

Las costras biológicas del suelo y su función medioambiental. Experiencia en Cienfuegos. Cuba

Biological soil crusts and their environmental function. Experience in Cienfuegos. Cuba

Orlando Gualberto Rodríguez del Rey Piña¹

E-mail: ogrodriguez@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6895-4458>

Aida Margarita Romero Jiménez¹

E-mail: mromero@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2550-6983>

Caridad Josefa Rivero Casanova¹

E-mail: cjrivero@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7864-4354>

¹ Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”.Cuba.

*Autor para la correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Rodríguez del Rey Piña, O. G., Romero Jiménez, A. M.y Rivero Casanova, C. J. (2024). Las costras biológicas del suelo y su función medioambiental. Experiencia en Cienfuegos. *Revista Científica Agroecosistemas*, 12(2), 127-137. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>

Resumen

El descubrimiento de la agricultura dio inicio a la vida civilizada, y enfrentó al hombre con otras manifestaciones importantes del mundo microbiano. En este sentido, las costras biológicas del suelo (CBS), están cobrando una mirada alternativa. El presente trabajo tiene como objetivo revisar la información actualizada sobre las características morfológicas e impacto ambiental de las CBS. Se trata de un estudio teórico-lógico. Las CBS son asociaciones simbióticas, entre cianobacterias, líquenes y musgos. Las cianobacterias ocupan un lugar especial, ya que se relacionan con la producción de oxígeno, además de estar vinculadas con el desarrollo filogenético de las demás especies. El metabolismo fotoautotrófico de las cianobacterias y la presencia en algunas especies de la enzima nitrogenasa, permite reducir el nitrógeno atmosférico e incorporarlo en forma de amonio al suelo. Y dentro de las funciones ambientales de las CBS se encuentra por ejemplo que, en su hábitat natural, proporciona una mejora gradual de las propiedades físico-químicas de los suelos degradados por el impacto ambiental o por el factor antrópico. Por lo que actualmente se realizan estudios para utilizar las CBS como inóculos, o también mezclados con abonos orgánicos. Este trabajo resulta una novedad científica, llena el vacío del conocimiento, toda vez que instruye y permite el diseño de nuevas estrategias para utilizar las CBS en la restauración de los suelos, revertiendo la pérdida de la productividad y condicionando una mejora en la biodiversidad ecológica.

Palabras clave:

Costras Biológicas, Morfológicas, Simbióticas, Fotoautótrofos, Biodiversidad ecológica.

Abstract

The discovery of agriculture gave rise to civilized life and brought man face-to-face with other important manifestations of the microbial world. In this sense, biological soil crusts (CBS) are gaining an alternative perspective. This work aims to review the updated information on the morphophysiological characteristics and environmental impact of CBS. This is a theoretical-logical study. CBS are symbiotic associations between cyanobacteria, lichens, and mosses. Cyanobacteria occupy a special place, since they are related to the production of oxygen, in addition to being linked to the phylogenetic development of other species. The photoautotrophic metabolism of cyanobacteria and the presence of the enzyme nitrogenase in some species allow atmospheric nitrogen to be reduced and incorporated into the soil in the form of ammonium. Within the environmental functions of the CBS it is found, for example, that in its natural habitat, it provides a gradual improvement of the physical-chemical properties of soils degraded by environmental impact or by the anthropic factor. Therefore, studies are currently being carried out to use CBS as inoculums, or also mixed with organic fertilizers. This work is a scientific novelty, it fills the knowledge gap since it instructs and allows the design of new strategies to use CBS in soil restoration, reversing the loss of productivity and conditioning an improvement in ecological biodiversity.

Keywords:

Biological scabs, Morphological, Symbiotic, Photoautotrophs, Ecological biodiversity.

Introducción

La agricultura dio inicio a la vida civilizada hace unos 10, 000 años, y enfrentó al hombre con otras manifestaciones importantes del mundo microbiano. Muy pronto el ser humano, entendió que el estiércol y los residuos orgánicos enriquecían el suelo; después encontró que la siembra de ciertas especies como el frijol y la soya tenían efecto parecido. Según . Según Mazoyer y Laurence (2002) el abonamiento con estiércol y orina y la siembra de leguminosas como abono verde, practicados por los agricultores romanos hace más de dos mil años, así como la práctica de cultivos asociados de frijol y maíz, que data posiblemente de las épocas precolombinas, constituyen expresiones antiguas del dominio relativo, pero ciego, sobre las fuerzas microbianas, entonces desconocidas.

Sin embargo, en el suelo, también existen otros grupos de organismos, cuya riqueza específica ha sido poco estudiada, por lo que no se cuenta con suficiente información sobre su importancia en el funcionamiento de estos ecosistemas. Algunos de ellos las bacterias heterótrofas y autótrofas (cianobacterias), algas, hongos, líquenes y briófitas. Comúnmente estos microorganismos viven asociados conformando comunidades que pueden desarrollarse en las capas superficiales del suelo o bien sobre éste. A estas comunidades se las conoce como costra biológica del suelo (CBS). Son organismos muy resistentes a las altas y bajas temperaturas, a largos períodos de desecación y excesiva radiación, respondiendo rápidamente a los cambios momentáneos de las condiciones microambientales (Lange *et. al.*, 2001).

La importancia de estos organismos radica en el hecho de que se vuelven metabólicamente activos cuando se humedecen, comenzando sus funciones metabólicas casi instantáneamente. La respiración puede comenzar en un tiempo menor a los 3 minutos luego de ser humedecidos, mientras que la fotosíntesis alcanza su actividad completa luego de 30 minutos o más. Esta rápida respuesta microbiana a la humedad incidente del suelo, a menudo resulta en casi una instantánea mineralización de nutrientes como carbono y nitrógeno. Existen evidencias claras sobre el aporte de estas comunidades a la fertilidad y estabilidad del suelo. Primero, especies de bacterias autótrofas y heterótrofas al poseer la enzima nitrógenasa, participan en el ciclo del Nitrógeno (N), realizando fijación del nitrógeno atmosférico.

En las condiciones actuales donde la demanda de alimentos crece cada día, al tiempo, aumenta la población mundial, pudieran ser las costras biológicas del suelo una solución técnicamente posible, para obtener cultivos en zonas desbastadas por el cambio climático y por

la acción antrópica, por lo que el objetivo de este estudio, es profundizar en las características de los microorganismos que componen las CBS, y argumentar su contribución práctica, en función de la biodiversidad y fertilidad de los suelos.

Materiales y métodos

El escenario donde se llevó este trabajo fue en el Departamento de Medicina Veterinaria de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Cienfuegos, Cuba. Se trata de un estudio de revisión, descriptivo sobre las Costras Biológicas del Suelo (CBS). Y para una mayor universalidad y objetividad, se analizaron diferentes materiales bibliográficos. Fueron consultadas fuentes primarias (libros), secundarias (revistas), además de artículos originales indexados, fundamentalmente en las plataformas bibliográficas Scopus, y SciELO, procedentes de revistas universales especializadas en el tema.

Para la ejecución de este trabajo, se escogió el método teórico histórico-lógico, y empírico del conocimiento, realizando consultas y análisis de los documentos relacionados. Los resultados fueron organizados en forma de epígrafes, dándole respuesta a los objetivos del trabajo. En anexos aparecen también figuras, que sirven como complemento referencial en la descripción morfológica de las costras biológicas del suelo.

Desarrollo

Composición de las costras biológicas del suelo y dominancia ecológica

De acuerdo a Maroto *et al.* (2023. b) las costras biológicas, generalmente pueden encontrarse junto a otros organismos del suelo, formando un conglomerado, entre los que se encuentran, hongos, microalgas, líquenes costrosos, organismos pluricelulares, microartrópodos, cianobacterias y musgos. Sin embargo, al menos cuatro tipos de CBS han sido diferenciados por su textura, coloración y grupo taxonómico dominante, entre las que se encuentran: CBS lisa y clara con dominancia de cianobacterias, CBS lisa y oscura con dominancia de cianobacterias, CBS foliácea verde claro con dominancia de líquenes, CBS rugosa con dominancia de musgos y materia orgánica muerta.

La dominancia de las costras biológicas, está determinada por el organismo que cohabita en mayor proporción y que se distingue por su apariencia y tipología en la estructura morfológica de la costra biológica. Existen 5 tipos básicos, la dominancia por líquenes (Figura.1), que son asociaciones simbióticas entre un alga y un hongo, cianolíquenes, que resulta de la asociación entre una cianobacteria y un hongo. También se existe la dominancia por musgos (Figura. 2), por algas verdes, y por último la dominancia por cianobacterias (Figura. 3), que es la más común e importante desde el punto de vista ecológico y

medioambiental, por la utilidad que reviste para la fertilidad de los suelos degradados.

Fig. .1. Costras biológicas del suelo dominadas por líquenes.



Fuente: <http://www.google.com.cu>

Fig.2. Costras biológicas del suelo dominadas por musgos.



Fuente: Elaboración propia. Laboratorio Docente. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Cienfuegos.

Fig. .3. Costras biológicas del suelo dominadas por cianobacterias.



Fuente: Elaboración propia. Laboratorio Docente. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Cienfuegos.

La clasificación de las costras biológicas del suelo, suele hacerse, según el grupo de organismos dominantes, aunque la presencia de uno u otro tipo de CBS no excluye necesariamente a otro, es decir, aunque la clasificación se realice en base al grupo dominante, en la mayoría de los casos se trata de una combinación de los mismos, tanto de líquenes como musgos y cianobacterias que viven asociados, siendo más frecuentes algunas combinaciones por sobre otras. Las tipologías más frecuentes de CBS son de musgos, líquenes, cianobacterias, y de algas

verdes. Esta última, aunque puede no ser fácilmente observable, tiene una gran importancia ecológica, ya que protege los suelos de zonas dunares de la acción erosiva, contribuyendo a su fijación.

Componentes de las CBS. Las cianobacterias y la historia de la Tierra

Las cianobacterias fueron los principales productores primarios de la biosfera durante al menos 1.500 millones de años, y lo siguen siendo en los océanos, aunque desde hace 300 millones de años han cobrado importancia distintos grupos de algas eucarióticas (las diatomeas, los dinoflagelados y los haptófitos o cocolitofóridos). Lo más importante, es que a través de la fotosíntesis oxigénica, inundaron la atmósfera de O_2 hace 2.500 millones de años, y siguen siendo las cianobacterias los principales suministradores de nitrógeno para las cadenas tróficas de los mares.

La capacidad de usar el agua como donador de electrones en la fotosíntesis evolucionó una sola vez en el antepasado común de todas las cianobacterias. Los datos geológicos indican que este fundamental evento tuvo lugar en un momento temprano de la historia de la Tierra, hace al menos 2.450-2.320 millones de años y probablemente mucho antes. Hay evidencias de que la vida existía hace 3.500 millones de años, pero la cuestión de cuándo evolucionó la fotosíntesis oxigénica sigue siendo motivo de debate e investigación. Se tienen claras evidencias que hace unos 2.000 millones de años, existía ya una biota diversa de cianobacterias, que fueron los principales productores primarios durante el periodo Proterozoico (2.500-543 millones de años atrás), en parte porque la estructura química redox de los océanos favoreció a los fotoautótrofos y la fijación del nitrógeno. Al final del Proterozoico, se les unieron las algas verdes, pero no fue hasta el Mesozoico (251-65 millones de años) que la radiación de los dinoflagelados, cocolitoforales y diatomeas, restaron parte del protagonismo a las cianobacterias. En la actualidad, las cianobacterias son aún claves en los ecosistemas marinos como productores primarios y como agentes fijadores de nitrógeno.

Origen evolutivo de las cianobacterias y relaciones filogenéticas con otros organismos

En la tierra primitiva, no existía la capa de ozono y la radiación ultravioleta llegaba directamente a la superficie terrestre, después, gradualmente en el tiempo, surgieron formas particulares de vida, capaces de soportar las altas temperaturas y la falta de oxígeno, apareciendo entonces las cianobacterias, que se encontraban en rocas, al borde de los mares, hace unos 3 500 millones de años.

Estas bacterias, desempeñaron funciones importantes en los procesos geoquímicos y de la cadena alimenticia.

El análisis filogenético indica que el acervo enzimático, adenilil ciclasa (AC) y guanilil ciclasa (GC) en las cianobacterias, es el resultado de duplicaciones y deleciones genéticas, de fusiones y fisiones de genes y de mutaciones puntuales en el centro activo que han convertido algunas AC en GC. Como consecuencia, es frecuente observar diferentes isoformas de AC así como el centro catalítico de estos enzimas formando parte del extremo carboxilo terminal en arquitecturas moleculares muy diferentes, entre las que se observan polipéptidos multienzimáticos. Por lo que los resultados presentados sugieren que las cianobacterias son los microorganismos más simples, y que sirven como modelo experimental para estudiar la complejidad del sistema que constituyen las rutas de señalización dependientes de nucleótidos cíclicos en los seres vivos.

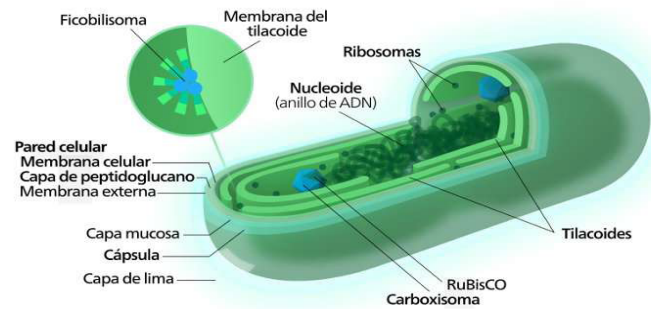
De acuerdo a Domínguez *et al.* (2018), las cianobacterias nacientes (procariotas) se agruparon en colonias (estromatolitos), poblaron los mares, liberaron oxígeno que enriquecía la atmósfera. Surge, entonces, la membrana celular que permitió la protección ambiental ante los fenómenos físico-químico imperantes. Ocurre, entonces, la transformación de las células procariotas en eucariotas hace aproximadamente unos 2 200 millones de años, mediante procesos simbiogénicos.

El más conocido y plenamente demostrado es la simbiogénesis por endosimbiosis seriada, que ocurrió en el período proterozoico, mediante el cual las células eucariotas adquirieron distintos simbioses procariotas y se formaron las mitocondrias en los animales y los cloroplastos en las plantas. Estas adquisiciones de genomas completos característicos de los procesos simbiogénicos fueron los responsables de la aparición de la propia célula eucariota (Eucariogénesis). Ese proceso evolutivo, fue descrito por Lynn Margulis en 1967, y considerado en su libro Planeta Simbiótico en el 2002. En esta etapa se estima, hayan surgido también las algas, hace unos 1 800 millones de años y los hongos, 1 200 millones de años.

Ultraestructura y funciones en las cianobacterias

La envoltura de las cianobacterias, está constituida, como en todas las bacterias gramnegativas, por una membrana plasmática y una membrana externa, situándose entre ambas una pared de mureína (peptidoglucano). La pared celular le brinda protección, forma y propiedades tintoriales a la bacteria, la membrana citoplasmática, le brinda permeabilidad selectiva, y el ADN bacteriano es el material genético, de forma circular, necesario para la reproducción, que lo hacen por fisión binaria las cianobacterias unicelulares o por fragmentación las de tipo filamentosas (Delgado *et al.*, 2018). (Figura. 4).

Fig. 4. Ultraestructura de una cianobacteria.



Fuente: <http://www.google.com.cu>

Según Álvarez (2022) en el citoplasma de estos microorganismos, es donde se realiza el metabolismo energético, contienen gránulos de cianoficina, glucógeno, y polifosfato para la formación de endosporas. Presentar estructuras reconocibles como los carboxisomas, que son corpúsculos que contienen la enzima ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa (RuBisCO), que realiza la fijación del CO₂, mediante un pigmento proteínico llamado cianoficina que absorbe el color azul. También en el citoplasma se encuentran las vesículas gasíferas, formadas por invaginación de la membrana plasmática con la que suelen conservar el movimiento, comunicación o contacto, y también para cambiar su flotabilidad según requieran migrar a zonas de mayor o menor luz. Este comportamiento es típico de las cianobacterias que forman parte de la columna de agua.

Leong y Curren (2018), utilizando medios analíticos más sofisticados, reconocieron agregados moleculares como ribosomas, microtúbulos (no homólogos de los eucarióticos). Observaron que la membrana plasmática forma invaginaciones donde se ubica el aparato molecular encargado de la fotosíntesis. Y la membrana tilacoidal, contiene los pigmentos para realizar la fotosíntesis, mediante las reacciones fotoquímicas que ocurren en el fotosistema I P 700, y en el fotosistema II P 680.

Descripción de los sistemas de clasificación actual de las cianobacterias

Entre los sistemas más utilizados para clasificar a las cianobacterias se encuentran cuatro propuestas diferentes, realizado la misma en base a las características de los órdenes que agrupan los diferentes géneros. Estas clasificaciones son las siguientes: Clasificación de Bourrelly (1970). Clasificando 5 órdenes: orden **Chrorococcales**, como células unicelulares o agrupadas en una matriz gelatinosa, y con multiplicación por fisión binaria. Dentro de esta clasificación también se encuentra el **orden Chamaesiphonales** como células epifitas con talo. Orden Pleurocapsales como células unicelulares, formando talo, que se asemejan a un pseudoparénquima, rara vez presentan acinetos, y se multiplican por fisión binaria. Orden Nostocales (*Anabaena sp*) que presentan heterocistes y acinetos, sin ramificación verdadera, y con filamentos

simples, por ejemplo, el género *Anabaena*. Y por último el orden Stigonematales, que presentan ramificación verdadera con tricomas (filamentos), formando heterocistes y acinetos.

La clasificación de Whitto - Potts (2000) y Castenholz – Waterbury (1989), agrupan a las cianobacterias en no filamentosas y filamentosas. La forma no filamentosa, está representada por los órdenes Chroococcales, que son células unicelulares o agregadas con una matriz gelatinosa por fuera de la pared. También el orden Pleurocapsales, que agrupa las cianobacterias unicelulares o formando talo que se asemejan a un pseudoparénquima, y que raramente forman acinetos. Y las formas filamentosas, está representada por los órdenes Oscillatoriales, que presentan tricomas sin heterocistes, y con ramificaciones. El orden Nostocales, con presencia de heterocistes y acinetos. El orden Stigonematales, donde el tricoma presenta heterocistes y acinetos, con ramificación verdadera.

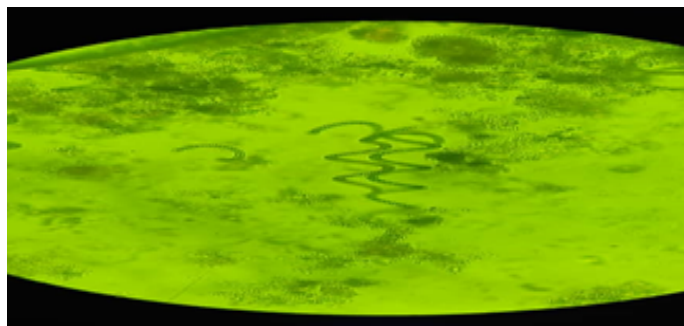
Por su parte la clasificación de Komarek et. al. (2003 y 2005), agrupa a los órdenes Chroococcales, que pueden ser unicelulares o coloniales. Orden Oscillatoriales, donde el tricoma tiene heterocistes y con falsas ramificaciones. Y por último el orden Nostocales, que presentan heterocistes y acinetos, con ramificación verdadera. Las cianobacterias del orden Chroococcales, son células unicelulares o coloniales, incluidos en una matriz gelatinosa. Las que se ubican en el orden Oscillatoriales, son filamentosas. Y por último en el orden Nostocales, se encuentran las que son filamentosas con heterocistes (ejemplo *Anabaena*).

Morfología y células especializadas en las cianobacterias

Las cianobacterias, son el componente principal simbiótico de las costras biológicas del suelo, ya que provee de sustancias hidrocarbonadas y nitrógeno al resto de los organismos que componen las CBS, mayormente a los hongos. Son llamadas también algas verdeazules, debido a la presencia de pigmentos clorofílicos que le confieren ese tono característico, similar con la morfología y el funcionamiento de las algas, miden sólo unos micrómetros (μm) de diámetro, pero son más grandes que la mayoría de las otras bacterias procariontas.

Mientras que muchas especies de cianobacterias son unicelulares, otras forman filamentos multicelulares denominados tricomas (Figura 5). En algunas especies los tricomas forman grupos que se albergan en una cápsula mucilaginosa denominada nódulo, aunque la mayoría de los nódulos tienen formas redondeadas, algunas especies forman estructuras foliares. Al dividirse las células que componen las cianobacterias multicelulares pueden formar, además de filamentos (que pueden ser lineales o ramificados), arreglos cuadrados de células o tridimensionales en formas de cubos y esferas. Entre las células de los filamentos existen estructuras de comunicación llamadas microplasmodesmos.

Fig. 5. Cianobacteria. Orden Oscillatoriales.



Fuente: Elaboración propia. Laboratorio docente. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Cienfuegos. Observada .40 X

Estas bacterias, pueden encontrarse de forma unicelular, agrupadas en colonias o formando filamentos, características que las distinguen del grupo procarionta. Las más comunes son unicelulares cocoides (esferoidales), a veces agregadas en una cápsula mucilaginosa, o formando filamentos simples. Los filamentos pueden aparecer agregados en haces, envueltos por mucilago, o de una manera que aparenta ramificación. Existen además cianobacterias que forman filamentos con ramificación verdadera. Las cianobacterias contradicen, como las mixobacterias, el prejuicio según el cual los procariontes no son nunca genuinamente pluricelulares.

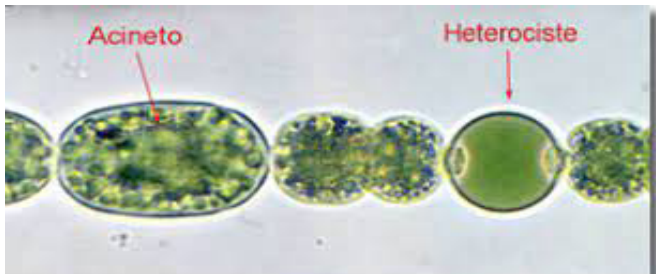
Dentro de las células especializadas se encuentran los heterocistes, que son células de mayor tamaño intercaladas en los filamentos, de pared gruesa y tiene celulosa, estas células están encargadas de la fijación de Nitrógeno (anexos, Figura. 4). Recientemente se ha confirmado que su pared presenta celulosa, el polímero más abundante en las paredes celulares de las plantas. Los heterocistes contienen la maquinaria de fijación del nitrógeno, proceso que es relativamente incompatible con la fotosíntesis. Contienen la enzima nitrogenasa para reducir el nitrógeno atmosférico en amonio, y es típico en los géneros *Anabaena*, *Nostoc*, y *Cytonema* (Tandeau de Marsac, 2004).

Entre las funciones fundamentales de los heterocistes (presentes en Nostocales), se encuentran la de producir tres paredes celulares adicionales, una de glucolípidos, que forma una barrera hidrofóbica para la difusión del oxígeno, producir nitrogenasa y otras proteínas involucradas en la fijación del nitrógeno, y para degradar el fotosistema II, que produce oxígeno, el cual es incompatible con la fotosíntesis, ya que el oxígeno inhibe a la nitrogenasa. También aumentar la regulación de las enzimas glucolíticas para la formación de glucógeno cianofíceo, producir proteínas para la eliminación del oxígeno residual, y ralentizar la difusión y comunicación celular, por medio de tapones polares compuestos por ficocianinas.

Los acinetos, al igual que los heterocistes son más grandes y de pared gruesa, acumulan cianoficina como sustancia de reserva, pueden soportar condiciones

difíciles, porque tienen el metabolismo muy lento, a veces con pequeñas protuberancias; poseen un citoplasma granuloso debido a la acumulación de gran cantidad de cianoficina como sustancia de reserva (Figura. 6). Entre la pared y las capas mucilaginosas segregan una nueva capa fibrosa. Tienen un metabolismo reducido y soportan condiciones de vida desfavorables. Funcionan como una endospora, brindándole a la bacteria resistencia al medio ante la desecación, y es común en los géneros *Westiella sp.*, que secretan al medio cianoficina y glucógeno.

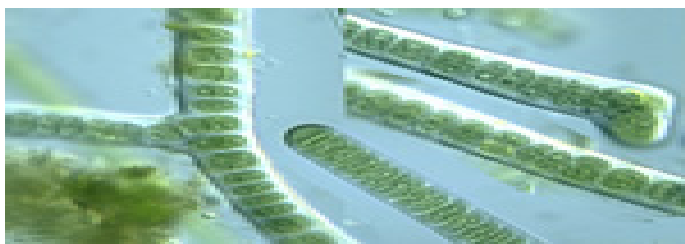
Fig. 6. Células especializadas de las cianobacterias: Acinetos y heterocistes.



Fuente: <http://www.google.com.cu>

También algunos géneros de cianobacterias producen filamentos móviles, llamados hormogonios (Figura. 7), que son formas de dispersión reproductiva, y también para el establecimiento de simbiosis con plantas, la formación de hormogonios puede ser estimulada por un déficit de Nitrógeno. Generalmente presentes en los géneros Stigonematales, y Nostocales. Se forman en los extremos apicales de los tricomas (filamentos), bajo condiciones ricas en fósforo, pudiendo tener vacuolas de gas.

Fig.7. Células especializadas de las cianobacterias: Hormogonios.



Fuente: <http://www.google.com.cu>

Igualmente algunas cianobacterias secretan biopelículas o mucilagos, que son polisacáridos que permiten la atracción entre las células de cianobacterias para la flotación (Galindo-Alcázar, 2018), observado en cepas de *Pseudanabaena sp.* También estas bacterias contienen pigmentos clorofílicos, en una estructura llamada tilacoides, además de ficobilinas, las cuales pueden ser de dos tipos, según la longitud de onda que absorbe, la ficocianina el azul, y la ficoeritrina el color rojo.

Nutrición y metabolismo de las cianobacterias

Las cianobacterias que desarrollan la nutrición fotoautotrófica, obtienen el carbono, mediante la reducción del dióxido de carbono atmosférico, convirtiendo este compuesto en glucógeno. Otras, pueden reducir el nitrógeno molecular gaseoso (N_2), en ausencia de luz, hasta amonio (NH_4^+), que después es utilizado por otros organismos. Para estos procesos no requieren vitaminas. Mientras las que desarrollan la nutrición fotoheterotrófica, pueden utilizar los compuestos orgánicos, como el acetato y glucosa, en presencia de luz como fuente de carbono.

El proceso de la fotosíntesis en las cianobacterias, se inicia en las membranas tilacoidales, donde se encuentran los fotosistemas I P700 y II P680, ocurriendo la fotólisis del agua, la cual libera oxígeno hacia la atmósfera, y también el ATP y el NADPH, que serán después utilizados en el Ciclo de Calvin o de las pentosas fosfato, para la síntesis de glucógeno, a partir de la reducción enzimática del dióxido de carbono atmosférico y agua.

Las cianobacterias son en general organismos fotosintetizadores, pero algunas viven heterotróficamente, como descomponedoras, o con un metabolismo mixto. Las cianobacterias comparten con algunas otras bacterias la capacidad de usar N_2 atmosférico como fuente de nitrógeno. Las cianobacterias fueron las primeras en realizar una variante de la fotosíntesis que ha llegado a ser la predominante, y que ha determinado la evolución de la biosfera terrestre. Se trata de la fotosíntesis oxigénica. La fotosíntesis necesita un reductor (una fuente de electrones), que en este caso es el agua (H_2O). Al tomar el Hidrógeno del agua, se libera oxígeno. La explosión evolutiva y ecológica de las cianobacterias, hace miles de millones de años, dio lugar a la invasión de la atmósfera por este gas, que ahora la caracteriza, sentando las bases para la aparición del metabolismo aerobio y la expansión de los organismos eucariontes.

Comparten con distintas bacterias la habilidad de tomar el N_2 del aire, donde es el gas más abundante, y reducirlo a amonio (NH_4^+), una forma de nitrógeno que todas las células pueden aprovechar. Los autótrofos que no pueden fijar el N_2 , tienen que tomar nitrato (NO_3^-), que es una sustancia escasa; este es el caso de las plantas. La enzima que realiza la fijación del nitrógeno es la nitrogenasa, que es inhibida por el oxígeno, con lo cual se hace incompatible con la fotosíntesis y, por tanto, en muchas cianobacterias los dos procesos se separan en el tiempo, realizándose la fotosíntesis durante las horas de luz y la fijación de nitrógeno solamente por la noche. Algunas especies han solucionado el problema mediante los heterocistes, unas células más grandes y con una pared engrosada con celulosa y que se encargan de la fijación del nitrógeno; en los heterocistes no hay fotosistema II, de modo que no hay desprendimiento de oxígeno y la nitrogenasa puede actuar sin problemas (Gumsley *et. al.*, 2020)

Algunas cianobacterias son simbioses de plantas acuáticas, como los helechos del género *Azolla sp.*, a las que

suministran nitrógeno. Esto es fácilmente apreciable en cultivos de arroz, ubicados en China y Vietnam, en los que en 1988, se notó un incremento del 5% en la producción del cereal antes mencionado, debido principalmente a la mejora de la calidad del nitrógeno fijado y a que las cianobacterias funcionan como reguladores ecológicos, por lo que adquieren funciones de herbicidas y plaguicidas. Dada su abundancia en distintos ambientes, las cianobacterias son importantes para la circulación de nutrientes, incorporando nitrógeno a la cadena alimentaria, en la que participan como productores primarios o como descomponedores.

Formas de reproducción de las cianobacterias

Las cianobacterias al ser bacterias solo tienen reproducción asexual, sin embargo, algunas cianobacterias tienen mecanismos de reproducción únicos dentro de las bacterias, presentando células especializadas para esta función. Las formas de reproducción, incluyen la fisión binaria, que es cuando una célula madre crece y entonces se divide a la mitad dando lugar a dos células hijas, es el tipo de reproducción más común dentro del orden Synechococcales, pudiendo ser de manera bipolar o apolar. La fisión múltiple es cuando una célula madre se divide en fragmentos irregulares llamados beocitos. La división puede darse de manera instantánea o secuencial, y se diferencia de la fisión binaria, ya que la célula madre no tiene un crecimiento o incremento de volumen previo. Este tipo de reproducción solo se presenta en cianobacterias del orden *Pleurocapsales*. Se cree que este tipo de división es una adaptación a ambientes hipersalinos ya que la célula madre protege a las células pequeñas de una ruptura por equilibrio osmótico.

La gemación es cuando una célula madre se fragmenta secuencialmente por los extremos, dando lugar a los nanocitos o exocitos, que después se liberan, este tipo de reproducción solo se ha observado en *Chamaesiphon*. Y por último la fragmentación, que es cuando el tricoma de un filamento se quiebra en dos, esto es posible gracias a una célula que se sacrifica llamada necridio, entonces los extremos pueden separarse formando dos filamentos o bien, pueden quedarse unidos dentro del mismo mucilago, formando una rama falsa. Se cree que esta reproducción es una adaptación que confiere a las células hijas una protección parental ya que los nuevos tricomas, pueden permanecer unidos a las células madre y evitar la depredación.

Utilización de las cianobacterias en la industria alimentaria y médico-farmacéutica

En los últimos años, cada vez son más las personas que buscan alimentos que no solamente sean nutritivos, sino que además se puedan producir de forma sostenible para el medio ambiente. Es en este contexto donde las cianobacterias, un grupo de bacterias fotosintéticas, podrían convertirse en un ingrediente innovador para la alimentación del futuro. Las cianobacterias son microorganismos fotosintéticos que se encuentran distribuidos por todo el planeta. Su estudio tiene mucho interés debido a las aplicaciones biotecnológicas, como son la producción de biocombustibles como el hidrógeno o su uso como

biofertilizantes. Además, al igual que las plantas, son capaces de llevar a cabo la fotosíntesis, contribuyendo de forma importante a la producción de oxígeno en nuestro planeta, básicamente en los ecosistemas marinos. Por todo ello, se ha propuesto que podrían ser la base para futuros asentamientos en otros planetas.

Aunque, algunas cianobacterias, pueden causar también problemas de salud en humanos y animales, pero otras son comestibles y se han consumido durante siglos en diferentes partes del mundo, especialmente en África, Asia y América del Sur. En México, por ejemplo, la especie *Spirulina*, también denominada *Arthorspira*, se ha utilizado como fuente de alimento desde tiempos prehistóricos. De hecho, el ejército de Hernán Cortés documentó la existencia de cosechas de *Spirulina* en el lago de Texcoco (México), a las que los aztecas llamaban *te-cuitlatl* (que significa 'excremento de las rocas'), y su consumo es en forma de tortas.

Existen muchos tipos de cianobacterias que pueden ser comestibles, pero las más importantes son *Spirulina*, *Chlorella* y *Nostoc flageliforme* y *Aphanizomenon flos-aquae*. *Spirulina*, también denominada *Arthorspira*, es una cianobacteria que, como su nombre indica, tiene forma de espiral. Se ha cultivado durante siglos en América Central y África, y posiblemente sea la cianobacteria comestible más conocida y utilizada, pues se puede encontrar en muchos suplementos dietéticos y nutricionales comerciales que comúnmente reciben el nombre de espirulina. Esta cianobacteria es una fuente excepcional de proteínas, ácidos grasos esenciales, antioxidantes, vitaminas B, C, D y E y minerales, principalmente hierro, calcio, magnesio. Generalmente se consume desecada, en forma de polvo, comprimidos o cápsulas, aunque también puede consumirse fresca.

A que pesar de las múltiples ventajas de estos microorganismos, las floraciones de cianobacterias son eventos naturales que, entre otros factores, responden al incremento de la temperatura, luz y de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) que llegan al agua desde fuentes puntuales (ej. Vertidos domésticos e industriales) o difusas (ej. Fertilizantes arrastrados por las lluvias). Estas pueden causar problemas en la calidad del agua por su rápido crecimiento y abundancia. Además de generar biomasa en exceso, causan cambios físicos, químicos y biológicos en el ecosistema. Las toxinas de cianobacterias se han nombrado cianotoxinas, y son metabolitos secundarios biológicamente activos. También las cianobacterias producen hepatotóxicas y dermatotóxicas. De igual manera, el desarrollo masivo de las cianobacterias confiere color, olor, sabor y aspecto alterado al agua, generando un desequilibrio ecológico, limitaciones para la potabilización y otros fines. Una alta biomasa de cianobacterias, también puede contribuir a problemas estéticos, poniendo en peligro el uso recreativo (debido a la presencia de espumas en la superficie y olores desagradables), afectando el sabor del agua potable tratada y su carácter de potable, debido a que las toxinas pueden sortear los sistemas.

Funciones ambientales de las costras biológicas del suelo

Las costras biológicas del suelo, se encuentran entre 1-3 mm de la profundidad. Entre las principales funciones ambientales de las costras biológicas se destacan, que enriquecen con oxígeno la atmósfera, para que el resto de los organismos aerobios como el ser humano y los animales puedan sobrevivir. Fijan el nitrógeno al suelo, incorporando también carbono y otros minerales. Son los productores primarios del fitoplancton. Además, rehabilitan los suelos erosionados por condiciones naturales o debido al factor antrópico.

Las cianobacterias dominantes en las costras biológicas del suelo, secretan un mucopolisacárido mucilaginoso pegajoso que conduce la agregación de las partículas del suelo y agua, favoreciendo la retención de la humedad y a la vez restableciendo las propiedades físico – químicas del suelo, que lo hacen más fértil y productivo para los diferentes cultivos de interés económico.

El interés despertado por la CBS no es sorprendente, ya que representa un importante aporte de carbono y nitrógeno al suelo, incrementa su estabilidad y protege frente a la acción erosiva de la lluvia y el viento, favorece la agregación y cohesión de partículas de suelo, modula la infiltración de manera directa a las plantas vasculares, influyendo en su contenido nutricional y estado hídrico. Estas asociaciones simbióticas, se observan como parches grises en suelos secos, y cuando llueve se tornan verdes. De manera que las condiciones ecológicas para su desarrollo, se ve favorecida por la radiación solar, en suelos desnudos y en zonas erosionadas con abundante matorral xerófilo.

Asimismo, la presencia de las costras biológicas en aquellas regiones o microsistemas ambientales, donde también existe el humo, se incrementa el contenido de carbono y nitrógeno, aumentando la calidad biológica de los humos y por tanto la fertilidad de los suelos para los cultivos. Por lo que es factible tomar parches de las costras biológicas con dominancia por cianobacteria y e inocularla en suelos pobres en nitrógeno y carbono.

Las funciones ecológicas de estas asociaciones simbióticas, residen en que son los productores primarios, por lo que significa que ocupan la base de la cadena alimentaria en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Constituyen una fuente de alimento para muchos organismos, como el zooplancton, los peces pequeños y los invertebrados. Además, ciertas especies de cianobacterias, tienen la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico, un proceso que transforma el nitrógeno gaseoso en compuestos nitrogenados asimilables por las plantas. Esta fijación del nitrógeno desempeña un papel esencial en el reciclaje de nutrientes y la fertilidad del suelo. También participan en la formación de estructuras biológicas complejas, como los estromatolitos y las biopelículas. Los estromatolitos son formaciones rocosas compuestas por capas alternas de sedimentos y colonias de cianobacterias fosilizadas, mientras que las biopelículas son comunidades microbianas organizadas en una matriz extracelular (Álvarez *et al.*, 2022).

Propagación y mezclas de las costras biológicas del

suelo con abonos orgánicos

García y Arabinar (2021) hacen referencia a que existen distintos tipos funcionales de CBS (dominadas por cianobacterias, cianolíquenes, ficolíquenes y musgos) que poseen potencialidad para la recuperación de los suelos degradados. Los autores, cultivaron en vivero diferentes tipos funcionales de CBS, recolectadas en el desierto del Monte, Argentina, combinando diferentes tratamientos de siembra (CBS triturada o agregada en trozos) y fertilidad (sustrato con o sin estiércol de cabra). Las variables medidas como indicadores de funcionalidad de las CBS, fueron la cobertura total de las CBS, la profundidad alcanzada, la estabilidad del suelo, y las concentraciones de amonio y fosfato.

Los resultados experimentales indican que la siembra triturada favoreció el desarrollo y funcionalidad de la CBS, en particular en las macetas sembradas con cianolíquenes, ficolíquenes y musgos. La adición de fertilizante redujo la cobertura total de las CBS, dominadas por ficolíquenes y musgos. La profundidad de la CBS y la estabilidad del suelo aumentaron respecto al suelo desnudo en macetas dominadas por líquenes y musgos, y estuvieron favorecidas por la siembra triturada. La concentración de nutrientes dependió del tipo funcional de CBS; en comparación con el suelo desnudo, fue menor en todos los casos. Se concluye que el cultivo de CBS en invernadero, bajo tratamientos de siembra triturada y sin fertilizante, favoreció la cobertura y profundidad de CBS y aumentó la estabilidad de los suelos. En este estudio la cobertura total de las CBS, aumentó en 19 meses. Estos resultados permiten el diseño de estrategias que incluyan a la CBS como herramienta en la restauración de tierras áridas.

Actualmente es posible realizar experimentalmente combinaciones de las costras biológicas del suelo con abonos orgánicos, tales como el humo de lombriz y cachaza, que es un subproducto industrial de la fabricación de azúcar de caña. También con abonos verdes, que contienen materia foliar de coltaria, canavalia y sorgo. Esto restablece las propiedades físicas y químicas de los suelos, mejorando la fertilidad, que luego después, podrán ser utilizados para el cultivo de plantas de ciclo corto y también en los suelos erosionados.

En este sentido, un estudio experimental llevado a cabo por Romero-Jiménez *et al.*, (2021), profundizan en estos aspectos. El objetivo fue estudiar la presencia de costras biológicas del suelo (CBS) y sus efectos beneficiosos para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas. Evaluando las posibilidades del empleo de estas como bioindicadores de procesos de degradación existentes en suelos de uso agrícola (cultivado con maíz), así como la utilización de las mismas como biofertilizantes. Como alternativa de biofertilizantes dadas sus características para fijar nitrógeno, arrojó que el tratamiento, empleando 50 % suelo con 50 % de CBS, resultó ser estadísticamente de mayor influencia sobre las variables morfoagronómicas evaluadas, aunque las combinaciones de 50% suelo, 30% de costra, y 20% de cachaza, también pudieran ser utilizadas en la fertilización del cultivo. Por lo que el

empleo de Costras Biológicas del Suelo dominadas por cianobacterias es una alternativa viable para ser utilizada como biofertilizantes en el cultivo del maíz manifestándose en las variables morfoagronómicas.

Por otro lado, se identificaron 3 morfoespecies como principales componentes de CBS presentes en los suelos degradados y contaminados, y se demuestra que las costras biológicas del suelo, ejercen efectos positivos en las propiedades edáficas evaluadas, ya que, en presencia de CBS, se encontró los mayores valores de humedad natural, contenido de arcilla y los mayores valores de pH. También la erosión disminuyó, por incrementarse el porcentaje de cobertura de la superficie del suelo, por otro lado, se evidencia que en los sitios donde las costras estaban presentes, la repelencia al agua disminuye, evitando la escorrentía. De igual manera se corrobora que las costras biológicas dominadas por cianobacterias, incrementan los niveles de nitrógeno atmosférico fijados en el suelo, cultivado con maíz (*Zea Mays*, L).

Maroto y Romero –Jiménez (2023. a) estudiaron también, el efecto fertilizante de las costras biológicas del suelo dominadas por cianobacterias y la combinación con humus de lombriz en el cultivo del rábano, con resultados alentadores (Figura. 9). Para ello se evaluaron varias variables morfoagronómicas del cultivo del rábano, incluyendo la germinación, altura de la planta, número de hojas por planta y diámetro del bulbo. El tratamiento mostró un efecto positivo de las costras mezcladas con el humus de lombriz, en cuanto a la altura de la planta. Estos hallazgos continúan la línea de investigación sobre el uso de las CBS como fertilizante en cultivos agrícolas y resaltan la importancia de estudiar la interacción entre los diferentes componentes del suelo y las plantas para mejorar la productividad agrícola de forma sostenible.

Fig. 8. Aplicación de costras biológicas del suelo mezcladas con humus de lombriz en cultivo de rábano.



Fuente: Elaboración propia. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Cienfuegos.

Ecología de las costras biológicas del Suelo

Las investigaciones sobre las costras biológicas del suelo han incluido una serie de pruebas para determinar las condiciones ambientales adecuadas para la sobrevivencia de los organismos y han permitido demostrar que

estos lleguen a subsistir con la humedad de la temporada invernal y con suficiente radiación solar. Los matorrales xerófilos, por ejemplo, dan sustento a diversos procesos ecológicos, entre estos, proveen de alimentos a muchas especies, incluyendo los organismos que viven en las costras biológicas del suelo, disminuyen la erosión y favorecen la recarga de acuíferos (Navas –Romero *et. al.*, (2023)

Durante los meses cálidos, estos vegetales tienen una apariencia marchita por la falta de humedad; sin embargo, siguen vivos. En temporada de lluvia, los matorrales evitan la erosión del suelo a causa de los escurrimientos del agua, asimismo la retienen por más tiempo en la superficie, favoreciendo una mayor infiltración a los mantos acuíferos. Los resultados indican que la preservación y proliferación del matorral xerófilo, garantizará el abasto de agua en el futuro, por lo tanto, las investigaciones de costras biológicas del suelo son fundamentales para mejorar los procesos de reforestación de esta cubierta vegetal. Porque se ha comprobado que las costras biológicas sirven para retener las partículas del suelo que conservan la humedad y que se pueden emplear y desarrollar para acompañar programas de reforestación.

Las biopelículas que contienen costras biológicas pulverizadas, pueden ser usadas como inóculos en suelos esterilizados. Después se llevan al campo para determinar las condiciones ambientales en que sobreviven. Estas crecen bajo la radiación del solar, en suelos desnudos, y en zonas erosionadas; lugares en donde no hay nada, llegan las cianobacterias y empiezan a cambiar la calidad del suelo, mejorando las condiciones para que germinen semillas y crezcan las plantas. A partir de los resultados obtenidos, los investigadores estiman que las costras biológicas son efectivas para restaurar los matorrales xerófilos en áreas perturbadas de las zonas áridas. También los organismos micro artrópodos que cohabitan dentro de las costras biológicas tienen la función de descomponer los desechos de los matorrales, como tallos y frutas. Posteriormente, los microorganismos del suelo producen humus, a partir de la descomposición de la materia orgánica del suelo, y es de una calidad mayor, en donde existen costras biológicas.

En los ecosistemas áridos y semiáridos, donde las concentraciones de nitrógeno son relativamente bajas comparadas con otros ecosistemas la fijación de dinitrógeno (N₂) es llevada a cabo principalmente por los organismos que componen la CBS en especial las cianobacterias; gran parte del nitrógeno fijado por las costras se libera casi de inmediato a los suelos circundantes y así el nitrógeno liberado es fácilmente absorbido por organismos tales como plantas vasculares y hongos. Este proceso de fijación por parte de la CBS es altamente dependiente de la humedad, la temperatura y la luz, así como de la composición específica de dicha costra.

Por ejemplo, en zonas semiáridas del centro de México, la sobreexplotación de pastizales ha ocasionado severa reducción de su productividad. Su fisonomía se caracteriza

por espacios abiertos con presencia de costras biológicas del suelo. Aunque este tipo de paisaje es representativo de pastizales semiáridos de San Luis Potosí, no existe información relacionada con el papel de las costras biológicas. Por tal motivo el objetivo de este estudio fue identificar y caracterizar la frecuencia y cobertura de costras biológicas del suelo de un pastizal degradado a nivel de comunidad y macollo de gramíneas, así como su influencia en la biomasa de raíces a nivel de macollo.

Factores como la precipitación y la temperatura, marcan patrones regionales de distribución y abundancia de especies de la CBS. A escala regional, la precipitación y la temperatura limitan la presencia y el desarrollo de la misma, ya que la mayoría de sus componentes son organismos con particulares requerimientos de humedad. A una escala local, la vegetación vascular y las propiedades físico-químicas del suelo determinan la composición de las comunidades y la abundancia relativa de sus componentes, debido a los distintos requerimientos de luz, acidez del suelo y disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, los estudios más recientes sobre la CBS ponen de manifiesto la posibilidad de encontrar diferencias interespecificas ante diversos factores ambientales.

Conclusiones

Las costras biológicas del suelo son colonias de organismos que crecen entre dos a tres milímetros por debajo de la superficie terrestre, están formadas por cianobacterias, hongos, microalgas, líquenes costrosos, constituidos por hongos y microalgas que forman una simbiosis, y que generan redes filamentosas. Esto último en conjunto con las cianobacterias, producen polisacáridos de textura pegajosa, que facilita la adhesión de las partículas del suelo, dándole estabilidad. Los resultados demuestran que se está trabajando en la utilización de las costras biológicas, para aumentar la fertilidad de los suelos, también detener la erosión, retener la humedad, y evitar la infiltración. Al tiempo, comienzan los primeros estudios de fraccionar las costras biológicas, mezclarlas y emplearlas como inóculos en suelos con diferentes manejos. Por otra parte, las cianobacterias son microorganismos fascinantes que desempeñan un papel importante en el equilibrio ecológico de nuestro planeta. Es esencial comprender mejor estos organismos si queremos aprovechar sus propiedades beneficiosas, como la fijación del nitrógeno y la producción de oxígeno, y desarrollar estrategias para la gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos, así como permitir que los seres humanos se beneficien de las ventajas nutricionales y terapéuticas que pueden ofrecer ciertas cianobacterias, como la espirulina.

Referencias bibliográficas

Álvarez, D.B. (2022). Cianobacterias. Características. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/cianobacterias-que-son-caracteristicas-y-ejemplos-3546.html>.

- Bourrelly, P. (1970): Les algues d'eau douce III. – N. Bouée & Cie, Paris.
- Castenholz, R.W., Waterbury, J.B. (1989). Cyanobacteria. In Bergey's Manual Of Systematic Bacteriology .Williams &Wilkins, Baltimore Vol.3 .pp .1710-1806.
- Delgado Ortiz, M. I., Yanner González, S.T., López Menéndez, A.B., Castro Ramos, Y. (2018). Microbiología General. Editorial Universitaria Félix Varela.
- Domínguez, Nuño. (2018). «Guerra abierta por el fósil más antiguo del mundo». *El País*. ISSN 1134-6582. https://es.wikipedia.org/wiki/Cyanobacteria#cite_ref-20.
- Galindo - Alcázar, O., Medina Jaritz, N.B., Garduño –Solórzano, G. (2018) Cianobacterias y microalgas de bio-películas en zonas arqueológicas. México. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.10>. número.45, pp131-146.
- García, V. R ., Aranibar, J. N .(2021). Propagación de distintos tipos funcionales de la costra biológica del suelo del desierto del Monte, Argentina. Asociación Argentina de Ecología; *Ecología Austral*; 31; 1; 4-2021; 1-16.
- Gumsley, Ashley, P., Chamberlain, Kevin R., Bleeker, Woute., Söderlund, Ulf., de Kock, Michiel O., Larsson, Emilie R., Bekker, Andrey. (2020). «Timing and tempo of the Great Oxidation Event». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (8): 1811-1816. ISSN 0027-8424. Doi: [10.1073/pnas.1608824114](https://doi.org/10.1073/pnas.1608824114).
- Komárek J. & Kaštovský J. (2003). Coincidences of structural and molecular characters in evolutionary lines of cyanobacteria. *Algol. Stud.* 148: 305–325.
- Komárek J. & Anagnostidis K. (2005). Cyanoprokaryota.2. Oscillatoriales. – In: Büdel B., Krienitz L., Gärtner G. & Schagerl M. (eds), Süßwasserflora von Mitteleuropa 19/2, p. 759, Elsevier/Spektrum, Heidelberg.
- Lange, O. (2001). Photosynthesis of Soil-Crust biota as dependent on environmental factors. J. Belnap y O.L. Lange (Comp). Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management Springer-Verlag Berlin. *Ecological Studies* 150: 219-240.
- Leong, S. C. Y., Cureen, E. (2018). *Lyngbya regalis* sp. nov. (Oscillatoriales, Cyabophyceae), uma nova cianobactéria marinha. *Tropical. Phytotaxa*. 367:120 - 132.
- Mazoyer, M., Laurence Roudart.(2002) . *Histoire des agricultures du monde: Du néolithique à la crise contemporaine*, Paris: Seuil. ISBN 2-02-053061-9, engl. *A History of World Agriculture: From the Neolithic Age to the Current Crisis*, New York: Monthly Review Press, 2006, ISBN 1-58367-121-8.

- Margulis, Lynn. (2002). *Planeta simbiótico*. Editorial Debate, ISBN 84-8306-998-9, p. 161.
- Maroto Chang, N., Romero-Jiménez, A.M. (2023 a). Evaluación del efecto fertilizante de las costras biológicas del suelo y el humus de lombriz en el cultivo del rábano. [Trabajo de Tesis de Agronomía. Facultad de Ciencias Agrarias]. Universidad de Cienfuegos. Cuba.
- Maroto, Ch. N., Romero-Jiménez, A.M., & Del Campo Rodríguez, Y. (2023.b). Estado Cultural De las costras biológicas del suelo. *Revista Científica Agroecosistema*, 11(2), 110-125. <http://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/631.ISBN2415-2862>.
- Navas –Romero, A.L., Herrera Moratta, M.A., Carretero, E.M. (2023). Panorama sobre las variaciones estacionales y diarias de la temperatura del suelo bajo el efecto de las costras biológicas del suelo en el centro oeste-este. Universidad de San Juan. Argentina. <http://doi.org/10.21829/amb/30.2023.2212>. ISSN 0187-7151.
- Romero- Jiménez, A.M., Olimpia Nilda Rajadel – Acosta, O.N &. (2021). Estudio de costras biológicas del suelo: efecto como biofertilizante y bioindicadores de procesos de degradación de suelo en la CPA Mártires de Barbados de la provincia de Cienfuegos. Universidad de Cienfuegos. (UCF). Dpto de Ciencias biológicas aplicadas. Facultad de Ciencias Agrarias. Cienfuegos. Cuba.
- Tandeau de Marsac, N. (2004). "Differentiation of Hormogonia and Relationships with Other Biological Processes," en: "The Molecular Biology of Cyanobacteria Advances in Photosynthesis and Respiration", volumen 1, páginas 825-842, [1] Archivado el 8 de abril de 2015 en Wayback M. https://es.wikipedia.org/wiki/Hormogonio#cite_ref-1.
- Whitton B., Potts, M. (2000). The ecology of Cyanobacteria. Their diversity in time and space. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers: 465-504.