

Cianobacterias presentes en aguas termales, una alternativa para el desarrollo sustentable del campo chihuahuense

Héctor Alejandro Reza Solís¹

Ofelia Adriana Hernández Rodríguez²

Andrés Francisco Martínez Rosales³

Resumen

Las cianobacterias comprenden un gran y diverso grupo de microorganismos procariotas cuyo origen se remonta hace 3.5 millones de años. Son las principales productoras del oxígeno de nuestro planeta, forman la base de las redes tróficas, tienen una amplia distribución en cualquier tipo de ecosistema terrestre o acuático, entre ellos los ambientes con altas temperaturas y son fuente de una amplia gama de productos de alto valor agregado, los cuales han despertado el interés dentro del campo de la biotecnología actual, de tal manera que se han desarrollado aplicaciones en muchas áreas, siendo la agricultura una de las más importantes. Con base a lo anterior, se estableció como objetivo de este avance de investigación, la exploración de las aguas termales del brote de San Diego de Alcalá, Aldama, Chihuahua, en búsqueda de cianobacterias con potencial uso biotecnológico en el campo chihuahuense. Los resultados evidenciaron la presencia de cianobacterias que pueden ser empleadas en el desarrollo de aplicaciones biotecnológicas, lo cual representa una alternativa viable para el desarrollo del campo chihuahuense.

Conceptos clave: Agricultura, aplicaciones biotecnológicas, termófilas.

Introducción

Las cianobacterias, también conocidas como cianofitas o comúnmente como algas verde-azules, comprenden un gran y diverso grupo de microorganismos procariotas cuyo origen se remonta hace 3.5 millones de años en el Precámbrico (Aguilera et al., 2011). Comparten características con las bacterias, ya que al ser procariontes carecen de un núcleo verdadero, y también con las algas, ya que pueden realizar fotosíntesis oxigénica debido a que presentan los mismos fotosistemas I y II de las algas eucariotas y las plantas superiores.

Son las principales productoras del oxígeno en nuestro planeta y forman la base de las redes tróficas como alimento para los organismos herbívoros, además de que algunas especies contienen pigmentos como la clorofila a, ficoeritrina y ficocianina, y destacan por la producción de biomasa, proteínas y enzimas, entre otros compuestos (Almanza et al., 2016; Singh y Saxena, 2015; Okolodkov y Blanco-Pérez, 2011). La obtención de productos de alto valor agregado derivados de las cianobacterias ha despertado el interés de los investigadores dentro del campo de la biotecnología actual (García-Romeral et al., 2017), de tal manera que

¹Ibt. Universidad Autónoma de Chihuahua, p356861@uach.mx

²D.Ph. Universidad Autónoma de Chihuahua, aernande@uach.mx

³Dr. Universidad Autónoma de Chihuahua, anmartinez@uach.mx

se han desarrollado aplicaciones en un amplio rango de áreas, siendo la agricultura una de ellas.

Las cianobacterias tienen una amplia distribución en cualquier tipo de ecosistema terrestre o acuático, incluyendo climas extremos debido a que pueden tolerar un gran rango de temperaturas, salinidad, pH y diferentes intensidades de luz (Barsanti y Gualtieri, 2014; Khan et al., 2018). Aunque estudios han corroborado la presencia de consorcios de microorganismos en cuerpos de aguas termales (López-Sandoval et al., 2016), en el estado de Chihuahua estos han sido poco estudiados en cuanto a la diversidad de cianobacterias (De la Maza Benignos et al., 2011; De la Maza Benignos et al., 2014; Oliva-Martínez et al., 2014), por lo que es necesario realizar investigaciones que impulsen la localización de la diversidad de las cianobacterias en el estado para el desarrollo de la agricultura regional.

Con base a lo anterior se establece como objetivo de este trabajo la exploración de las aguas termales del brote de San Diego de Alcalá, Aldama, Chihuahua, en búsqueda de cianobacterias con potencial uso biotecnológico en el campo chihuahuense.

Morfología de las cianobacterias

La diversidad de las cianobacterias comprende desde microorganismos unicelulares a multicelulares, cocoides, filamentosos, ramificados, casi incoloros a muy pigmentados, autótrofos, heterótrofos, de vida libre y en simbiosis con otros microorganismos (Thajuddin y Subramanian, 2005; Rai et al., 2002).

Las especies cocoides se pueden presentar como células individuales, colonias o masas de diversas formas en las que las células están dispuestas en filas, formando una placa plana, o radialmente formando colonias esféricas. Sus concentraciones de células son variables; las especies filamentosas producen una fila de células denominadas tricomas. Pueden ser simples, rectos o enrollados en espiral. El tricoma con la vaina envolvente se denomina filamento (Imagen 1a) (Thajuddin y Subramanian, 2005).

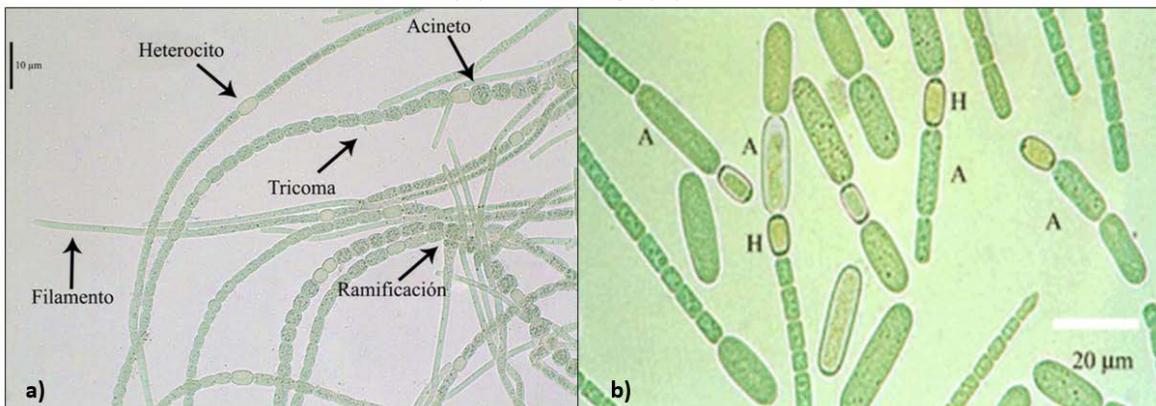
Las cianobacterias presentan diferentes tipos de células (Imagen 1b), como las células vegetativas, que son las responsables de la fotosíntesis oxigénica y la fijación de dióxido de carbono (Mullineaux et al., 2008), células especializadas llamadas acinetos en las cianobacterias del orden *Nostocales* y *Stigonematales*, que cuando las condiciones ambientales no son propicias para el mantenimiento de las mismas, las células vegetativas se diferencian en células que están en reposo, parecidas a esporas, que aunque aún conservan un poco de actividad metabólica, su crecimiento y desarrollo está pausado (Campbell et al., 2007). Estas células son resistentes a la desecación y al frío, pero no al calor; y cuando las condiciones ambientales de nuevo son favorables, germinan para dar paso a nuevos filamentos para continuar con su proliferación (Waterbury, 2006). Los acinetos presentan una pared celular engrosada y una envoltura extracelular de varias capas, compuesta de carbohidratos ricos en glucosa y compuestos amino (Kaplan-Levy et al., 2010).

También presentan células especializadas en la fijación de nitrógeno atmosférico, las cuales son llamadas heterocistos. Están distribuidas a lo largo o al final de los filamentos en cianobacterias multicelulares filamentosas, que están conectadas con las células vegetativas adyacentes. Esto permite que haya un flujo de los productos de la fijación del nitrógeno desde

los heterocistos a las células vegetativas y de los productos fotosintéticos de las células vegetativas a los heterocistos (Mayz-Figueroa, 2004). Los heterocistos se distinguen de las células vegetativas por su mayor tamaño, su pigmentación disminuida, gránulos de cianoficina prominentes en los polos adyacentes de las células vegetativas y envolturas celulares más gruesas (Kumar et al., 2010). Presentan una capa externa de polisacáridos y una capa interna de glicolípidos que funciona como una barrera para la difusión de gases (Martínez-Rosales et al., 2020), en la cual se permite la difusión tanto de nitrógeno como de oxígeno (Walsby, 1985). La difusión del oxígeno dentro del heterocisto inhibe la nitrogenasa (Wolk et al., 1994), pero gracias a la permeabilidad de la difusión de gases, la tasa de difusión del oxígeno es tan baja que se puede mantener una condición anaeróbica, y la tasa de difusión del nitrógeno es suficiente para su fijación (Walsby, 1985).

Otra característica de los heterocistos es que solo cuentan con el fotosistema I, debido a esto es capaz de captar la luz como fuente energética, pero lo hace dependiente de las células vegetativas para introducir sacarosa (Stal, 2017).

Imagen 1. Células diferenciadas de cianobacterias: a) *Fischerella TB22*; b) *Anabaena cylindrica*. (A) acinetos y (H) heterocistos



Fuente: Martínez-Rosales et al., 2020; Herrero et al., 2004

Cianobacterias termófilas

Las cianobacterias, al ser capaces de tolerar factores ambientales adversos, se encuentran en cualquier tipo de ecosistemas (Barsanti y Gualtieri, 2014). La temperatura es uno de los principales factores para la proliferación de cianobacterias, ya que a medida que aumenta se aceleran las reacciones metabólicas, hasta llegar a una temperatura máxima en la que ciertos componentes celulares como las proteínas y ácidos grasos se degradan irreversiblemente hasta causar la muerte celular (Brock, 2012; Anzures et al., 2021).

Las cianobacterias termófilas poseen proteínas y enzimas termoestables, que les brindan estabilidad ya sea a nivel de membrana, crecimiento más acelerado o estabilización estructural para su desarrollo bajo esas condiciones (Singleton Jr. y Amelunxen, 1973; Covarrubias et al., 2016). Estas proteínas adquieren estabilidad debido a que hay una mayor compactación molecular de la proteína, el número y tamaño de las cavidades superficiales es menor que la de una proteína no termoestable, formación de núcleos altamente polares, disminución de glicina para que la proteína no pueda girar, interacciones electrostáticas e

hidrofóbicas optimizadas, intercambio de aminoácidos para incrementar la hidrofobicidad, la sustitución de aminoácidos sensibles a diseminarse como la asparagina, a cambiar su estructura como la cisteína, o a sufrir daño oxidativo como la metionina, acumulación de solutos orgánicos como inositol y bifosfoglicerato y algunos iones inorgánicos como potasio y sodio (Anzures et al., 2021).

Aplicaciones biotecnológicas de las cianobacterias en la agricultura

Algunas cianobacterias producen metabolitos especializados como hormonas vegetales, polisacáridos, compuestos antimicrobianos, fijación de nitrógeno atmosférico, entre otros (López-Padrón et al., 2020; Hernández-Reyes et al., 2019), por lo que influyen positivamente en el crecimiento de las plantas y en la proliferación de microorganismos en el suelo por medio de asociaciones casuales o relaciones simbióticas (Rai et al., 2002).

Las aplicaciones de las cianobacterias en la agricultura se pueden dividir en cuanto a su función en: biofertilizantes (Martínez-Rosales et al., 2020), co-cultivo hidropónico (Bharti et al., 2019) y frente a enfermedades en plantas (Righini et al., 2022).

Las cianobacterias debido a ser microorganismos procariotas fotoautótrofos y en ocasiones heterótrofos facultativos, son capaces de utilizar diferentes fuentes de carbono y nitrógeno, y gracias a la producción de hormonas vegetales como las auxinas, citoquininas y giberelinas, promueven la germinación, el crecimiento y el desarrollo de las plantas (Manjunath et al., 2011; Joshi et al., 2020). Hernández-Reyes et al. (2019) demostraron que el consorcio de las cianobacterias *Anabaena* sp., *Leptolyngbya* sp. y *Synechocystis* sp. estimularon la altura de un cultivo de maíz azul, así como el aumento en el número de hojas y una mayor cantidad de proteína en los granos.

El co-cultivo hidropónico de microorganismos vivos con plantas es una estrategia atractiva para la reducción en el uso de fertilizantes químicos y promover el crecimiento hidropónico de plantas de interés comercial, como en el caso de Kholssi et al. (2021), que promovieron el crecimiento de trigo con las cianobacterias *Calothrix* sp. y *Anabaena cylindrica* y las rizobacterias *Chryseobacterium balustinum*, *Pseudomonas simiae* y *Pseudomonas fluorescens*.

Las cianobacterias son capaces de producir una amplia gama de toxinas como metabolitos secundarios, las cuales pueden ser utilizadas como pesticidas en los campos de cultivo (Biondi et al., 2004) y de esta manera reducir el uso de productos químicos, que están relacionados con el deterioro ambiental y riesgos para la salud humana (Pérez-Madruga et al., 2020). De igual manera, las cianobacterias promueven el crecimiento y el establecimiento de las comunidades microbianas del suelo, las cuales proporcionan resistencia contra enfermedades a nivel raíz de la planta (Koffi et al., 2018).

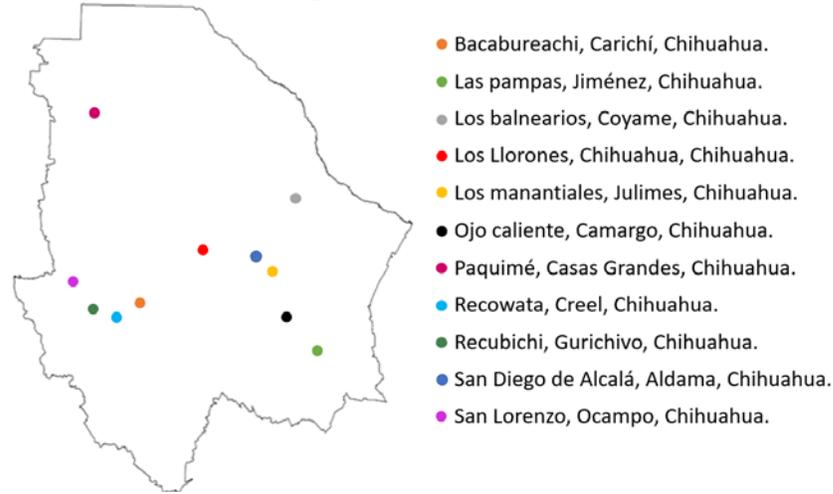
Zonas potenciales para la obtención de cianobacterias en Chihuahua

Como ya se mencionó anteriormente, las cianobacterias son parte de muchos ecosistemas, desde ambientes con altos índices de salinidad, aguas termales, hábitats marinos, de agua

dulce y hasta nieve, esto gracias a su evolución adaptativa (Harwood y Guschina, 2008; Shetty et al., 2019; Doney et al., 2012).

La implementación de estos microorganismos en aplicaciones biotecnológicas en procesos industriales, en especial de los resistentes a altas temperaturas, es muy utilizada debido a sus moléculas termoestables y su gran capacidad de adaptación al medio (Lasa y Berenguer, 1993; Patel et al., 2019; Shetty et al., 2019). Por lo que las zonas con un mayor potencial para localizar cianobacterias termofílicas son en los brotes de aguas termales. En el mapa 1 se muestran los principales brotes de aguas termales en el estado de Chihuahua.

Mapa 1. Principales brotes de aguas termales en el estado de Chihuahua



Fuente: Elaboración propia

Metodología

Para la búsqueda de cianobacterias con potencial biotecnológico se eligió el brote de aguas termales de San Diego de Alcalá, Aldama, Chihuahua, el cual está ubicado a 70 km al sureste de la ciudad de Chihuahua, con coordenadas geográficas 23°35'35.7" N 105°32'57.7" W y una altura de 1119 msnm. Su clima es desértico con una temperatura máxima de 43° C, media anual de 19.7° C y valores mínimos alrededor de 0° C; con precipitación media anual de 280.5 mm (SMN, 2021). Estas aguas son utilizadas para el riego agrícola y como balnearios turísticos (De la Maza Benignos et al., 2011).

Se tomaron dos tipos de muestras: las muestras bentónicas fueron recolectadas con una espátula de madera raspando la costra verde de las rocas que se encontraban dentro del cauce del agua termal, la que fue depositada en frascos de vidrio estériles con agua del mismo brote; y las muestras planctónicas fueron recolectadas mediante toma directa de los tapetes verdes que se encontraban flotando en el cauce del agua termal en frascos de vidrio estériles con agua del mismo brote (Heath et al., 2010). Dichas muestras se transportaron en bolsas térmicas para evitar un cambio brusco de temperatura (Andersen y Kawachi, 2005) y se ubicaron en el microalgario del Laboratorio de Orgánicos de la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, ubicado en el Campus 1 en Chihuahua, Chihuahua, México, con fotoperiodo controlado a 12 h luz y 12 h oscuridad, a temperatura ambiente, estáticas y en frasco cerrado. Además, se realizó *in situ* la

determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua termal, donde se midió la temperatura con un termómetro digital marca Avedistante modelo Bgd-1 y el pH con un potenciómetro marca PH modelo PH-Meter (Tenorio-García-Blásquez et al., 2018).

Simultáneamente al muestreo de las cianobacterias, se recolectó una muestra del agua termal, utilizando recipientes de plástico limpios de 6 L, previamente enjuagados con el agua del brote al momento de la toma y fueron enviadas al Laboratorio John Dalton de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, ubicado en el Campus 1 en Chihuahua, Chihuahua, México, para el análisis de los parámetros: nitritos y nitratos con base en la Norma Mexicana NMX-AA-082-1986 (SCFI, 1986), carbonatos y bicarbonatos con base en la Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001 (SE, 2001a), cobre y níquel con base en la Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001 (SE, 2001b), cloruros con base en la Norma Mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001 (SE, 2001c), sulfatos con base en la Norma Mexicana NMX-AA-074-SCFI-2014 (SE, 2014), sodio, potasio, calcio, zinc, plomo, hierro total y magnesio con base en la Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016 (SE, 2016) y fosfatos con base en el método del ácido ascórbico de Standard Methods 4500-P (APHA, 1998). Dichos parámetros se compararon con los límites máximos permisibles de la normatividad mexicana aplicable (Valles-Aragón, et al., 2017). Para el uso y consumo humano se tomó en cuenta la NOM-127-SSA1-1994 (SS, 2002) y el uso del agua para el riego agrícola la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales (CONAGUA, 2019).

Las cianobacterias se observaron en microscopio marca Omax modelo M83EZ-C02, utilizando los aumentos 10x y 40x. Se tomaron fotografías con la cámara digital del microscopio de color verdadero con una resolución de 640x480 pixeles.

Después de ser observadas en el microscopio, los microorganismos que presentaron características morfológicas de cianobacterias como el color, la forma, el tamaño de las células, la presencia o ausencia de filamentos, número de tricomas y la presencia, forma y tamaño de heterocistos (Pineda-Mendoza et al., 2011), fueron seleccionados para ser asilados mediante la técnica de medios de cultivo líquidos selectivos (Tenorio-García-Blásquez et al., 2018), para la cual se utilizaron los medios BG11 y BG11⁰ (Rippka et al., 1979), que son específicos para cianobacterias con la diferencia de que el segundo no contiene nitrógeno y solo las cianobacterias capaces de fijarlo se pueden desarrollar en este medio. Su composición se muestra en la tabla 1.

Las muestras con las cianobacterias seleccionadas se sonicaron por ultrasonido durante 5 min para su dispersión (Pestoni et al., 2020) en un baño de ultrasonido marca Branson modelo 5210, para después ser inoculada por separado en los medios de cultivo mencionados. Para ello se inocularon 2 ml de la muestra en fotobiorreactores adicionados con el medio de cultivo correspondiente, bajo dos condiciones distintas: 1) se utilizaron 400 ml de medio de cultivo manteniendo el volumen inicial mediante aforo cada cuarto día, aireación constante, fotoperiodo controlado de 12 h luz y 12 h oscuridad durante 20 días a temperatura ambiente; 2) se utilizaron 100 ml de medio de cultivo, fotoperiodo controlado de 12 h luz y 12 h oscuridad durante 20 días a temperatura ambiente sin aireación. Este proceso se repitió tres veces.

Tabla 1. Composición de los medios de cultivo BG11 y BG11⁰.

Compuesto	BG11 mg/L	BG11 ⁰ mg/L
MgSO ₄ •7H ₂ O	75	75
CaCl ₂ •2H ₂ O	36	36
Ácido cítrico	6	6
EDTA	1	1
NaNO ₃	15	-
NaCl	-	230
Na ₂ CO ₃	20	20
K ₂ HPO ₄ •3H ₂ O	40	40
Citrato férrico	6	6
H ₃ BO ₃	2.86	2.86
MnCl ₂ •4H ₂ O	1.81	1.81
ZnSO ₄ •7H ₂ O	0.22	0.22
Na ₂ MoO ₄ •2H ₂ O	0.39	0.39
CuSO ₄ •5H ₂ O	0.08	0.08
Co(NO ₃) ₂ •6H ₂ O	0.494	-
CoCl ₂	-	0.05

Fuente: Rippka et al., 1979

Después, las cianobacterias aisladas fueron observadas en el microscopio para su identificación morfológica, utilizando los esquemas taxonómicos de Komarek y Anagnostidis (1989), Aboal et al. (2012), Guamán-Burneo y González (2016) y Necchi, (2016).

Una vez identificadas las cianobacterias, se procedió a la determinación de los usos biotecnológicos mediante la búsqueda de las aplicaciones ya reportadas por diferentes investigadores utilizando distintas bases de datos.

Resultados

Características fisicoquímicas del agua termal

La temperatura del agua osciló entre los 41.4° y 46.4° C, el pH entre 6.89 y 7.21, y la conductividad eléctrica entre 3416 y 3512 µS/cm, por lo que este brote de agua termal se clasifica como aguas hipertermales ya que sobrepasan los 37° C (Armijo y San Martín, 1994), los valores del pH se encuentran dentro de los límites máximos permisibles para consumo humano que marca la NOM-127-SSA1-1994 (NOM-127), así como para uso agrícola que regula la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales (LFDDAMAN), y por su conductividad eléctrica se clasifica como agua de muy alta salinidad (Olías et al., 2005). En la tabla 2 se muestran los resultados del análisis de laboratorio del agua termal correspondiente a los parámetros químicos.

Tabla 2. Parámetros químicos del brote de agua termal de San Diego de Alcalá, Aldama, Chihuahua.

Parámetros	Valor mg/L	Límite máximo permisible por la Nom-127 mg/L	Límite máximo permisible por la LFDDAMAN mg/L
Carbonatos	0.9295	-	-
Bicarbonatos	277.94	-	-
Cloruros	188.32	250	150
Sulfatos	275.34	400	250
Nitritos	<0.1	0.05	-
Nitratos	0.2341	10	-
Fosfatos	0.1844	-	-
Sodio	280.88	200	-
Calcio	45.45	-	-
Zinc	<0.1	5	2
Plomo	<0.001	0.25	0.5
Fierro total	<0.1	0.3	5
Cobre	<0.1	2	0.2
Níquel	0.002	-	0.2
Magnesio	12.54	-	-

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados arrojados por el análisis de agua del Laboratorio John Dalton de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Los valores obtenidos de los parámetros medidos indican que los iones cloruros, sulfatos, nitritos, nitratos, zinc, plomo, fierro y cobre se encuentran dentro de los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994, por lo que estas aguas son aptas para el uso humano; sin embargo, el ion sodio sobrepasó el límite máximo permisible por dicha norma. De igual manera, los parámetros zinc, plomo, fierro, cobre y níquel se encuentran dentro de los límites máximos permisibles por la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales para el uso agrícola; en cambio, los iones cloruros y sulfatos sobrepasan los límites máximos permisibles por dicha ley.

La alcalinidad del agua es determinada por la presencia de carbonatos y bicarbonatos, que actúan como reguladores del pH (De Sousa et al., 2010), y cuando su contenido es mayor que el de calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio, el cual se puede neutralizar mediante el uso de ácidos para su uso agrícola (Castellón-Gómez et al., 2015).

Los iones calcio y magnesio son los principales causantes de la dureza del agua, y según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2008) los valores de la concentración de estos iones dependen de los consumidores y no se propone ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para la dureza del agua. Normalmente el valor del umbral gustativo del ion calcio se encuentra entre 100 y 300 mg/L, mientras que el del magnesio es menor que el del calcio (Solís-Castro et al., 2018).

Presencia de cianobacterias en el agua termal

Los resultados de este trabajo detectaron la presencia de cianobacterias en el brote de agua termal de San Diego de Alcalá, Aldama, Chihuahua, las cuales fueron ubicadas dentro de tres órdenes: Nostocales (Imagen 2a), Oscillatoriales (Imagen 2b) y Synechococcales (Imágenes 2c y 2d).

Imagen 2. Cianobacterias pertenecientes a los órdenes: a) Nostocales; b) Oscillatoriales; c) y d) Synechococcales.



Fuente: Elaboración propia

La ubicación de las cianobacterias dentro de los órdenes, se realizó al comparar las características morfológicas con las presentadas por Giannuzzi et al. (2017), quienes indicaron que el orden Nostocales lo comprenden cianobacterias filamentosas rectas, curvas o ligeramente espiraladas, no ramificadas o con falsas ramificaciones, células vegetativas esféricas o elípticas, con presencia de heterocistos y acinetos, en los que se incluyen géneros termófilos, registrado por Kannaujiya y Sinha (2017) similares a las encontradas en este trabajo. Cirés-Gómez y Quesada de Corral (2011) reportaron que el orden Oscillatoriales son cianobacterias filamentosas sin células diferenciadas como heterocistos o acinetos y tricomas solitarios cilíndricos generalmente curvados, las cuales presentan géneros termófilos (Berrini et al., 2004). Mientras que Dvořák et al. (2014) y Rasouli-Dogaheh et al. (2022) describieron al orden Synechococcales como cianobacterias unicelulares o filamentosas con arreglo tilacoidal parietal, pudiendo presentar células pequeñas, alargadas, cilíndricas o en forma de bastón, presentando también géneros resistentes a las altas temperaturas (Ramsing et al., 2000).

De la Maza Benignos et al. (2011) y De la Maza Benignos et al. (2014) realizaron estudios sobre la condición hidrológica y la biodiversidad en manantiales del desierto de Chihuahua, en San Diego de Alcalá y Julimes, respectivamente, siendo los primeros trabajos en los que se reportaron la presencia de cianobacterias en estas aguas termales, las cuales correspondieron a los órdenes Nostocales, Oscillatoriales, Chroococcales y Synechococcales.

Por lo que las cianobacterias encontradas en este estudio concuerdan con lo reportado en dichas investigaciones.

Aplicaciones biotecnológicas de las cianobacterias identificadas en las aguas termales de San Diego de Alcalá, Aldama, Chihuahua

Orden Nostocales

Algunas de las aplicaciones biotecnológicas de cianobacterias correspondientes al orden Nostocales se presentan en la tabla 3, entre las cuales se encuentra su uso en cultivo hidropónico de plantas (Bharti et al., 2019), como biofertilizantes (Martínez-Rosales et al., 2020), en combinación con fertilizantes químicos (Chittapun et al., 2018) y en la restauración de suelos (Park et al., 2017).

Tabla 3. Aplicaciones biotecnológicas de cianobacterias pertenecientes al orden Nostocales

Cianobacteria	Aplicaciones biotecnológicas	Fuente
<i>Anabaena laxa</i>	Cultivo hidropónico de plantas	Bharti et al. (2019)
<i>Anabaena sp.</i>	Biofertilizantes	Hernández-Reyes et al. (2019)
<i>Anabaena torulosa</i>	Cultivo hidropónico de plantas	Bharti et al. (2019)
<i>Fischerella TB22</i>	Biofertilizantes	Martínez-Rosales et al. (2020)
<i>Nostoc commune</i>	Biofertilizantes en combinación con fertilizantes químicos	Chittapun et al. (2018)
<i>Nostoc craneum</i>	Biofertilizantes en combinación con fertilizantes químicos	Chittapun et al. (2018)
<i>Nostoc sp.</i>	Restauración de suelos	Park et al. (2017)
<i>Scytonema arcangeli</i>	Restauración de suelos	Park et al. (2017)

Fuente: Elaboración propia con base en la literatura indicada.

Orden Oscillatoriales

Algunas de las aplicaciones biotecnológicas de cianobacterias correspondientes al orden Oscillatoriales se presentan en la tabla 4, entre las cuales se encuentra su uso como biofertilizantes (Dineshkumar et al., 2019), en la producción de extractos antivirales (Chen et al., 2016), la elaboración de alimentos para animales de crianza (Zaki et al., 2021) y de alimentos enriquecidos para humanos (Lucas et al., 2018), la restauración de suelos (Park et al., 2017), de cuerpos de agua (Ortiz-Villota et al., 2018) y la biodegradación de compuestos aceitosos (Decesaro et al., 2017).

Tabla 4. Aplicaciones biotecnológicas de cianobacterias pertenecientes al orden Oscillatoriales

Cianobacteria	Aplicaciones biotecnológicas	Fuente
<i>Arthrospira platensis</i>	Extractos antivirales, alimentos para animales de crianza, alimentos enriquecidos	Chen et al. (2016), Zaki et al. (2021), Uribe-Wandurraga et al. (2020)
<i>Arthrospira sp.</i>	Alimento para animales de crianza	Barraza-Guardado et al. (2019)
<i>Phormidium sp.</i>	Restauración de suelos	Park et al. (2017)
<i>Spirulina maxima</i>	Restauración de laguna eutrofizada	Ortiz-Villota et al. (2018)
<i>Spirulina platensis</i>	Biofertilizantes, extractos antivirales, biodegradación de compuestos aceitosos en suelos	Dineshkumar et al. (2019), Singab et al. (2018), Decesaro et al. (2017)
<i>Spirulina sp.</i>	Alimentos enriquecidos	Lucas et al. (2018)

Fuente: Elaboración propia con base en la literatura indicada.

Orden Synechococcales

Algunas de las aplicaciones biotecnológicas de cianobacterias correspondientes al orden Synechococcales se presentan en la tabla 5, entre las cuales se encuentra su uso como biofertilizantes (Maurya et al., 2016), en la producción de extractos antimicrobianos (Zada et al., 2018), la restauración de concreto (Zhu et al., 2015) y la producción de bioetanol (Kopka et al., 2017).

Tabla 5. Aplicaciones biotecnológicas de cianobacterias pertenecientes al orden Synechococcales

Cianobacteria	Aplicaciones biotecnológicas	Fuente
<i>Leptolyngbya</i> JSC-1	Extractos antimicrobianos	Zada et al. (2018)
<i>Leptolyngbya sp.</i>	Biofertilizantes	Hernández-Reyes et al. (2019)
<i>Lyngbya majuscula</i>	Biofertilizantes	Maurya et al. (2016)
<i>Synechococcus</i> PC7002	Producción de bioetanol	Kopka et al. (2017)
<i>Synechococcus</i> PC8806	Restauración de concreto	Zhu et al. (2015)

Fuente: Elaboración propia con base en la literatura indicada.

Conclusiones

En los brotes de aguas termales de San Diego de Alcalá, Aldama, Chihuahua, existen cianobacterias que pueden ser empleadas en el desarrollo de aplicaciones biotecnológicas, lo cual representa una alternativa viable para el desarrollo del campo chihuahuense, ya que estos microorganismos cuentan con enzimas y proteínas capaces de soportar las condiciones extremófilas de la región, por lo que no sería necesario realizar modificaciones en su genoma para que adquiriesen la facultad de sobrevivir en estos ambientes. Gracias a esto, constituyen

una fuente de biomoléculas que pueden promover el crecimiento de plantas, el acondicionamiento de suelos, la producción de medicamentos, alimentos y biocombustibles, lo que resulta en un importante hallazgo al constituirse como una posibilidad prometedora para reducir el uso excesivo de sustancias químicas en el campo.

Referencias

- Aboal, M. et al.**, (2012) *Id-Tax. Catálogo y claves de identificación de organismos fitoplanctónicos utilizados como elementos de calidad en las redes de control del estado ecológico*. Madrid, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Aguilera, A.; Echenique, R. y M. Hansen**, (2011) *Consideraciones generales de Cyanobacteria: aspectos ecológicos y taxonómicos*. Argentina, Serie: Temas de Salud Ambiental, 5.
- Almanza V. et al.**, (2016) *Guía para el estudio de Cianobacterias en el sistema lacustre del Gran Concepción: Aspectos ecológicos, toxicológicos, de controlvigilancia y taxonómicos*. Centro de Ciencias Ambientales, EULA-Chile, Trama Impresores.
- American Public Health Association (APHA)**, (1998) *APHA Method 4500-P: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Ascorbic Acid Method*. Washington, DC, USA, American Public Health Association, 115-116.
- Andersen, R. y M. Kawachi**, (2005) *Traditional Microalgae Isolation Techniques. Algal Culturing Techniques*. USA, Elsevier Academic Press.
- Anzures, M.; Gaytán, M. y E. Cuna**, (2021) "Algas extremófilas: estrategias de supervivencia y uso potencial" en *Biotecnología* vol. 25 No. 2, disponible en: <https://smbb.mx/wp-content/uploads/2021/09/Anzures-et-al.-2021-1.pdf>
- Armijo, M. y J. San Martín**, (1994) *Clasificación de las aguas mineromedicinales. Curas Balnearias y Climáticas. Talasoterapia y Helioterapia*. Madrid, España, Editorial Complutense, 219-223.
- Barraza-Guardado, R. et al.**, (2020) "Uso de microalgas como constituyentes parciales del alimento balanceado para engorda de tilapia (*Oreochromis niloticus*)" en *Biotecnia* Vol. 22 No. 1, 135-141, disponible en: <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1161>
- Barsanti, L. y P. Gualtieri**, (2014) *Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology*. Boca Ratón, USA. CRC press.
- Berrini, C. C. et al.**, (2004) "Morphological and molecular characterization of a thermophilic cyanobacterium (Oscillatoriales) from the Euganean Thermal Springs (Padua, Italy)" en *Algological Studies/Archiv für Hydrobiologie, Supplement Volumes*, No. 113, 73-85, disponible en: <https://doi.org/10.1127/1864-1318/2004/0113-0073>
- Bharti, A. et al.**, (2019) "Co-cultivation of cyanobacteria for raising nursery of chrysanthemum using a hydroponic system" en *Journal of Applied Phycology* Vol. 31 No. 6, 3625-3635, disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10811-019-01830-9>

- Biondi, N. et al.**, (2004) "Evaluation of *Nostoc* strain ATCC 53789 as a potential source of natural pesticides" en *Applied Environmental Microbiology* Vol. 70 No. 6, 3313-3320, disponible en: <https://doi.org/10.1128/AEM.70.6.3313-3320.2004>
- Brock, T.D.**, (2012) *Thermophilic microorganisms and life at high temperatures*. USA. Springer Science & Business Media.
- Campbell, E. L. et al.**, (2007) "Global gene expression patterns of *Nostoc punctiforme* in steady-state dinitrogen-grown heterocyst-containing cultures and at single time points during the differentiation of akinetes and hormogonia" en *Journal of Bacteriology* Vol. 189 No. 14, 5247-5256, disponible en: <https://doi.org/10.1128/JB.00360-07>
- Castellón-Gómez, J. J.; Bernal-Muñoz, R., y M. D. L. Hernández-Rodríguez**, (2015) "Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala" en *Ingeniería* Vol. 19 No. 1, 39-50, disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750924004.pdf>
- Chen, Y. H. et al.**, (2016) "Well-tolerated Spirulina extract inhibits influenza virus replication and reduces virus-induced mortality" en *Scientific Reports* Vol. 6 No. 1, 1-11, disponible en: <https://doi.org/10.1038/srep24253>
- Chittapun, S. et al.**, (2018) "Effects of using cyanobacteria and fertilizer on growth and yield of rice, Pathum Thani I: a pot experiment" en *Journal of Applied Phycology* Vol. 30 No. 1, 79-85, disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1138-y>
- Cirés-Gómez, S. y A. Quesada de Corral**, (2011) *Catálogo de cianobacterias planctónicas potencialmente tóxicas de las aguas continentales españolas*. España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)**, (2019) "Ley Federal de Derechos. Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2019" en *Comisión Nacional del Agua*. [En línea]. Ciudad de México, disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/CGRF-1-19%20LFD.pdf>
- Covarrubias, Y. et al.**, (2016) "Thermophile mats of microalgae growing on the woody structure of a cooling tower of a thermoelectric power plant in Central Mexico" en *Revista Mexicana de Biodiversidad* Vol. 87 No. 2, 277-287, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.04.001>
- De la Maza-Benignos, M. et al.**, (2011) *Consideraciones Biológicas y físico-hidrológicas para facilitar la conservación de la zona de manantiales de San Diego de Alcalá, Mpio. De Aldama, Chih.* World Wide Fund for Nature y Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, disponible en: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3006.2961>
- De la Maza-Benignos, M. et al.**, (2014) *Conservation of desert wetlands and their biotas/conservación de humedales desérticos y su biota*. Museum of Southwestern Biology, Pronatura Noreste y Universidad Autónoma de Nuevo León Vol. 1.
- De Sousa, C.; Correia, A. y M. C. Colmenares**, (2010) "Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control" en

Boletín de Malariología y Salud Ambiental Vol. 50 No. 2, 187-196, disponible en:
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1690-46482010000200003

Decesaro, A. et al., (2017) "Bioremediation of soil contaminated with diesel and biodiesel fuel using biostimulation with microalgae biomass" en *Journal of Environmental Engineering* Vol. 143 No. 4, 04016091, disponible en:
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001165](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001165)

Dineshkumar, R. et al., (2019) "The impact of using microalgae as biofertilizer in maize (*Zea mays* L.)" en *Waste and Biomass Valorization* Vol. 10 No. 5, 1101-1110, disponible en:
<https://doi.org/10.1007/s12649-017-0123-7>

Doney, S. C. et al., (2012) "Climate change impacts on marine ecosystems" en *Annual Review of Marine Science* Vol. 4, 11-37, disponible en: <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611>

Dvořák, P. et al., (2014) "Morphological and molecular studies of *Neosynechococcus sphagnicola*, gen. et sp. nov. (Cyanobacteria, Synechococcales)" en *Phytotaxa* Vol. 170 No. 1, 24-34, disponible en: <http://dx.doi.org/10.11646/phytotaxa.170.1.3>

García-Romeral, J. et al., (2017) "Principios de Biotecnología y Bioingeniería en el cultivo de microalgas: importancia, problemas tecnológicos, tipos y sistemas de cultivos, crecimiento, factores limitantes, selección, aislamiento, escalado y caracterización bioquímica" en *Nereis* No. 9, 115-130, disponible en:
<https://108.128.142.30/handle/20.500.12466/234>

Giannuzzi, L. et al., (2017) *Cianobacterias como determinantes ambientales de la salud*. Argentina. Ministerio de Salud de la Nación.

Guamán-Burneo, M. y R. González, (2016) *Catálogo de microalgas y cianobacterias de agua dulce del Ecuador*. Ecuador. Corporación para la investigación Energética.

Harwood, J. L. y I. A. Guschina, (2009) "The versatility of algae and their lipid metabolism" en *Biochimie* Vol. 91 No. 6, 679-684, disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.biochi.2008.11.004>

Heath, M.; Wood, S. y K. Ryan, (2010) "Polyphasic assessment of fresh-water benthic mat-forming cyanobacteria isolated from New Zealand" en *FEMS Microbiology Ecology* Vol. 73 No. 1, 95-109, disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00867.x>

Hernández-Reyes, B. et al., (2019) "Uso potencial de cianobacterias como biofertilizante para el cultivo de maíz azul en la Ciudad de México" en *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal* Vol. 10 No. 1, 13-27, disponible en:
https://www.researchgate.net/profile/Monica-Cristina-Rodriguez-Palacio/publication/333458447_Uso_potencial_de_cianobacterias_como_biofertilizante_para_el_cultivo_de_maiz_azul_en_la_Ciudad_de_Mexico/links/5cef2367a6fdcc8475f64e85/Uso-potencial-de-cianobacterias-como-biofertilizante-para-el-cultivo-de-maiz-azul-en-la-Ciudad-de-Mexico.pdf

Herrero, A. et al., (2004) "Cellular differentiation and the NtcA transcription factor in filamentous cyanobacteria" en *FEMS Microbiology Reviews* Vol. 28 No. 4, 469-487, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2004.04.003>

- Joshi, H.; Shourie, A. y A. Singh,** (2020) "Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture" en *Advances in Cyanobacterial Biology*, Academic Press, 385-396, disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819311-2.00025-5>
- Kannaujiya, V. K. y R. P. Sinha,** (2017) "Impacts of diurnal variation of ultraviolet-B and photosynthetically active radiation on phycobiliproteins of the hot-spring cyanobacterium *Nostoc* sp. strain HKAR-2" en *Protoplasma* Vol. 254 No. 1, 423-433, disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00709-016-0964-0>
- Kaplan-Levy, R. N. et al.,** (2010) "Akinetes: dormant cells of cyanobacteria" en *Dormancy and Resistance in Harsh Environments*. Berlín. Springer. 5-27, disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12422-8_2
- Khan, M. I.; Shin, J. H. y J.D. Kim,** (2018) "The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products" en *Microbial Cell Factories* Vol. 17 No. 1, 1-21, disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>
- Kholssi, R. et al.,** (2021) "A consortium of cyanobacteria and plant growth promoting rhizobacteria for wheat growth improvement in a hydroponic system" en *South African Journal of Botany* Vol. 142, 247-258, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.06.035>
- Koffi, K.T.; Kumar, S. y D. H. Sur,** (2018) "Extraction of plant nutrients from freshwater algae and their role in sustainable agriculture" en *International Journal of Current Biotechnology* Vol. 6 No. 4, 1-8, disponible en: http://ijcb.mainspringer.com/6_4/cb604001.pdf
- Komarek, J. y K. Anagnostidis,** (1989) "Modern approach to the classification system of Cyanophytes 4-Nostocales" en *Archiv für Hydrobiologie. Supplementband. Monographische Beiträge* Vol. 82 No. 3, 247-345.
- Kopka, J. et al.,** (2017) "Systems analysis of ethanol production in the genetically engineered cyanobacterium *Synechococcus* sp. PCC 7002" en *Biotechnology for Biofuels* Vol. 10 No. 1, 1-21, disponible en: <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0741-0>
- Kumar, K.; Mella-Herrera, R. A. y J. W. Golden,** (2010) "Cyanobacterial heterocysts" en *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* Vol. 2 No. 4, a000315, disponible en: <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a000315>
- Lasa, I. y J. Berenguer,** (1993) "Thermophilic enzymes and their biotechnological potential" en *Microbiología* Vol. 9 No. 2, 77-89, disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Ewa-Przybos-2/publication/15982700_Distribution_of_species_of_the_Paramecium_aurelia_complex_in_Spain/links/54e5a2b20cf29865c337536a/Distribution-of-species-of-the-Paramecium-aurelia-complex-in-Spain.pdf#page=9
- López-Padrón, I. et al.,** (2020) "Las algas y sus usos en la agricultura. Una visión actualizada" en *Cultivos Tropicales* Vol. 41 No. 2, disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362020000200010

- López-Sandoval, O. et al.**, (2016) “Diversidad algal de un ambiente extremo: el manantial geotermal Los Hervideros, México” en *Revista Mexicana de Biodiversidad* Vol. 87 No. 1, 1-9, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.01.004>
- Lucas, B. et al.**, (2018) “*Spirulina* for snack enrichment: Nutritional, physical and sensory evaluations” en *LWT* Vol. 90, 270-276, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.032>
- Manjunath, M. et al.**, (2011) “Developing PGPR consortia using novel genera *Providencia* and *Alcaligenes* along with cyanobacteria for wheat” en *Archives of Agronomy and Soil Science* Vol. 57 No. 8, 873-887, disponible en: <https://doi.org/10.1080/03650340.2010.499902>
- Martínez-Rosales, A.; Trujillo-Tapia, M. y E. Ramírez-Fuentes**, (2020) “Crecimiento y metabolismo de *Fischerella TB22* en medio de cultivo BG110” en *Boletín Micológico* Vol. 35 No. 1, disponible en: <https://doi.org/10.22370/bolmicol.2020.35.1.2425>
- Maurya, R. et al.**, (2016) “Lipid extracted microalgal biomass residue as a fertilizer substitute for *Zea mays* L.” en *Frontiers in plant science* Vol. 6, 1266, disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01266>
- Mayz-Figueroa, J.** (2004) “Fijación biológica de nitrógeno” en *Revista Científica UDO Agrícola* Vol. 4 No. 1, 1-20, disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2221548>
- Mullineaux, C. W. et al.**, (2008) “Mechanism of intercellular molecular exchange in heterocyst-forming cyanobacteria” en *The EMBO journal* Vol. 27 No. 9, 1299-1308, disponible en: <https://doi.org/10.1038/emboj.2008.66>
- Necchi, O.** (ed.). (2016) *River algae*. Suiza. Springer, disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31984-1>
- Okolodkov, Y. y R. Blanco-Pérez**, (2011) “Diversidad de microalgas marinas y de aguas salobres” en *La biodiversidad en Veracruz: Estudio de Estado* Vol. 2, disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Yuri-Okolodkov/publication/234077141_Diversidad_de_microalgas_marinas_y_de_aguas_salobres/links/02bfe50ee075b09e50000000/Diversidad-de-microalgas-marinas-y-de-aguas-salobres.pdf
- Olías, M.; Cerón, J. C. y I. Fernández**, (2005) “Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del US Laboratory Salinity (USLS)” en *Geogaceta* Vol. 37 No.3, disponible en: <https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/Geo37/Geo37-28.pdf>
- Oliva-Martínez, M.; Godínez-Ortega, J. y C. Zúñiga-Ramos**, (2014) “Biodiversidad del fitoplancton de aguas continentales en México” en *Revista Mexicana de Biodiversidad* Vol. 8, 54-61, disponible en: <https://doi.org/10.7550/rmb.32706>
- Ortiz-Villota, M.; Romero-Morales, M. y L. Meza-Rodríguez**, (2018) “La biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia” en *Revista de Investigación Desarrollo e Innovación* Vol. 9 No. 1, 163-176, disponible en: <https://doi.org/10.19053/20278306.v9.n1.2018.8153>

- Park, C. et al.**, (2017) "Rapid development of cyanobacterial crust in the field for combating desertification" en *PLoS One* Vol. 12 No. 6, e0179903, disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179903>
- Patel, A. et al.**, (2019) "A perspective on biotechnological applications of thermophilic microalgae and cyanobacteria" en *Bioresource Technology* Vol. 278, 424-434, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.063>
- Pérez-Madruga, Y.; López-Padrón, I., y Y. Reyes-Guerrero**, (2020) "Las Algas como alternativa natural para la producción de diferentes cultivos" en *Cultivos Tropicales* Vol. 41 No. 2, disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362020000200009&script=sci_arttext&tlng=pt
- Pestoni, S. et al.**, (2020) "Influencia del método de dispersión en el fraccionamiento físico de un suelo de Argentina central" en *Ciencia del suelo* Vol. 38 No. 1, 187-191, disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672020000100016&script=sci_arttext&tlng=en
- Pineda-Mendoza, R. et al.**, (2011) Caracterización morfológica y molecular de cianobacterias filamentosas aisladas de florecimientos de tres lagos urbanos eutróficos de la ciudad de México" en *Polibotánica* No. 31, 31-50, disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-27682011000100003&script=sci_abstract&tlng=pt
- Rai, A. N.; Bergman, B. y U. Rasmussen** (eds.), (2002) *Cyanobacteria in symbiosis*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Ramsing, N. B.; Ferris, M. J. y D. M. Ward**, (2000) "Highly ordered vertical structure of *Synechococcus* populations within the one-millimeter-thick photic zone of a hot spring cyanobacterial mat" en *Applied and Environmental Microbiology* Vol. 66 No. 3, 1038-1049, disponible en: <https://doi.org/10.1128/AEM.66.3.1038-1049.2000>
- Rasouli-Dogaheh, S. et al.**, (2022) "*Thainema* gen. nov. (Leptolyngbyaceae, Synechococcales): A new genus of simple trichal cyanobacteria isolated from a solar saltern environment in Thailand" en *PloS one* Vol. 17 No. 1, e0261682, disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261682>
- Righini, H. et al.**, (2022) "Cyanobacteria: A Natural Source for Controlling Agricultural Plant Diseases Caused by Fungi and Oomycetes and Improving Plant Growth" en *Horticulturae* Vol. 8 No. 1, 58, disponible en: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010058>
- Rippka, R. et al.**, (1979) "Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria" en *Microbiology* Vol. 111 No. 1, 1-61, disponible en: <https://doi.org/10.1099/00221287-111-1-1>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI)**, (1986) "Norma Mexicana NMX-AA-082-1986. Contaminación del agua-Determinación de nitrógeno de nitrato-Método espectrofotométrico ultravioleta" en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. México, disponible en: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa082.pdf>

- Secretaría de Economía (SE)**, (2001a) “Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba” en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. México, disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166776/NMX-AA-036-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Economía (SE)**, (2001b) “Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba” en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. México, disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166785/NMX-AA-051-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Economía (SE)**, (2001c) “Norma Mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba” en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. México, disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Economía (SE)**, (2014) “Norma Mexicana NMX-AA-074-SCFI-2014. Análisis de agua-Medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba” en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. México, disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166149/nmx-aa-074-scfi-2014.pdf>
- Secretaría de Economía (SE)**, (2016) “Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016. Análisis de agua-Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba” en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. México, disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5464459&fecha=07/12/2016#sc.tab=0
- Secretaría de Salud (SS)**, (2002) “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización” en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. México, disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969#sc.tab=0
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)**, (2021) “Normales Climatológicas por Estado: Chihuahua” en *Comisión Nacional del Agua*. [En línea]. México, disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chih>
- Shetty, P.; Gitau, M. M. y G. Maróti**, (2019) “Salinity stress responses and adaptation mechanisms in eukaryotic green microalgae” en *Cells* Vol. 8 No.12, 1657, disponible en: <https://doi.org/10.3390/cells8121657>
- Singab, A. N. et al.**, (2018) “Antiviral, cytotoxic, antioxidant and anti-cholinesterase activities of polysaccharides isolated from microalgae *Spirulina platensis*, *Scenedesmus obliquus*

- and *Dunaliella salina*” en *Archives of Pharmaceutical Sciences Ain Shams University* Vol. 2 No. 2, 121-137, disponible en: <https://dx.doi.org/10.21608/aps.2018.18740>
- Singh, J. y R. C. Saxena**, (2015) “An introduction to microalgae: diversity and significance” en *Handbook of Marine Microalgae* (pp. 11-24). Amsterdam, Academic Press. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00002-9>
- Singleton Jr, R. y R. E. Amelunxen**, (1973) “Proteins from thermophilic microorganisms” en *Bacteriological Reviews* Vol. 37 No. 3, 320-342, disponible en: <https://journals.asm.org/doi/pdf/10.1128/br.37.3.320-342.1973>
- Solís-Castro, Y.; Zúñiga-Zúñiga, L. A. y D. Mora-Alvarado**, (2018) “La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica” en *Revista Tecnología en Marcha* Vol. 31 No. 1, 35-46, disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822018000100035&script=sci_arttext
- Stal, L. J.**, (2017) “The effect of oxygen concentration and temperature on nitrogenase activity in the heterocystous cyanobacterium *Fischerella* sp.” en *Scientific Reports* Vol. 7 No. 1, 1-10, disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05715-0>
- Tenorio-García-Blásquez, L.; Hernández-Acevedo, H. y M. Aguirre-Obregón**, (2018) *Manual para obtención de cepas de microalgas*. Perú, Instituto del Mar del Perú, Informe, Volumen 45, Número 2. 277-291.
- Thajuddin, N. y G. Subramanian**, (2005) “Cyanobacterial biodiversity and potential applications in biotechnology” en *Current Science* Vol. 89 No. 1, 47-57, disponible en: <https://www.jstor.org/stable/24110431>
- Uribe-Wandurraga, Z. N. et al.**, (2020) “Printability and physicochemical properties of microalgae-enriched 3D-printed snacks” en *Food and Bioprocess Technology* Vol. 13 No. 11, 2029-2042, disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02544-4>
- Valles-Aragón, M. C. et al.**, (2017) “Calidad del agua para riego en una zona nogalera del Estado de Chihuahua” en *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* Vol. 33 No. 1, 85-97, disponible en: <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.08>
- Walsby, A. E.**, (1985) “The permeability of heterocysts to the gases nitrogen and oxygen” en *Proceedings of the Royal society of London. Series B. Biological Sciences* Vol. 226 No. 1244, 345-366, disponible en: <https://doi.org/10.1098/rspb.1985.0099>
- Waterbury, J. B.**, (2006) “The cyanobacteria— isolation, purification and identification” en *The prokaryotes* Vol. 4, 1053-1073, disponible en: https://doi.org/10.1007/0-387-30744-3_38
- Wolk, C. P.; Ernst, A. y J. Elhai**, (1994) “Heterocyst metabolism and development” en *The molecular biology of cyanobacteria* (pp. 769-823). Dordrecht, Springer.
- World Health Organization (OMS)**, (2008) *Guidelines for drinking-water quality 3rd ed. (Vol. 1)*. World Health Organization, disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547611>

- Zada, S. et al.**, (2018) “Biogenic synthesis of silver nanoparticles using extracts of *Leptolyngbya* JSC-1 that induce apoptosis in HeLa cell line and exterminate pathogenic bacteria” en *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology* Vol. 46 No. sup3, S471-S480, disponible en: <https://doi.org/10.1080/21691401.2018.1499663>
- Zaki, M. et al.**, (2021) “Potential Applications of native cyanobacterium isolate (*Arthrospira platensis* NIOF17/003) for biodiesel production and utilization of its byproduct in marine rotifer (*Brachionus plicatilis*) production” en *Sustainability* Vol. 13 No. 4, 1769, disponible en: <https://doi.org/10.3390/su13041769>
- Zhu, T. et al.**, (2015) “Potential application of biomineralization by *Synechococcus* PCC8806 for concrete restoration” en *Ecological Engineering* Vol. 82, 459-468, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.017>