

# ¿Qué tan antiguo es el oxígeno que respiramos? Estromatolitos fósiles y vivos

MIGUEL ÁNGEL CEVALLOS

El Dr. Miguel Ángel Cevallos (mejor conocido como MAC) estudió Biología Experimental en la UAM-I y posteriormente el Doctorado en Investigación Biomédica Básica en la UNAM. Actualmente es investigador Titular en el Centro de Ciencias Genómicas de la UNAM.

*Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.*

En unas semanas me reuniré con mis amigos, en un hotel en Puebla, cerca de la frontera con Veracruz para festejar 50 años de haberlo conocido (sip, 50 años). El hotel-hacienda queda cerca del sitio arqueológico Cantona, que se merecería una amplia descripción, y de la laguna de Alchichica (Fig. 1), que en esta ocasión es lo que me compete platicarles. Esta laguna es especialmente interesante por varias razones: es un lago salado, profundo, que se aloja en un cráter volcánico y que alberga diversas especies que sólo viven ahí, entre ellas un hermoso ajolote. Las malas lenguas (obviamente no la mía) dicen que su profundidad es incommensurable. Dicen también que ahí se alojan un sinfín de monstruos mitológicos y que, de tanto en tanto, vienen a visitarla seres extraterrestres en sus ovnis (aunque yo no lo creo). Sin embargo, posee otra característica, más terrenal, que la hace especialmente importante para mí y mis colegas microbiólogos, y es la presencia de los llamados *estromatolitos* que, aunque no me lo crean, la vida misma, como la conocemos el día de hoy derivó de algún modo de ellos. Es decir, para darte un adelanto: el oxígeno que hay en nuestra atmósfera apareció en gran medida gracias a ellos. Sin embargo, he de confesar que ellos fueron también los responsables de la primera extinción masiva que ocurrió en nuestro planeta.



FIGURA 1. VISTA aérea de Alchichica (Google Earth)

## ¿Un fósil o un organismo vivo?

Inicialmente a los estromatolitos se les definió como simples rocas sedimenta-

rias. De hecho, el primer geólogo que dio cuenta de ellos fue John Steel, que en 1825 los describió como «estructuras sedimentarias laminadas y calcáreas» provenientes del período Cámbrico Superior del sitio *Saratoga Spring*, en el estado de Nueva York. Con el tiempo, este tipo de estructuras se empezaron a identificar en muchas otras regiones del mundo, y por años se pensó que su formación habría sido totalmente un proceso inorgánico; sin embargo, en las últimas décadas del siglo XIX se argumentó que ese tipo de rocas pudieran tener un origen biológico, o biogénico. En ese tiempo el geólogo James Hall propuso llamar a estas rocas *Cryptozoon proliferum*, para subrayar su origen biológico, aunque el nombre sugiere más bien una base animal. Ya en 1906, el geólogo alemán Ernst Louis Kalkowsky, bautizó a estas rocas con el nombre con que las conocemos hoy: estromatolitos (Fig. 2). Esta palabra literalmente significa “roca laminada” (del griego: *stroma*, capa y *lithos*, piedra). Kalkowsky tenía la idea de que el origen de los estromatolitos habría ocurrido como un producto de la precipitación/sedimentación de carbonatos por organismos vegetales simples, aseveración que de algún modo se acerca a lo que sabemos de ellos, hoy en día.



FIGURA 2. ESTROMATOLITOS fósiles (https://es.wikipedia.org/wiki/Estromatolito#/media/Archivo:StromatoliteUL03.JPG)

## ¿Algunos estromatolitos están vivos?

Por décadas se consideró a los estromatolitos como restos fósiles de los primeros arrecifes que se formaron en nuestro planeta. Se tienen datos claros de que abundaban desde hace unos 2,500 millones de años, en las costas de los mares primitivos; los registros más antiguos de este tipo de fósiles tienen unos 3,700 millones de años y se encuentran en un lugar en Groenlandia. Para poner las cosas en perspectiva, cuando surgieron los primeros estromatolitos —o para decirlo más formalmente— cuando surgieron los primeros organismos formadores de estromatolitos, no había en la Tierra ningún organismo con patas, ni en el mar, y menos sobre los continentes; es más, todavía no existían los organismos unicelulares que tuvieran núcleo (eucariontes). Los estromatolitos dominaron un 80% del registro fósil que muestra la historia biológica de nuestro planeta, y por millones de años fueron uno de los miembros más dominantes de los ecosistemas primitivos.

Pues bien, nuestro conocimiento sobre los estromatolitos cambió radicalmente

cuando en 1961, Brian Logan, describió por primera vez que existían poblaciones vivas de estromatolitos en *Shark Bay* en la costa occidental australiana (Fig. 3). El descubrimiento no fue poca cosa, ya que encontraron un área muy importante en la que prosperaban los estromatolitos, en todas sus fases de desarrollo, algunos de ellos en sus primeras etapas, mientras otros eran claramente estromatolitos maduros con su típica forma de columna o de domo. Recordemos que estas estructuras se componen principalmente de carbonato de calcio [CaCO<sub>3</sub>] depositado en capas pegándose a las sustancias mucosas que excretan algunas bacterias que los forman, como por ejemplo, las cianobacterias, y es donde habitan los organismos formadores de los estromatolitos. Con este descubrimiento se pudo identificar con precisión qué tipo de organismos los forman actualmente, como funcionan y crecen, y, por ende, estudiar en detalle sus relaciones con los ambientes que ocupan; es decir su ecología.



FIGURA 3. ESTROMATOLITOS vivos en Shark Bay, Australia (https://es.pinterest.com/pin/548172585865218579/)

Hoy en día, a los estromatolitos vivos se les considera “fósiles vivientes” que han podido ser descubiertos en algunos lugares especiales y muy localizados del planeta. Por ejemplo, se les ha ubicado en algunos sitios del Mar Rojo y de las Bahamas, en Lagoa Salgada, Brasil y en los salares de la zona norte de Chile. Aunque resulte sorprendente, en México también contamos con algunos parajes donde hay estromatolitos, como en las lagunas de Bacalar (Fig. 4) y de Chichankanab, ambas en Quintana Roo; en Pozas Azules, Cuatro Ciénegas, Coahuila y, como ya mencioné, en la laguna de Alchichica, en Puebla. Desafortunadamente el turismo, la agricultura, la ganadería y el desinterés de las autoridades gubernamentales por proteger estos sitios están provocando que los estromatolitos mexicanos estén desapareciendo y con ellos, un santuario de la biodiversidad y una ventana a un pasado remoto.

## ¿Quiénes son los organismos constructores de estromatolitos?

A los estromatolitos vivos los podemos definir como *tapetes microbianos adher-*



FIGURA 4. ESTROMATOLITOS en Bacalar

<https://www.facebook.com/ClanDestinoBurgersMx/photos/a.216834025531919/912232545992060/?type=3>

idos a una superficie hecha principalmente de carbonato de calcio. En estos tapetes abundan las cianobacterias (bacterias fotosintéticas productoras de oxígeno, llamadas también *algas verdi-azules*, parientes del alga espirulina), aunque ahí también se pueden encontrar actualmente algas verdes filamentosas, algas diatomeas y diversos tipos de bacterias (Fig. 5). En esta superficie se pueden encontrar millones de microorganismos en estrecho contacto y embebidos en una ‘matriz’ gelatinosa hecha de diversos compuestos incluyendo polisacáridos, proteínas, lípidos, lipoproteínas e inclusive ácidos nucleicos; una verdadera sopa biológica. Esta matriz les permite a estas comunidades de microorganismos adherirse a su sustrato y protegerse de las condiciones adversas del medio ambiente. Aún más, juega un papel esencial en la formación de la parte rocosa de los estromatolitos, dicho de una manera más pomposa, en su *litificación*.

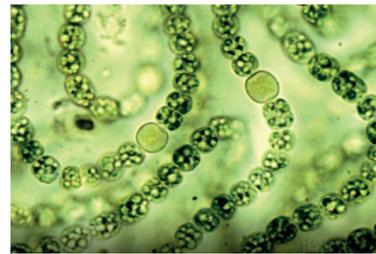


FIGURA 5. CIANOBACTERIAS (https://www.equeroibologia.com.br/2016/03/cianobacterias-caracteristicas-e-importancia-ecologica.html)

Vamos a lo básico: el proceso de la fotosíntesis permite a las plantas tomar bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera y convertirlo en azúcares (carbohidratos), con ayuda de la energía solar. En el caso de las cianobacterias, el proceso es ligeramente diferente; en vez de tomar bióxido de carbono de la atmósfera lo que utilizan es *bicarbonato*, la forma química común cuando el bióxido de carbono se disuelve en el agua (Fig. 6).

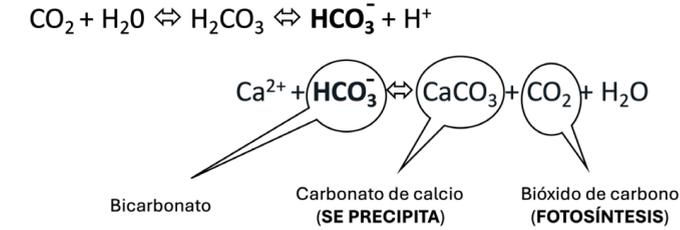


FIGURA 6. REACCIONES importantes en estromatolitos. Elaboración propia

Una parte de este bicarbonato lo precipitan los estromatolitos en forma de carbonato de calcio, el cual queda atrapado en la matriz del tapete microbiano (Fig. 6). Las arenillas y otros sedimentos también suelen ser atrapados en esta matriz y por ello también forman parte del proceso de litificación. Con el tiempo, las cianobacterias mueren atrapadas en la matriz ya litificada y las células que sobreviven son aquellas que logran migrar a la región más superficial e iluminada del estromatolito en formación. Este proceso se repite una y otra vez millones de veces y con el paso del tiempo se forman las ‘capitas’ que dan origen a las columnas o a los domos laminados propios de los estromatolitos. Otras bacterias, que transforman el azufre, crecen entre los filamentos de cianobacterias y ayudan también a que se precipiten los minerales carbonatados. Los estromatolitos de Alchichica han dejado estructuras calcáreas irregulares en partes de la orilla de la laguna, pero otros ejemplares vivos se alcanzan a vislumbrar en partes superficiales del fondo. Se sabe que los estromatolitos de Alchichica se desarrollan hasta los 30m de profundidad.

Ahora bien, vale la pena preguntarse el por qué los primeros estromatolitos prosperaban en las costas de los mares primitivos y ahora sólo se les puede encontrar en algunos pocos parajes. Al parecer la respuesta podría ser simple: en el pasado remoto no había quien ‘se comiera’ a estos organismos; actualmente hay un sinfín de moluscos, lombrices, protistas, peces y un amplio etcétera, que pueden utilizar a los estromatolitos como aperitivo. Justamente, los pocos estromatolitos que subsisten los encontramos en lugares, o muy salados, como en Shark Bay, Lagoa Salgada, o en los salares norteros de Chile o cuyas aguas son más bien ácidas o básicas, como es el caso de los lagos -cráter de la cuenca Oriental, como Alchichica, o cuerpos de agua con muy pocos nutrientes disponibles, como las pozas de Cuatro Ciénegas y en laguna de Bacalar, donde la presencia de estos potenciales depredadores es muy reducida. Digamos entonces que la época de oro de los estromatolitos ocurrió hace unos 1,250 millones de años y desde entonces su abundancia empezó a declinar debido quizá, a la presencia de protozoarios que empezaron a alimentarse de ellos.

## ¿Cuándo surgió la atmósfera con oxígeno?

El oxígeno en la Tierra es esencial; no podemos concebir la vida actual sin este elemento. Conservamos parques y jardines como ‘pulmones’ en las ciudades y buscamos reforestar para que el oxígeno no nos falte. También monitoreamos qué tan oxigenada está la sangre de una persona para sopesar su estado de salud. El aire fresco es un símbolo de vida y bienestar y nos preocupa que estemos contaminándolo con humos y vapores tóxicos.

Ya sabemos que la atmósfera que hoy respira-

mos cuenta con un 21% de oxígeno, sin embargo, las atmósferas antiguas de nuestro planeta, hace miles de millones de años, carecían de él. Ahora sabemos que la responsabilidad de que este gas molecular (O<sub>2</sub>) se empezara a acumular en la atmósfera, recae en las cianobacterias; es decir, *el oxígeno atmosférico tiene un origen biológico*. Este proceso ha tenido consecuencias asombrosas, no sólo en el resto de los seres vivos, sino también en la composición de la corteza terrestre e incluso en nuestro actual clima.

A partir del surgimiento de organismos biológicos posiblemente hace 4 mil 200 millones de años, el surgimiento de la fotosíntesis fue un evento crucial para que se pudieran construir y mantener nuevos ecosistemas. Como las primeras bacterias se alimentaban de la materia orgánica que se generó abióticamente (por síntesis química), es evidente que el recurso productivo habría sido limitado. Entonces, la aparición de bacterias capaces de utilizar energía solar y de bióxido de carbono para producir su propia materia orgánica, hace al menos 3,500 millones de años cambió las cosas para siempre. Tanto así que en la ‘base’ de la cadena alimenticia de (casi) todos los ecosistemas que hoy existen o lo hicieron en el pasado tienen en su base un organismo fotosintético como ‘productor primario’.

Es importante recalcar que las primeras bacterias fotosintéticas utilizaban hidrógeno (H<sub>2</sub>) o sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) para hacer funcionar su maquinaria fotosintética y no producían oxígeno como subproducto, sino azufre (S). Con el advenimiento de las cianobacterias, hace unos 3,500 millones de años, las cosas volvieron a cambiar dramáticamente. Estos organismos al usar la molécula de agua como medio para extraer ese hidrógeno necesario para sintetizar moléculas orgánicas, generaban como ‘producto de desecho’ oxígeno molecular. Este tipo de metabolismo energético, al ser mucho más eficiente prosperó rápidamente. Pero la acumulación de oxígeno en la atmósfera, como ya mencioné, tuvo consecuencias adversas e impredecibles.

El oxígeno en sus diversas formas químicas es una substancia extremadamente reactiva que modifica lo que halla a su paso. Esta molécula (O<sub>2</sub>) es capaz de oxidar a un montón de substancias fundamentales para las células como lo son las proteínas, los lípidos y los ácidos nucleicos. Hay organismos que no poseen mecanismos para evadir o mitigar eficientemente los daños que produce el oxígeno. Si un organismo no posee mecanismos para evadir o corregir los daños que produce el oxígeno, irremediablemente muere.

## ¿Fueron los estromatolitos responsables de la primera extinción masiva en la Tierra?

Al inicio, el oxígeno que empezaron a liberar las cianobacterias reaccionó con el metano y el

hidrógeno presentes en la atmósfera primitiva, y con algunas de las sales disueltas en los primeros mares, impidiendo, al menos por algún tiempo, que el oxígeno afectara a otros organismos. Sin embargo, con el transcurrir de los tiempos, estas barreras no fueron suficientes y el oxígeno se empezó a acumular en la atmósfera y con ello el inicio de la catástrofe: las primeras bacterias, todas anaerobias en aquel momento, empezaron a ser diezmadas sin remedio alguno. El efecto del oxígeno sobre los organismos masiva en el planeta, ya que aniquiló a grandes grupos de bacterias incapaces de contender con este gas. Algunas sobrevivieron porque se refugiaron en ambientes sin oxígeno, como pudieran ser el fondo de lagos o la profundidad de los mares. Otras, quizá, habían adquirido un metabolismo que, por azar podía detoxificar el oxígeno en las células o bien, vivían dentro de biopelículas cuya matriz era lo suficientemente gruesa o de una composición tal que mitigaba los efectos deletéreos de esta molécula. Las menos, se asociaron simbióticamente: una bacteria grande englobó sin digerir a otra bacteria más pequeña, pero capaz de contender con el oxígeno. La primera, le daba protección a la segunda y ésta, se encargaba de detoxificar el oxígeno. Se cree que una asociación simbiótica de este tipo fue la que originó, a la larga, a las primeras células eucariotas.

## Cambios inesperados en la corteza y en la atmósfera terrestre

Aunque cueste trabajo concebirlo, nuestro planeta ha tenido distintas atmósferas a lo largo de su existencia. La primera de ellas, cuando de la Tierra era aún una masa incandescente poco consolidada, los gases que la componían eran principalmente el hidrógeno (H<sub>2</sub>) y el helio (He). La segunda atmósfera fue el producto de la desgasificación de la corteza terrestre Arqueana cuya composición se parecía al material que actualmente arrojan los volcanes; es decir, era rico en compuestos con nitrógeno como el amoníaco y los nitratos; bióxido de carbono, metano, bióxido de azufre y, vapor de agua (que, de paso, llegó masivamente proveniente de cometas que se impactaron).

Además, conforme la Tierra se iba enfriando el vapor de agua se condensaba dando origen a los primeros mares y océanos. Gran parte del bióxido de carbono gaseoso se disolvió en el agua y reaccionó con elementos como el calcio y el magnesio para formar carbonatos que se depositaron como sedimentos en el fondo de estos océanos primigenios. Los geólogos han podido determinar que estos sedimentos tienen al menos unos 3,800 millones de años y por ende, podemos afirmar que los primeros océanos ya existían en esa época.

La tercera atmósfera terrestre la moldeó el oxígeno, producto de la fotosíntesis y el cual tuvo un impacto formidable en la corteza terrestre. En un inicio, el oxígeno que producían las cianobacterias, se combinó rápidamente con ciertas sales disueltas en los primeros océanos. Quizá la más importante de ellas fue el *óxido ferroso* que tiene la peculiaridad de que cuando reacciona con el oxígeno molecular, produce *óxido férrico* que es insoluble en agua y se precipita. La cantidades de óxido férrico que se precipitaron fueron tan grandes que dieron origen a los enormes depósitos que hoy conocemos como *hierro bandeado* (Fig. 7). Una vez que el oxígeno libre ya no pudo ser capturado por estos compuestos se empezó, ahora sí, a acumular en la atmósfera. Los geólogos fechan este inicio precisamente cuando el *hierro bandeado* dejó de formarse. El oxígeno atmosférico también dio origen a la capa de ozono (O<sub>3</sub>) que ahora nos protege de los rayos ultravioleta (en la alta atmósfera) y que de algún modo facilitó también que la vida prosperara.



FIGURA 7. HIERRO bandeado (https://geologylearn.blogspot.com/2017/01/banded-iron-formations-bifs-evidence-of.html)

Cuando visites Alchichica (Fig. 8) o estés en laguna de Bacalar ten en mente que los estromatolitos son una gran escarpate para estudios de *paleobiología*. El poder encontrar ‘vestigios’ vivos y funcionales de organismos ancestrales, nos ha permitido trazar hipótesis viables sobre el origen y evolución de la vida en la Tierra y la estabilidad de los ecosistemas. Sabido esto, haz por favor un esfuerzo por preservarlos.

Agradezco la edición que hizo el Dr. Jaime Padilla de este artículo.



FIGURA 8. ESTROMATOLITOS en Alchichica. Foto del autor.

**Para saber más:**  
SEMARNAT. Los estromatolitos, primeros formadores de zonas arrecifales. 15 de julio de 2021. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/los-estromatolitos-primeros-formadores-de-zonas-arrecifales?idiom=es#:~:text=Su%20formaci%C3%B3n%20inicial%20y%20su%20facilitan%20la%20precipitaci%C3%B3n%20de%20carbonatos>.

Beraldi, H. Estromatolitos. Instituto de Geología, UNAM. Consultado en agosto, 2024. <https://www.geologia.unam.mx/contenido/estromatolitos>

Rosen, J. y Egger A. E. La Historia de la Atmósfera de la Tierra I: El origen de la atmósfera de la tierra. Consultado en agosto, 2024. <https://www.visionlearning.com/es/library/ciencias-de-la-tierra/6/la-historia-de-la-atm%C3%B3sfera-de-la-tierra-i/202>

*Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción dwe la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.*