, ha incrementado el interés respecto al estudio de los microorganismos xerófilos y sus posibles aplicaciones debido al aumento de la superficie desértica en todo el mundo por cambio climático (7). Además, este tipo de microorganismos ha atraído la atención de los astrobiólogos y expertos en exploración espacial debido a que continuamente, suelen ser encontrados en ambientes hipersalinos y podrían llegar a

usar peróxido de hidrogeno (H₂O₂) como solvente (8), lo cual sugiere que podrían tolerar condiciones similares a las que se presentan en Marte y otros cuerpos del sistema solar (9).

Las principales publicaciones relacionadas con xerófilos se han dado principalmente en estudios realizados en el desierto de Atacama en Chile (10–13), pues, posee varias particularidades que llaman la atención de los investigadores como su antigüedad (150 millones de años aproximadamente), su altura al nivel del mar entre 1000 y 2000 m (14) y la presencia de salares que surgieron de la elevación de la cordillera de los Andes. De este modo en el desierto no solo se pueden encontrar lugares con condiciones de estrés hídrico, sino también zonas con altas concentraciones de sal y metales tóxicos (15), lo que ha generado un crecimiento en el interés de comprender la microbiota que allí habita (16).

Estos factores han provocado un aumento en la exploración y caracterización de microorganismos xerófilos como lo demuestran los estudios de este tipo dados en diferentes lugares áridos y desérticos en todo el mundo, tales como el desierto de Sonora en México (17), el desierto del Sahara (18), la zona desértica ubicada en medio oriente, principalmente en Irán (19), el desierto de Mongolia (20), las zonas semiáridas de Brasil (21), en el desierto de Namibia (22), en las zonas áridas cercanas al Ártico (23) y en la superficie del continente antártico (10).

En Colombia existe una diversidad de ecosistemas debido a su posición y conformación geográfica, lo que ha permitido la existencia de zonas subxerofíticas conocidas entre los pobladores como desiertos, siendo los de mayor extensión el Desierto de La Guajira, y en el departamento del Huila, la zona semiárida de La Tatacoa (24). Esta zona es en realidad un bosque seco tropical, que posee un clima semiárido tropical, con presencia de organismos que poseen adaptaciones típicas de un ambiente xerofítico (25). Si bien la investigación sobre esta zona del país se ha centrado en la búsqueda de fósiles y la caracterización de la fauna y la flora presente, Méndez (26) realizó un estudio con el fin de caracterizar la microbiota que pudiese soportar condiciones similares a las del planeta Marte. Con estos antecedentes, el presente estudio consistió en realizar una caracterización de microorganismos xerófilos cultivables presentes en la zona de la Tatacoa, (Colombia).

Materiales y métodos

Sitio de muestreo y recolección de muestras

El muestreo se realizó en la zona conocida como desierto de la Tatacoa, ubicada en el sector oriental de la Población de Villavieja, departamento del Huila, ubicado en la región andina de Colombia, la cual posee una extensión de 330 km² y una temperatura promedio anual de 30°C. Posee dos periodos secos y dos de lluvias, y las precipitaciones superan los 1000 mm (25).

La zona corresponde a la formación geológica La Victoria de edad Neógeno, en la intercalación de unidades de arenitas de grano grueso a grano fino de apariencia gris “sal y pimienta”, con lodolitas de color verde gris y rojo café. Esta litología se intercala lateral y verticalmente en diferentes sectores adyacentes a la población de Villavieja (27), denominados localmente como sector de La Victoria y Cuzco, respectivamente (28), donde fueron elegidos tres puntos de muestreo al azar por cada área, con distancias entre 50 y 200 m entre estos, asignándoles numeración impar acorde a la nomenclatura de otros trabajos de la zona desarrollados por el mismo laboratorio (Tabla 1). Posteriormente, las muestras fueron preservadas en refrigeración y llevadas al laboratorio de microbiología del suelo del Departamento de Biología en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

Tabla 1. Puntos de muestreo del estudio en la Tatacoa (Colombia).

Sector	Punto de muestreo	Coordenadas geográficas
Cuzco	1	3°13.925' N, 75°10,09' W
	3	3°13.883' N, 75°10,094' W
	5	3°13.829' N, 75°10,072' W
Victoria	1	3°13.761' N, 75°9.538' W
	3	3°13.727' N, 75°9.527' W
		3°13.895' N, 75°9.615' W

Fuente: Autores.

Aislamiento microorganismos xerófilos

Para el aislamiento de microorganismo se tuvo como base la metodología usada por Petrovič y colaboradores (4) en su estudio. Se realizaron series de dilución hasta 10⁻⁵ en solución de NaCl al 1.2% y se procedió a sembrar en medio M40Y para posterior incubación durante 48 horas a 37°C, exceptuando las muestras provenientes de sector de La Victoria, las cuales se incubaron hasta 10 días. Tras la obtención de las colonias se les asignó código nombrándolas con la letra C o V según el sector que provenían, seguido del punto de muestreo, la letra S para indicar que provenían de muestras superficiales, la X referente a xerófilos y posteriormente el número de morfotipo (MF). A continuación, se realizó descripción macroscópica, tinción de Gram y descripción microscópica de las colonias.

Caracterización de aislamientos microbianos

Para la caracterización de los aislamientos obtenidos se efectuaron pruebas bioquímicas de utilización de sustratos siguiendo el manual de Bergey's de bacteriología determinativa (29), se realizaron pruebas de catalasa, motilidad, glucosa y manitol. Las actinobacterias se identificaron de acuerdo a Winn y colaboradores (30) y Carroll y colaboradores (31). Se efectuaron pruebas de hidrólisis de caseína, hipoxantina y tirosina, prueba de degradación de gelatina, tinción ácido-alcohol resistente, catalasa y motilidad.

Resultados

Aislamiento y descripción macroscópica

Se obtuvieron un total de 29 morfotipos, 9 en el sector del Cuzco y 20 en el sector de La Victoria. En todos los casos la cantidad de colonias presentes en las series de dilución no pudieron ser cuantificadas debido a la baja cantidad de morfotipos presentes en cada dilución (<30 unidades formadoras de colonias - UFC/ gramo de suelo).

En el sector del Cuzco, para el punto de muestreo 1 fue aislado un morfotipo con colonias de forma circular, elevación convexa, margen entero, superficie cerosa, coloración amarilla y consistencia cremosa. En relación con el punto de muestreo número 3 se aislaron 7 morfotipos, todos con colonias de forma irregular, elevadas, de margen ondulado, superficie cerosa, coloración transparente y consistencia mucoide. Finalmente, para el punto de muestreo número 5 se aisló un morfotipo con colonias de forma irregular, elevadas, de margen ondulado, superficie brillante, coloración transparente y consistencia mucoide.

En relación con el sector de La Victoria, en el punto 1 fueron aislados doce morfotipos, en donde todos presentaban colonias con forma circular, margen ondulado, superficie rugosa y consistencia dura. De estos, uno presentó colonias elevadas y los restantes presentaron colonias umbonadas. Con

relación a la coloración de las colonias, a excepción de 1 morfotipo que presentó coloración beige, todos los demás crecieron con colonias de color blanco. En cuanto al punto de muestreo 3, se aislaron 4 morfotipos en donde todos presentaron colonias con forma circular, elevadas, de margen ondulado, superficie rugosa y consistencia dura, la coloración fue diferencial, con 2 morfotipos que presentaron colonias de color beige y las otras dos de color blanco. Finalmente, para el punto de muestreo 5, se aislaron 4 morfotipos que presentaron colonias de forma circular, elevadas, de margen ondulado, superficie rugosa, color beige y consistencia dura.

Descripción microscópica

Se encontró predominancia de bacterias en forma bacilar en el sector del Cuzco, registrando para el morfotipo aislado del punto 1 cocos Gram positivos no formadores de endosporas, los 7 morfotipos aislados del punto 3 y el único morfotipo del punto 5 correspondió a bacilos Gram positivos no formadores de endospora, mientras que, en la zona de la Victoria, todos los aislamientos correspondieron a bacterias filamentosas ramificadas (actinobacterias).

Caracterización de aislamientos microbianos

Los resultados de las pruebas bioquímicas de utilización de sustratos mostraron como

resultado que, para el sector del Cuzco, Tatacoa (Colombia), los morfotipos aislados de los puntos 3 y 5 son compatibles con el género *Corynebacterium*, teniendo resultados positivos para la actividad de catalasa, glucosa y manitol, así como ausencia de motilidad. En el caso del morfotipo encontrado en el punto 1, mediante las pruebas efectuadas, se estableció que pertenecían al género *Micrococcus*, que se complementa con la pigmentación amarilla de la colonia, típica de especies de dicho género (29).

Para el caso del sector de La Victoria, Tatacoa (Colombia), los resultados de las pruebas bioquímicas de utilización de sustratos (tinción ácido alcohol resistente, catalasa, caseína, hipoxantina, tirosina, motilidad) realizadas a los veinte morfotipos, correspondientes a actinobacterias encontrados en los diferentes puntos de muestreo que son compatibles con lo descrito para el género *Streptomyces* (30). Cabe anotar que se evidenció olor a suelo húmedo, lo cual es típico de dicho género (31).

Discusión

La zona semiárida de la Tatacoa al igual que muchos ambientes xerófitos y desérticos encontrados en el país y en el mundo, esconden una diversidad microbiológica que puede sobrevivir a condiciones de sequedad, como se pudo evidenciar en el presente estudio mediante la obtención de aislamientos bacterianos.

Los géneros encontrados tienen la capacidad de tolerar el déficit hídrico. El género *Streptomyces* ha sido ampliamente reportado en zonas áridas, gracias a su capacidad de tolerar diferentes condiciones extremas, entre ellas la deshidratación (11–13,23,32–35), así mismo, ha sido reportada una amplia funcionalidad de dicho género en el campo farmacéutico como resultado de su uso para obtención de antibióticos, probióticos y vitaminas (36). De otra parte, se ha observado la capacidad que posee para formar osmolitos intracelulares, solubilizar fosfatos (37) y su potencial como promotor de crecimiento vegetal, bioherbicida y en la producción de fitohormonas (36,38).

Los géneros *Micrococcus* y *Corynebacterium* han sido reportados como causantes del deterioro de muchos alimentos secos, especialmente pescado y productos alimenticios deshidratados (38,39) y productos con altas concentraciones de azúcar (40). *Micrococcus sp* suele contaminar medios usados para el aislamiento de hongos xerófilos (41), al igual se ha evidenciado para este género su tolerancia a altas concentraciones de sal (42). Para el género *Corynebacterium* existen escasos reportes como xerófilos, dado que se han relacionado principalmente como alcalófilos (43). Especies de estos géneros mencionados anteriormente, han sido reportados también como tolerantes a altas concentraciones salinas y de azúcares (44), cabe resaltar que, por ejemplo, este tipo de adaptaciones son de importancia para misiones de detección de vida y protección planetaria en lugares como Marte (44).

Se observó la diferencia entre los morfotipos bacterianos encontrados en los sectores del Cuzco y La victoria, lo cual puede estar posiblemente ligado a la composición química del suelo de cada una de las formaciones, que podría privilegiar la supervivencia de un tipo de microorganismos sobre otros. Este fenómeno también puede estar influenciado por otros organismos vivos presentes en cada una de las formaciones, pues, la relación ecológica de cada uno de ellos con su entorno puede desempeñar un papel importante para este caso, debido a que como se mencionó anteriormente, tanto el género *Micrococcus* como *Corynebacterium sp.* están relacionados con la descomposición de materia orgánica, la cual se estaría presentando en mayor medida en el sector del Cuzco, donde se presenta mayor disponibilidad de materia orgánica en descomposición. De acuerdo con Rillig y colaboradores (45), existen muchas interacciones entre los microorganismos y el entorno en el que habitan, esta interacción con otros organismos es denominada coalescencia.

En las zonas áridas este tipo de procesos permiten que los microorganismos presentes en el suelo contribuyan en el desarrollo de otros organismos especialmente plantas, ya sea a través de actividades de promoción del crecimiento vegetal, tales como la fijación de nitrógeno y la solubilización de fosfatos, además de ofrecer a las plantas una mayor resistencia a las fluctuaciones del clima (7,21). Sin embargo, las adaptaciones de estos organismos a la sequedad no han sido profundamente estudiadas, por ejemplo,

Stevenson y Hallsworth (34), observaron que el género *Streptomyces* indujo división celular ante la reducción de agua presente en el medio. De otro lado, Tse y Ma (46) mencionan que una de las adaptaciones que han desarrollado diferentes microorganismos para hacer frente a la reducción de disponibilidad de recurso hídrico tiene que ver con la síntesis de glicerol; por su parte, se ha propuesto que estos microorganismos podrían generar exopolisacáridos, mejor conocidos como sustancias poliméricas extracelulares (EPS, por su siglas en inglés), han estado relacionadas como un mecanismo de adaptación que junto a la formación de biopelículas, contribuye a reducir la pérdida de agua ante el estrés hídrico. Esta adaptación sumada a la formación de osmolitos intracelulares, que como se mencionó anteriormente, se han reportado presentes dentro del género *Streptomyces*, permite un mecanismo eficaz para hacer frente a la pérdida de agua en ambientes áridos (10,21). Huang y colaboradores han profundizado más y han realizado estudios con microorganismos endolíticos recuperados de rocas del desierto de atacama, allí encontraron que poseen la capacidad de captar el agua presente en el interior de las rocas para garantizar su supervivencia en épocas de sequía (47).

Comprender estas adaptaciones permitirá desarrollar nuevas tecnologías como la reportada por Narváez y colaboradores (48), que consiste en la obtención de xeroprotectores, que podrían ser usados en la remediación de suelos degradados (49). La combinación de adaptaciones de microorganismos

actinomycetes, además de la tolerancia a la sequedad, los hace candidatos perfectos para el desarrollo de estas aplicaciones (50). Por lo anterior, se requieren investigaciones más detalladas que brinden respuestas relacionadas con la interpretación de estas adaptaciones y sus futuras aplicaciones.

Finalmente, es posible concluir que se encontraron microorganismos tolerantes al estrés hídrico en las muestras de suelo provenientes de la zona semiárida de la Tatacoa (Colombia). Además, debido a que fue un estudio de carácter exploratorio, se recomienda continuar con investigaciones más detalladas, cuyo fin será identificar el potencial de los microorganismos encontrados y determinar si estos llevan a cabo procesos que sean de interés biotecnológico, enfocado principalmente en la agricultura.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, la cual, a través de la Facultad de Ciencias y el Departamento de Biología, facilitaron el desarrollo del presente estudio en instalaciones del Laboratorio de Microbiología del Suelo y al talento humano conformado por docentes, auxiliares y estudiantes. Al programa de gestión de proyectos, el cual ofreció la financiación para la recolección de las muestras de campo

Referencias

- Gargaud M. Encyclopedia of astrobiology, Berlin: Springer Science & Business Media; 2011. <https://www.springer.com/gp/book/9783642112744>
- Scott W. Water Relations of Food Spoilage Microorganisms. *Advances in Food Research*. 1957;(7): 83-127. [https://doi.org/10.1016/S0065-2628\(08\)60247-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2628(08)60247-5)
- Pitt J, Hocking A. *Fungi and food Spoilage*. Verlag: Springer. 2009. <https://www.springer.com/gp/book/9780387922065>
- Petrovič U, Gunde-Cimerman N, Zalar P. Xerotolerant mycobiota from high altitude anapurna soil, nepal. *FEMS microbiology letters*. 2000; 128(2): 339-342. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2000.tb08918.x>
- Sharma A, Sharma R, Devi T. Life at extreme conditions: Extremophiles and their biocatalytic potential. En: 3rd International conference on recent advances in engineering science and management. Pune: 2017. <https://www.semanticscholar.org/paper/Life-at-extreme-conditions%3A-Extremophiles-and-their-Sharma-Sharma/4ebc1e2814fe20fe66396856bdd8d130704b5762>
- Srivastava A, Rai A, Kumar S, Kashyap P, Arora D. Extremophiles: Potential Sources of Biomolecules. En: Prakash S, Sharma R, Kunwar R. *Recent advances in microbiology*. Nueva York: NOVA; 2013. p.551-564. https://www.researchgate.net/publication/249314487_Extremophiles_Potential_Sources_of_Biomolecules
- Dion P. *Soil Biology and Agriculture in the Tropics*. Berlin: Springer; 2010. <https://www.springer.com/gp/book/9783642050756>
- Schulze-Makuch D, Houtkooper J. A perchlorate strategy for extreme xerophilic life on Mars. En: EPSC Abstracts. Rome; 2010. <https://meetings.copernicus.org/epsc2010/abstracts/EPSC2010-308.pdf>
- Stevenson A, Burkhardt J, Cockell C, Cray J, Dijksterhuis J, Fox-Powell M, et al. Multiplication of microbes below 0.690 eater activity: Implications for terrestrial and extraterrestrial life. *Environmental microbiology*. 2015; 17(2): 257-277. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12598>
- Lebre P, De Maayer P, Cowan D. Xerotolerant bacteria: surviving through a dry spell. *Nature Reviews Microbiology*. 2017; 15(5): 285-296. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.16>
- Okoro C, Brown R, Jones A, Andrews B, Asenjo J, Goodfellow M, et al. Diversity of culturable actinomycetes in hyper-arid soils of the Atacama Desert, Chile, Antonie Van Leeuwenhoek. 2009; 95(2): 121-133. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19052913/>
- Santhanam R, Okoro C, Rong C, Huang Y, Bull A, Weon H, et al. *Streptomyces atacamensis* sp. nov., isolated from and extreme hyper-arid soil of the Atacama Desert, Chile. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*. 2012; 62(11): 2680-2684. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.038463-0>
- Santhanam R, Rong X, Huang Y, Andrews B, Asenjo J, Goodfellow M. *Streptomyces bullii* sp. nov., isolated from a hyper-arid Atacama Desert soil. *Antonie Van Leeuwenhoek*. 2013; 103(2): 367-373. <https://doi.org/10.1007/s10482-012-9816-x>
- Azua-Bustos A, Urrejola C, Vicuña R. Life at the dry edge: microorganisms of the Atacama Desert. *FEBS Letters*. 2012; 586(18): 2939-2945. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.07.025>
- Piubeli F, De Lourdes M, Kishi L, Henrique-Silva F, García M, Mellado E. Phylogenetic profiling and diversity of bacterial communities in the death valley, an extreme habitat in the atacama desert. *Indian journal of microbiology*. 2015; 55(4): 392-399. <https://doi.org/10.1007/s12088-015-0539-3>

16. Drees K, Neilson J, Betancourt J, Quade J, Henderson D, Pryor B, et al. Bacterial community structure in the hyperarid core of the Atacama Desert, Chile, Applied and Environmental Microbiology. 2006; 72(12): 7902-7908. <https://aem.asm.org/content/72/12/7902>
17. Direito S, Ehrenfreund P, Marees A, Staats M, Foing B, Roling W. A wide variety of putative extremophiles and large beta-diversity at the mars desert research station (utah). International Journal of Astrobiology. 2011; 10(3): 191-207. <https://doi.org/10.1017/S1473550411000012>
18. Montero-Calasanz M, Goker M, Potter G, Rohde M, Sproer C, Schumann P, et al. Geodermatophilus arenarius sp. nov., a xerophilic actinomycete isolated from Saharan desert sand in Chad. Extremophiles. 2012; 16(6): 903-909. <https://doi.org/10.1007/s00792-012-0486-4>
19. Mohammadipanah F, Wink J. Actinobacteria from arid and desert habitats: diversity and biological activity. Frontiers in microbiology. 2016; 6: 1541. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01541>
20. Kurapova A, Zenova G, Sudnitsyn I. Thermo-tolerant and thermophilic actinomycetes from soils of Mongolia desert steppe zone, Microbiology. 2012;81: 98-108. <https://doi.org/10.1134/S0026261712010092>
21. Taketani R, Kavamura V, Dos Santos S. Diversity and Technological Aspects of Microorganisms from Semiarid Environments. Diversity and Benefits of Microorganisms from the Tropics. 2017: 3-19. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-55804-2_1
22. Cowan DA, Hopkins DW, Jones BE, Maggs-Kölling G, Majewska R, Ramond J-B. Microbiomics of Namib Desert habitats. Extremophiles [Internet]. 2020;24(1):17–29. <https://doi.org/10.1007/s00792-019-01122-7>
23. Belov A, Cheptsov V, Vorobyova EA, Manucharova NA. Culturable Bacterial Communities Isolated from Cryo-Arid Soils : Phylogenetic Culturable Bacterial Communities Isolated from Cryo-Arid Soils : Phylogenetic and Physiological Characteristics. 2020;54(8): 95-104. <http://dx.doi.org/10.1134/S0031030120080043>
24. Lombana A. Suelos Colombianos: Una mirada desde la academia. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano; 2004. <https://www.utadeo.edu.co/es/publicacion/libro/editorial/235/suelos-colombianos-una-mirada-desde-la-academia>
25. Florez M, Parra L, Jaramillo D, Jaramillo J. Paleosuelos del mioceno en el desierto de la tatacoa. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. 2013; 37(143): 229-244. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.6>
26. Méndez YN. Identificación de bacterias nativas del desierto de Candelaria y Tatacoa (Colombia), sometidas a simulación de la radiación UV de Marte. Bogotá: Departamento de Ciencias Biológicas Universidad de los Andes; 2013. <http://biblioteca.uniandes.edu.co/acepto22013220.php?id=3425.pdf>
27. Guerrero J. Stratigraphy and sedimentary environments of the Honda Group in the La Venta area. Miocene uplift of the Colombian Andes. En: Kay R, Madden R, Cifelli R, Flynn J. A history of Neotropical Fauna: Vertebrate Paleobiology of the Miocene of Tropical South America., Washington D.C: Smithsonian Institution Press; 1994. p. 592. https://www.researchgate.net/publication/313608799_Stratigraphy_Sedimentary_Environments_and_the_Miocene_Uplift_of_the_Colombian_Andes
28. Hermelin M. The Tatacoa Desert. En: Hermelin M. Landscapes and landforms of Colombia. New York: Springer; 2016. p. 127-138. <https://www.springer.com/de/book/9783319117997>
29. Goodfellow M, Peter K, Busse H, Trujillo M, Ludwig W, Suzuki K. Part A. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology: Volume 5: The Actinobacteria. New York: Springer; 2012. <https://www.springer.com/gp/book/9780387950433>

30. Winn W, Koneman E, Koneman W, Procop E, Schreckenberger G, Woods P, et al. *Koneman diagnóstico microbiológico: texto y atlas en color*. Bogotá D.C.: Editorial Médica Panamericana; 2008. https://books.google.com.co/books/about/Koneman_Diagnostico_Microbiologico_Micro.html?hl=es&id=jyVQueKro88C&redir_esc=y
31. Carroll K, Jorgensen J, Pfaller M. *Manual of Clinical Microbiology*, Washington D.C.: ASM Press; 2015. <https://www.asmscience.org/content/book/10.1128/9781555817381>
32. Bull A, Asenjo J. *Microbiology of hyper-arid environments: recent insights from the Atacama Desert, Chile*. *Antonie Van Leeuwenhoek*. 2013; 103(6): 1173-1179. <https://doi.org/10.1007/s10482-013-9911-7>
33. Santos SN, Gacesa R, Taketani RG, Long PF, Melo IS. Genome Sequence of *Streptomyces caatingaensis* CMAA 1322, a New Abiotic Stress-Tolerant Actinomycete Isolated from Dried Lake Bed Sediment in the Brazilian Caatinga Biome. *Genome announcements*. 2015; 3(5): 1015-1020. <https://mra.asm.org/content/3/5/e01020-15.short>
34. Stevenson A, Hallsworth J. Water and temperature relations of soil actinobacteria. *Environmental microbiology reports*. 2014; 6(6): 744-755. <https://doi.org/10.1128/genomea.01020-15>
35. Zvyagintsev D, Zenova G, Doroshenko E, Gryadunova A, Gracheva T, Sudnitsyn I. Actinomycete growth in conditions of low moisture. *Biology Bulletin*. 2007; 34(3): 242-247. <https://doi.org/10.1134/S1062359007030053>
36. Anandan R, Dharumadurai D, Manogaran GP. An introduction to actinobacteria. En: Dharumadurai D, Jiang Y. *Actinobacteria-Basics and Biotechnological Applications*. InTech; 2016. <https://www.intechopen.com/books/actinobacteria-basics-and-biotechnological-applications/an-introduction-to-actinobacteria>
37. Adhya TK, Kumar N, Reddy G, Podile AR, Bee H, Samantaray B. Microbial mobilization of soil phosphorus and sustainable P management in agricultural soils. *Curr Sci*. 2015;108:1280-1287. <https://www.jstor.org/stable/24905489>
38. Ávila I, Rodríguez M, Franco M, Pedroza A, Gutiérrez I. Use of agricultural wastes for biomass production of the plant growth promoter actinobacteria, *streptomyces* sp. mcr26. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 2014;2(5): 460-472. <https://www.intechopen.com/books/actinobacteria-basics-and-biotechnological-applications/an-introduction-to-actinobacteria>
39. Sivaraman G, Siva V. Microbiological spoilage of dried dishes. SSRN. 2015;2709070: 1-5. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2709070>
40. Dilbaghi N, Sharma S. Food spoilage, food infections and intoxications caused by microorganisms and methods for their detection. 2007. <https://www.semanticscholar.org/paper/Food-spoilage%2C-food-infections-and-intoxications-by-Dilbaghi-Sharma/bf1979600620a165f83e3e27433c6121531aeb9f>
41. Hocking A, Isolation and identification of xerophilic fungi in stored commodities. En: Champ B, Highley E, Hocking A, Pitt J. *Fungi and Mycotoxins in Stored Products*, Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research; 1991. p. 266. <https://ageconsearch.umn.edu/record/134649/files/PR036.pdf#page=62>
42. Nicolaus B, Manca M, Lama L, Esposito E, Gambacorta A. Lipid modulation by environmental stresses in two models of extremophiles isolated from Antarctica. *Polar Biology*. 2001; 24(1): 1-8. <https://doi.org/10.1007/s003000000156>
43. Satyanarayana T, Raghukumar C, Shivaji S. Extremophilic microbes: Diversity and perspectives. *Current Science*. 2005; 78-90. https://www.researchgate.net/publication/298223942_Extremophilic_microbes_Diversity_and_perspectives

44. Fredsgaard C, Moore D, Al Soudi D, Crisler D, Chen F, Clark B, et al. Relationships between sucrotolerance and salinotolerance in bacteria from hypersaline environments and their implications for the exploration of mars and the icy worlds. *International Journal of Astrobiology*.2016: 1-7. <https://doi.org/10.1017/S1473550416000240>
45. Rillig M, Lehmann A, Aguilar-Trigueros CA, Antonovics J, Caruso T, Hempel S, et al. J. Soil microbes and community coalescence. *Pedobiología*. 2016; 59(1): 37-40. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2016.01.001>
46. Tse C, Ma K. Growth and metabolism of extremophilic microorganisms. En: P. Rampelotto. *Biotechnology of Extremophiles*. Springer; 2016. p. 1-46. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-13521-2_1
47. Huang W, Ertekin E, Wang T, Cruz L, Dailley M, DiRuggiero J, et al. Mechanism of water extraction from gypsum rock by desert colonizing microorganisms. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2020;117(20):10681–10687. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001613117>
48. Narvaez-Reinaldo J, Barba I, Gonzalez-Lopez J, Tunnacliffe MM. Rapid method for isolation of desiccation-tolerant strains and xeroprotectants. *Applied and environmental microbiology*. 2010; 76(15): 5254-5262. <https://aem.asm.org/content/76/15/5254>
49. Vilchez S, Manzanera M. Biotechnological uses of desiccation-tolerant microorganisms for the rhizoremediation of soils subjected to seasonal drought. *Applied microbiology and biotechnology*. 2011; 91(5): 1297-1304. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3461-6>
50. Chen G, XR J. Next generation industrial biotechnology based on extremophilic bacteria. *Current opinion in biotechnology*. 2018; 50(94): 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.11.016>