



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Facultad de Estudios Superiores Iztacala**  
Carrera de Biología

**Caracterización morfológica y molecular de algunas  
cepas nostocoides aisladas de la zona central de México**

TESIS

para obtener el título de  
**BIÓLOGO**

**Presenta**

Luis Fernando Miguel Solorza

31506748-6



**Director**

M. en C. Gloria Garduño Solórzano

Laboratorio de Ficología

Los Reyes Iztacala , Tlalnepanitla, Estado de México, 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Becario del proyecto CONACYT 316016

**Evaluación de un herbicida a partir de cianobacterias (aleloquímicos) como alternativa de control y manejo de arvenses**

Convocatoria 2021-1

**Desarrollo de innovaciones tecnológicas para una agricultura mexicana libre de agroinsumos tóxicos “Programas Nacionales Estratégicos de Ciencia, Tecnología y Vinculación con los Sectores Social, Público y Privado” F003**

## RECONOCIMIENTOS

A la M. en C. Gloria Garduño Solórzano

por su dirección de la tesis y haberme confiado un espacio, los instrumentos y el material biológico necesario para el desarrollo de esta investigación; así como por su extrema paciencia a mis contratiempos y excentricismos.

A el Dr. Nutan Prasad Rout

por su codirección de la tesis y ser miembro del sínodo para obtener el título de Biólogo. Además de permitirme reforzar lo aprendido a lo largo de la licenciatura colaborando con él en la Unidad de Biotecnología del Centro de Investigación y Asistencia Tecnológica y Diseño del Estado de Jalisco.

A la Dra. Martha Martínez García

por sus valiosas sugerencias académicas como miembro de sínodo del proceso de titulación. Así como, acompañarnos durante nuestros recorridos en campo y así enseñarme a desarrollarme en un ambiente de cooperación multidisciplinario.

Al Dr. Hugo Virgilio Perales Vela

por la revisión académica de este informe final de mi trabajo como parte de los sinodales del mismo. Además de esa emoción e interés demostrado para con los resultados de este.

Al Dr. Jorge Eduardo Campos Contreras

por sus importantes observaciones del informe final de mi trabajo de tesis en licenciatura y como parte de los sinodales del mismo.

## AGRADECIMIENTOS

A el MC. Ramon David Miguel Gómez

por ser el más grande patrocinador de mi carrera y de mi vida;  
quien *sin querer queriendo* ha financiado esta tesis casi en su  
totalidad.

A la TEL. Rosario Solorza Guzmán

quien ha dedicado su vida a enseñarme (y reenseñarme) las  
competencias necesarias para llegar a ser la persona que soy  
el día de hoy.

A el Dr. Cristian Alberto Espinosa Rodríguez

por facilitarme el uso del Microscopio de Contraste de Fases del  
Laboratorio de Limnología.

A la Escuela Nacional Preparatoria y a la Universidad

por haberme preparado para los desafíos venideros en mi  
desarrollo profesional. Pero sobre todo a el pueblo mexicano,  
que de alguna manera se ha encargado de defender los ideales  
universitarios por y para el bien de la nación.

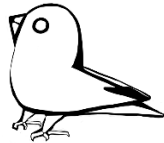


***Seaweed***

Edite Melo  
2010

A Orión, a Azul y a el Mishiocano

cada uno un constante recuerdo de lo que soy y de quienes amo; reminiscencias de aquello que un día fue, lo que es y de aquello que seguirá siendo (aun cuando nunca llego a ser)



## CONTENIDO

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>9</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>11</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>
1.1 <i>Material biológico.</i> .....	20
2.1 <i>Cultivos.</i> .....	20
2.2 <i>Caracterización taxonómica del material mexicano.</i> .....	20
2.3 <i>Caracterización molecular de cianobacterias mexicanas.</i> .....	21
2.4 <i>Caracterización filogenética del material mexicano.</i> .....	21
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>22</b>
1.1 <i>Nostoc, México.</i> .....	22
2.0 <i>Cianobacterias nostocoides mexicanas cultivadas.</i> .....	22
Nostoc sp <sub>1</sub> . F02.....	27
Nostoc sp <sub>2</sub> . Glo-01-Ver .....	35
Nostoc sp <sub>3</sub> . POlza6.0 .....	41
<b>CONCLUSIÓN</b> .....	<b>48</b>
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	<b>49</b>
<b>SUPLEMENTOS</b> .....	<b>65</b>
S.1 <i>Caracterización morfométrica.</i> .....	65
S. 2 <i>Caracterización filogenómica.</i> .....	68
S. 3 <i>Análisis de evidencia total.</i> .....	70
S. 4 <i>Morfometría de las cianobacterias nostocoides.</i> .....	72
S. 5 <i>Filogenética entre las cianobacterias nostocoides.</i> .....	77
S. 6 <i>Taxonomía del complejo Nostoc-like.</i> .....	79
<b>APENDICE A</b> .....	<b>83</b>
<b>APENDICE B</b> .....	<b>85</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 ESQUEMA DEL CICLO DE VIDA DE <i>NOSTOC MUSCORUM</i> .....	14
FIGURA 2. ESQUEMA DEL CICLO DE VIDA DE <i>NOSTOC MICROSCOPICUM</i> .....	15
FIGURA 3. ESQUEMA DEL CICLO DE VIDA DE <i>NOSTOC SPHAERICUM</i> .....	16
FIGURA 4. BODEGÓN COMPUESTO DE CINCO ESPECIES DE <i>NOSTOC</i> EN PROPORCIÓN A UN FRUTO TROPICAL	17
FIGURA 5. ANÁLISIS DE MÁXIMA POSIBILIDAD DE LAS SECUENCIAS ARNR 16S OBTENIDAS A PARTIR DE LAS CEPAS AQUÍ ESTUDIADAS Y DE LAS SECUENCIAS DE LA <i>NOSTOC-LIKE</i> TAXA ALINEADAS MEDIANTE UN CLUSTALW Y CON UN RECORTE A $\approx 797$ PB. ....	24
FIGURA 6. ANÁLISIS DE EVIDENCIA TOTAL DE LA <i>NOSTOC-LIKE</i> TAXA INCLUYENDO LOS CARACTERES RECOPIADOS PARA LAS CEPAS MEXICANAS. EL ÁRBOL PARTE DE <i>COMPACTONOSTOC</i> <i>SHENNONGJIAENSIS</i> .....	25
FIGURA 7. ANÁLISIS DE EVIDENCIA TOTAL DE LA <i>NOSTOC-LIKE</i> TAXA INCLUYENDO LOS CARACTERES RECOPIADOS PARA LA <i>NOSTOC-LIKE</i> TAXA MEXICANA. EL ÁRBOL PARTE DE <i>DENDRONALIUM</i> <i>PHYLLOSPHERYCUM</i> .....	26
FIGURA 8. <i>NOSTOC</i> SP <sub>1</sub> . F02. ASPECTO GENERAL DEL TALO MACROSCÓPICO Y CORTE LONGITUDINAL.....	27
FIGURA 9. MICROGRAFÍAS DE <i>NOSTOC</i> SP <sub>1</sub> . F02.....	28
FIGURA 10. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE <i>NOSTOC</i> SP <sub>1</sub> . F02.....	29
FIGURA 11. CRECIMIENTO MACROSCÓPICO EN POBLACIONES SILVESTRES DE <i>NOSTOC</i> SP <sub>1</sub> . F02.....	29
FIGURA 12. SITIO DE RECOLECTA DE <i>NOSTOC</i> SP <sub>1</sub> . F02. ....	30
FIGURA 13. ÁRBOL FILOGENÉTICO DEL ANÁLISIS DE MÁXIMA POSIBILIDAD DE LA SECUENCIA DE F02. ....	31
FIGURA 14. ACERCAMIENTO A F02 EN EL UN ANÁLISIS DE EVIDENCIA TOTAL QUE CONSIDERA A <i>DENDRONALIUM PHYLLOSPHERYCUM</i> COMO TAXA ANCESTRAL .....	32
FIGURA 15. ASPECTO GENERAL DEL TALO MACROSCÓPICO <i>NOSTOC</i> SP <sub>2</sub> . GLO-01-VER .....	35
FIGURA 16. MICROGRAFÍAS DE <i>NOSTOC</i> SP <sub>2</sub> . GLO-01-VER. ....	36
FIGURA 17. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CASCADA DE TEXOLO. ....	37
FIGURA 18. ÁRBOL FILOGENÉTICO DEL ANÁLISIS DE MÁXIMA POSIBILIDAD DE LA SECUENCIA DIRECTA DE GLO- 01-VER. ....	38
FIGURA 19. ACERCAMIENTO A GLO-01-VER EN UN ANÁLISIS DE EVIDENCIA TOTAL QUE CONSIDERA A <i>DENDRONALIUM PHYLLOSPHERYCUM</i> COMO TAXA ANCESTRAL. ....	39
FIGURA 20. ASPECTO GENERAL DEL TALO MACROSCÓPICO DE <i>NOSTOC</i> SP <sub>3</sub> . POIZTA6.0.....	41
FIGURA 21. MICROGRAFÍAS DE <i>NOSTOC</i> SP <sub>3</sub> . POIZTA6.0. ....	42
FIGURA 22. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE <i>NOSTOC</i> SP <sub>3</sub> . POIZTA 6.0. ....	43
FIGURA 23. ÁRBOL FILOGENÉTICO DEL ANÁLISIS DE MÁXIMA POSIBILIDAD DE LA SECUENCIA DIRECTA DE POIZTA 6.0.....	44
FIGURA 24. ACERCAMIENTO A POIZTA 6.0 EN UN ANÁLISIS DE EVIDENCIA TOTAL QUE CONSIDERA A <i>DENDRONALIUM PHYLLOSPHERYCUM</i> COMO TAXA ANCESTRAL. ....	45

FIGURA S1. HISTOGRAMA DEL NÚMERO DE ESPECIES EN LOS GÉNEROS QUE CONFORMAN LA <i>NOSTOC</i> -LIKE TAXA.....	71
FIGURA S2. GRÁFICOS DE CAJA Y BIGOTES DE EL VOLUMEN RELATIVO DE LAS CÉLULAS VEGETATIVAS, LOS HETEROCITOS Y LOS ACINETOS Y SUS PROPORCIONES ENTRE LAS ESPECIES DE <i>NOSTOC</i> ENLISTADAS EN LAS TABLAS S2 Y S3. ....	73
FIGURA S3. ANÁLISIS DE MÁXIMA PARSIMONIA DE LA MATRIZ DE CARACTERES MORFOMÉTRICOS DE LA <i>NOSTOC</i> -LIKE TAXA.....	74
FIGURA S4. ANÁLISIS DE MÁXIMA PARSIMONIA DE LA MATRIZ DE CARACTERES MORFOMÉTRICOS DE LAS ESPECIES DE <i>NOSTOC</i> EN LA FLORA DE AGUA DULCE DE EUROPA CENTRAL .....	75
FIGURA S5. ANÁLISIS DE MÁXIMA PARSIMONIA DE LA MATRIZ DE CARACTERES MORFOMÉTRICOS DE LA <i>NOSTOC</i> -LIKE TAXA Y LAS ESPECIES DE <i>NOSTOC</i> EN LA FLORA DE AGUA DULCE DE EUROPA CENTRAL ..	76
FIGURA S6. MÁXIMA POSIBILIDAD ENTRE LAS SECUENCIAS ARNR 16S DE LA <i>NOSTOC</i> -LIKE TAXA. ....	77
FIGURA S7. CONSENSO ESTRICTO DE LA MÁXIMA PARSIMONIA ENTRE LAS SECUENCIAS ARNR 16S DE LA <i>NOSTOC</i> -LIKE TAXA.....	78
FIGURA S8. UNIÓN DE VECINOS ENTRE LAS SECUENCIAS ARNR 16S DE LA <i>NOSTOC</i> -LIKE TAXA .....	78
FIGURA S9. ANÁLISIS DE EVIDENCIA TOTAL DE LA <i>NOSTOC</i> -LIKE TAXA PARTIENDO DE <i>COMPACTONOSTOC SHENNONGJIAENSIS</i> .....	80
FIGURA S10. ANÁLISIS DE EVIDENCIA TOTAL DE LA <i>NOSTOC</i> -LIKE TAXA PARTIENDO DE <i>DENDRONALIUM PHYLLOSPHERYCUM</i> .....	81
FIGURA S11. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS QUE ILUSTRA LA DIVERSIDAD TAXONÓMICA ESPERADA CONSIDERANDO LA ESTIMACIÓN DE 21 CLADOS. ....	82
FIGURA S12. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS QUE ILUSTRA LA DIVERSIDAD TAXONÓMICA ESPERADA CONSIDERANDO LA ESTIMACIÓN DE 18 CLADOS. ....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA S1. MATRIZ DE CARACTERES MORFOLÓGICOS CONSIDERADOS PARA DESCRIBIR LA TAXA <i>NOSTOC</i> -LIKE .....	65
TABLA S2. DESCRIPCIONES MORFOMÉTRICAS PARA CADA ESPECIE DE <i>NOSTOC</i> -LIKE TAXA.....	66
TABLA S3. DESCRIPCIONES MORFOMÉTRICAS DE LAS ESPECIES DE <i>NOSTOC</i> MENCIONADAS EN LA FLORA DE AGUA DULCE DE EUROPA CENTRAL .....	67
TABLA S4. LISTA DE LOS NÚMERO DE ACCESO EN EL NCBI PARA CONSULTAR LAS SECUENCIAS DE: <i>NOSTOC</i> , <i>MOJAVIA</i> , <i>DESMONOSTOC</i> , <i>HALOTIA</i> , <i>ALIINOSTOC</i> , <i>KOMAREKIELLA</i> , <i>COMPACTONOSTOC</i> , <i>DESIKACHARYA</i> , <i>MINUNOSTOC</i> , <i>PARAKOMAREKIELLA</i> , <i>PURPURENOSTOC</i> , <i>VIOLETONOSTOC</i> , <i>PSEUDOALIINOSTOC</i> , <i>AMAZONOCRINIS</i> , <i>ATLANTICOTHRIX</i> Y <i>DENDRONALIUM</i> .....	68
TABLA S5. SECUENCIAS DE LOS TAXONES FILOGENÉTICOS RELACIONADOS CON EL GÉNERO <i>NOSTOC</i> . ....	69
TABLA S6. CÓDIGO DE COLORES PARA CADA UNO DE LOS TIPOS CORRESPONDIENTES AL COMPLEJO <i>NOSTOC</i> -LIKE.....	70

## ABSTRACT

The nostocacean cyanobacteria are photosynthetic and diazotrophic organisms that share a filamentous beaded morphology. They are easy to find as components of a microbiotic crust or included among a lichen. The genus *Nostoc* has a wide distribution and is initially recognized based on morphological characters. Thus, numerous populations have been reported due to their nostocoid appearance that are now recognized as new genera in science. In this work we sought to taxonomically determine some nostocoid cyanobacteria isolated from the Trans-Mexican Volcanic Belt, based on their morphological, ecological and molecular characters. The methodology was developed in three phases: cabinet, phycological scouting and laboratory work. The cabinet's investigation is included in the supplementary section. The similarity between nostocacean cyanobacteria was calculated through the representation of 19 traits (continuous and discrete) obtained after consulting 24 primary references that include original descriptions of *Nostoc* and related species. On the other hand, with the help of 41 sequences deposited in GenBank and three different algorithms (maximum likelihood, maximum parsimony and neighbor-joining) their kinship was computed. Furthermore, with the totality of the evidence the theoretical limits for the classification of these species through these characters are inferred. Three different strains were isolated from the Trans-Mexican Volcanic Belt. At each site pertinent data was registered to describe its abiotic environment. In the laboratory the maintenance of the biological material was carried out, microphotographs were taken, and the extraction of the genomic DNA and the amplification of the gene to 16S rRNA by the polymerase chain reaction method were carried out before Sanger sequencing of the amplicons. The results speculated that *Nostoc* sp<sub>1-3</sub>. is a set of species (nostocoid cyanobacteria) that can demonstrate their lack of morphological and genetic homology. Therefore, the affiliation of the Mexican material to any of the genera related to *Nostoc* is confusing and objectively denounces the probability that they are new records. It concludes with the technical sheets that include the taxonomic identity, cultivation code, taxonomic description, figures of their morphological characters, habitat, genetic-morphometric relationships and the comparison of their potential similarities; obtained thanks to the sequences between 738 –778 bp that found a global similarity of 90.69 – 97.44% between the sequences in the NCBI.

## RESUMEN

Las cianobacterias nostocáceas son organismos fotosintéticos y diazotróficos que comparten una morfología moniliforme. Se pueden encontrar como componentes de una costra microbiótica o incluidos entre un líquen. El género *Nostoc* tiene una amplia distribución y en principio se reconoce a partir de sus caracteres morfológicos. Así, se han reportado numerosas poblaciones por su aspecto nostocáceo que ahora se sabe corresponden a nuevos géneros en la ciencia. En este trabajo se comparó taxonómicamente algunas cianobacterias nostocoides aisladas de la Faja Volcánica Transmexicana a partir de sus caracteres morfológicos, ecológicos y moleculares. La metodología se desarrolló en tres fases: gabinete, exploración ficológica y trabajo de laboratorio. La investigación en gabinete se incluye en la sección suplementaria. La similitud entre cianobacterias nostocáceas se calculó mediante la representación de 19 caracteres (continuos y discretos) obtenidos después de consultar 24 referencias primarias que incluyen descripciones originales de *Nostoc* y especies relacionadas. Por otro lado, con la ayuda de 41 secuencias en GenBank y tres algoritmos diferentes (máxima probabilidad, máxima parsimonia y unión de vecinos) se calculó su parentesco. Además, con la totalidad de la evidencia se infieren los límites teóricos para la clasificación de estas especies a través de estos caracteres. Se aislaron tres cepas diferentes de la Faja Volcánica Transmexicana. En cada sitio se registraron variables pertinentes para describir su hábitat. En el laboratorio se realizó el cultivo del material biológico, se tomaron microfotografías; así mismo, se obtuvo el ADN genómico y la amplificación del gen ARNr 16S por el método de reacción en cadena de la polimerasa para la secuenciación por Sanger de los amplicones. Los resultados especulan que *Nostoc* sp<sub>1-3</sub> es un conjunto de taxones de aspecto nostocoides que carecen de homología morfológica y genética. Por lo tanto, la afiliación del material mexicano a cualquiera de los géneros relacionados con *Nostoc* resulta confusa y denuncia con objetividad la probabilidad de que se trate de nuevos taxones para la ciencia. Se concluye con las fichas técnicas que incluyen la identidad taxonómica, código de cultivo, descripción taxonómica, figuras de sus caracteres morfológicos, hábitat, parentescos genético-morfométrico y el cotejo de sus parecidos potenciales; obtenido gracias a las secuencias de entre 738 –778 pb que encontraron una similitud global del 90.69 – 97.44 % entre las secuencias en el NCBI.

## INTRODUCCIÓN

Las Cyanoprokaryota agrupan a las únicas procariotas de capacidad fotosintética oxigénica (Cyanobacteria), presumiblemente, un conjunto de organismos que demuestran su evolución a partir del reloj molecular de sus enzimas antioxidantes (Boden *et al.*, 2021). Ya que, se reconoce que las cianobacterias han diversificado ampliamente desde el Gran Evento de Oxigenación del Arcaico, hace alrededor de 2,300 Ma (Sánchez-Baracaldo *et al.*, 2021).

Se considera que sus fósiles son la evidencia de materia organizada más antigua al rastrearse el desarrollo de la vida en la Tierra; esto es así debido a las particulares trazas dejadas por su metabolismo fotosintético, su evidente organización celular y su capacidad para desarrollar células especializadas como: heterocitos, acinetos y hormogonios (Tomitani *et al.*, 2006; Margulis & Chapman, 2009; Soo *et al.*, 2017; Nakazawa, 2018).

Se estima que existen alrededor de 6,280 especies de cianobacterias en el mundo, pero este censo está sesgado hasta que se cubra el déficit taxonómico (Nabout *et al.*, 2013; Villaseñor, 2015). Con las nuevas aproximaciones metodológicas, como el uso de microscopía confocal, diferentes marcadores moleculares y cultivos, se han ajustado distintas jerarquías taxonómicas, así como se han reestructurado las clasificaciones previas (Vidal *et al.*, 2021).

Actualmente, existen discrepancias entre distintas bases de datos que incluyen información relacionada a la riqueza específica del género *Nostoc*. En el GenBank se mencionan a 32 especies (3,468 registros sin contar muestras ambientales), mientras que AlgaeBase indica 116 especies taxonómicas y, por su parte, CyanoDB 2.0 describe a nueve especies (Schoch *et al.*, 2020; Hauer & Komárek, 2021; Guiry, 2022).

Evans & Johansen (1999), Komárek (2013) y Komárek & Johansen (2015) señalan que el género *Nostoc* es bien conocido y de amplia distribución. Este crece en diversos ambientes acuáticos (lénticos o lóticos) y terrícolas alrededor del mundo; algunas especies son terrestres, otras prefieren las superficies húmedas: como lo son las cortezas, maderas, arcillas o adoquines y paredes de cementos; sin olvidar que algunas especies son simbióticas: donde se destacan los líquenes y la peculiar endocyanocis del 'hongo micorrizógeno arbuscular': *Geosiphon pyriformis* (Malar *et al.*, 2021).

El análisis filogenético del *taxa* de morfologías semejantes a *Nostoc* ha reconocido a 16 géneros de aspecto nostocoide, donde se incluye a: *Mojavia* Řeháková et Johansen 2007, *Desmonostoc* Hrouzek et Ventura 2013, *Cyanocohniella* Kastovsky et al., 2014, *Halotia* Genuário et al., 2015, *Aliinostoc* Bagchi et al., 2017, *Komarekiella* Hentschke et al., 2017, *Compactonostoc* Cai et Li 2019, *Desikacharya* Saraf et Singh 2019, *Minunostoc* Cai et Li 2019, *Parakomarekiella* Soares et al., 2020, *Purpurenostoc* Cai et Li 2020, *Violetonostoc* Cai et Li 2020, *Amazonocrinis* Oliveira et al., 2021, *Atlanticothrix* Oliveira et al. 2021, *Dendronalium* Alvarenga et al. 2021 y *Pseudoaliinostoc* Lee et al. 2021.

Estos géneros se han delimitado taxonómicamente a partir de las estructuras secundarias de sus secuencias del operón ARNr 16S - 23S (Hrouzek et al., 2013; Komárek, 2013, Genuário et al., 2015; Bagchi et al., 2017; Hentschke et al., 2017; Cai et al., 2019a, 2019b, 2020; Saraf et al., 2019a; Cai & Li, 2020; Soares et al., 2020; Lee et al., 2021; Oliveira Alvarenga et al., 2021). Esto es así a causa de las facilidades instrumentales que involucran la descripción de historias de ancestro descendencia al calcular el parentesco entre secuencias a ARNr 16S (métodos de inferencia bayesiana, unión de vecinos y máxima posibilidad) de diversas *cianobacterias de aspecto nostocoide* de vida libre; lo que ha sugerido la existencia de patrones de evolución molecular que confirman la existencia de un conjunto de géneros de *cianobacterias de aspecto nostocoide* dentro de las *Nostocaceae* Agardh ex Komárek 2013, donde se mantiene el género *Nostoc*, considerando a la especie tipo *Nostoc commune* Vaucher ex Bornet et Flahault 1888 (Řeháková et al., 2007; Mishra et al., 2021).

Otras líneas de investigación han abordado sus aspectos metagenómicos, como la comparación entre los genomas de poblaciones de *Nostoc* en vida libre y algunas que se encuentran en simbiosis (liques y plantas) lo cual, a grandes rasgos, describe los patrones filogenéticos entre ellos (Papaefthimiou et al., 2008; Joneson & O'Brien, 2017; Ward et al., 2021). Asimismo, Satjarak et al. (2021) demostraron que entre el mucílago de poblaciones de *Nostoc*, en un humedal al norte de Chile, crece una epimicrobiota compuesta de *cianobacterias*, *Chlamydomonas* y *estramenófilos*.

En México, la diversidad biológica del género *Nostoc* se ha estudiado a través de la exploración de diversas localidades, sin respaldo de cultivos. Donde se indica que *N. commune* y *N. entophyllum* crece en numerosas localidades del país; particularmente, se ha encontrado creciendo a *N. palmeloides* en el Valle de México; así como, a *N. muscorum* en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán; por último, a

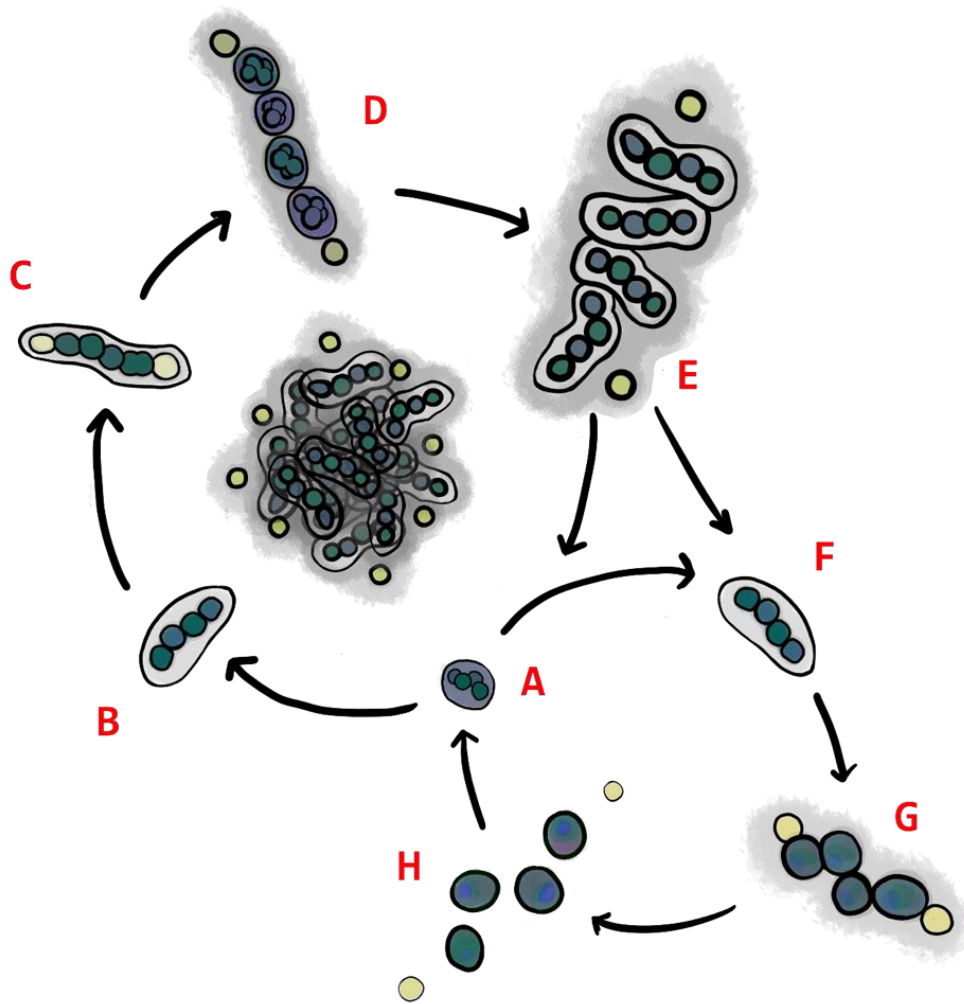
*N. commune* y a *N. sphaericum* en Yucatán y Quintana Roo, respectivamente (CONABIO, 2008; Novelo, 2008; Ramírez *et al.*, 2010, Becerra-Absalón *et al.*, 2012; Carmona Jiménez *et al.*, 2016, 2017; Rodríguez-Flores & Carmona Jiménez, 2018).

Por su parte, *N. carneum*, se encontró creciendo junto a *N. commune* y *N. microscopicum* en la Zona Arqueológica de Yaxchilán, Chiapas; este se encuentra depositado (BA510 y BA614) en la colección de Biodeterioro Algal del herbario de la Facultad de Ciencias, UNAM (Ibarra-Gallardo & Novelo, 2018).

Investigaciones con base en taxonomía integral, incluyen las secuencias del ARNr 16S de cuatro poblaciones mexicanas de *Nostoc*. Donde, primero Ramírez *et al.* (2011) demostraron el desarrollo estacional de poblaciones de *Nostoc cf. commune* en la Zona Arqueológica de Bonampak, Chiapas. Después, se reconoció que poblaciones de *N. commune* y *N. indistigedum* se distribuyen en el extremo sur del Desierto de Chihuahua (Becerra-Absalón *et al.*, 2019). Asimismo, se conocen secuencias de un cianolíquen de *Nostoc* que crece en suelos áridos de San Luis Potosí (Torres Bárcenas, 2021).

El ciclo de vida de las especies de *Nostoc* presenta capacidades fisiológicas como el desarrollo de una fase seriada (filamentosa) y una aseriada (con forma de balón), la formación de micro y macrocolonias, además de una propagación a través de gemación, fragmentación y/o desarrollo de hormogonios móviles con y sin vesículas de gas (Mateo *et al.*, 2011).

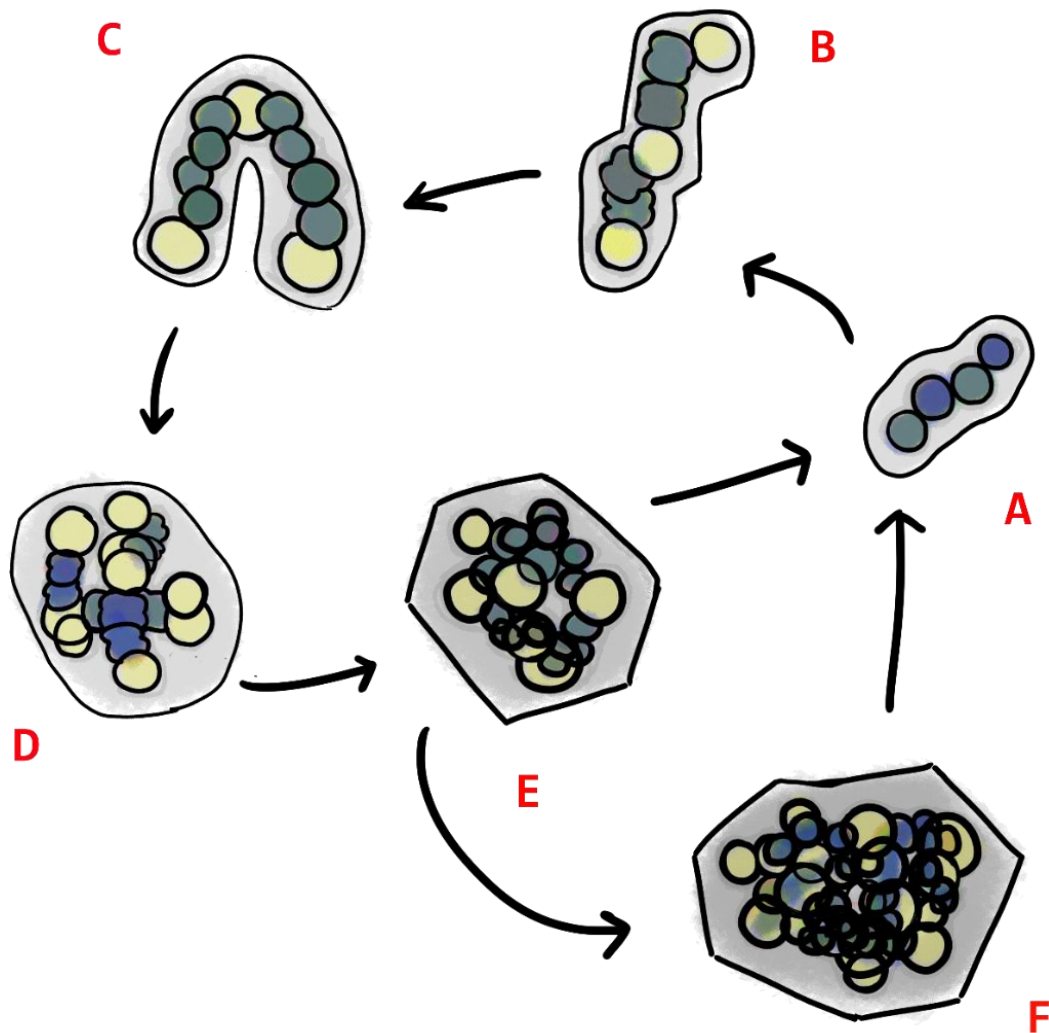
El ciclo de vida de *Nostoc muscorum* (Fig. 1), que fue recolectado de la superficie húmeda de suelo a la sombra y de una pequeña piscina de agua en el Distrito de Columbia (USA), se caracterizó por el desarrollo cíclico de dos tipos de tricomas: hormogénicos y esporogénicos (Allison *et al.*, 1937; Lazaroff, 1966). Esta especie exhibe tricomas hormogénicos (Fig. 1B), los cuales producen en ambos extremos un heterocito (Fig. 1C), para después generar entre cada una de células vegetativas un grupo de cuatro células (Fig. 1D), que a su vez originarán un tricoma independiente (Fig. 1E) que continuará con el ciclo logrando así lo que se conoce como fase aseriada. Por su parte, la fotoinducción por la luz roja, produce la fase esporogénica (Fig. 1F), donde casi cualquier célula (Fig. 1A) se dirigirá hacia la formación de un filamento corto y móvil (Fig. 1G), cuyo destino dirige a sus células vegetativas hacia la formación de acinetos (Fig. 1H) que, cuando germinan, concluyen esta fase (Hrouzek *et al.*, 2013).



**Figura 1** Esquema del ciclo de vida de *Nostoc muscorum* donde se ilustra la fase hormogónica (A, B, C, D, E) y la fase esporogónica (A, F, G y H) (Hrouzek *et al.*, 2013).

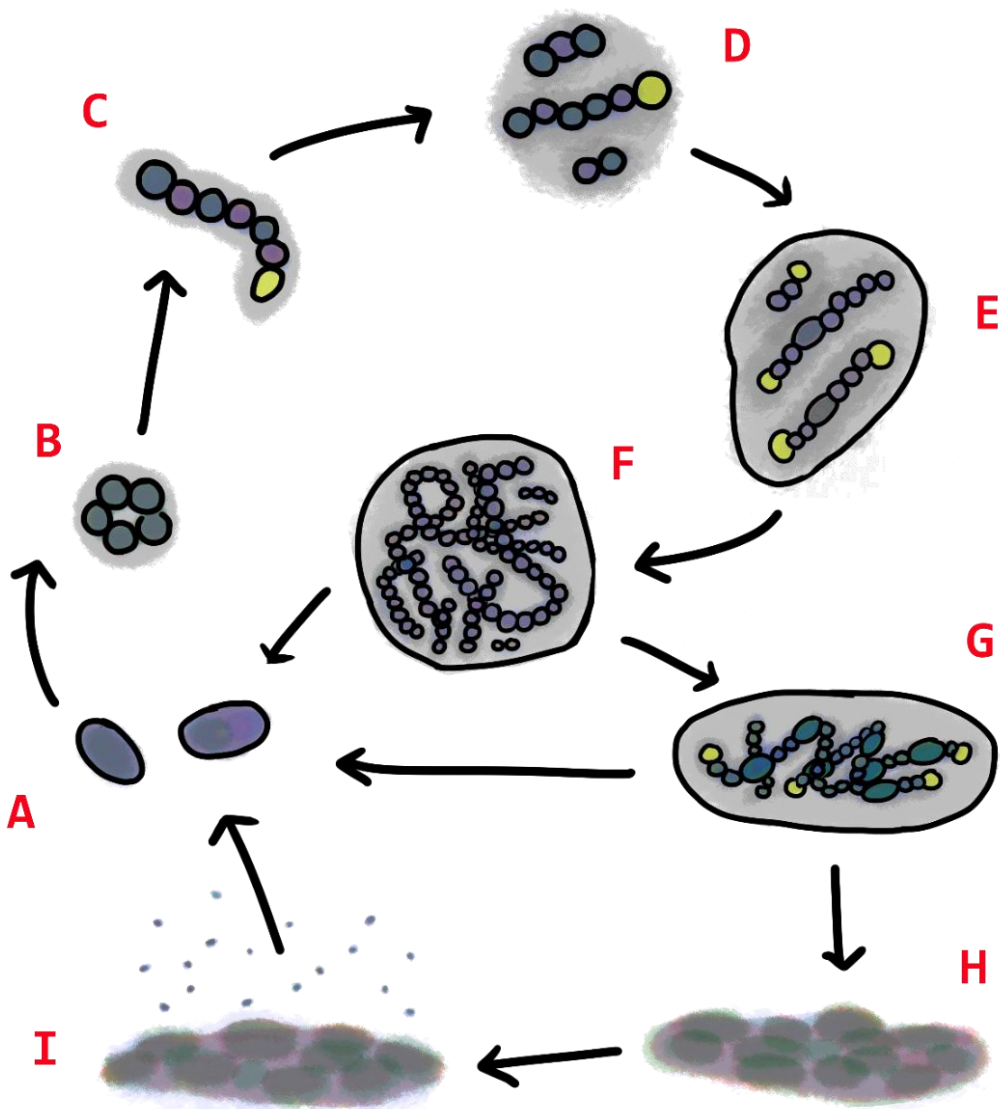
En las poblaciones de *Nostoc microscopicum* (Fig. 2), que crecieron en un río de Hidalgo (México), se han observado una serie de fases donde posterior a que el hormogonio desarrolla su vaina (Fig. 2A), este produce heterocitos terminales e intercalares mientras las células vegetales restantes producen una constricción perpendicular al eje del tricoma (Fig. 2B), lo que marca el inicio del cambio en tricomas helicoidales (Fig. 2C) que, después de alargarse y sin abandonar el límite mucilaginoso original, producirán una nueva división perpendicular (Fig. 2D), entonces es cuando los nuevos tricomas helicoidales a originarse generaran que la colonia adopte su apariencia globosa (Fig. 2E), la cual posterior a varios ciclos, presenta un arreglo cada vez más compacto de los tricomas (Fig. 2F) (Montejano-Zurita & González-González, 1981).





**Figura 2.** Esquema del ciclo de vida de *Nostoc microscopicum* (Montejano-Zurita & González-González, 1981).

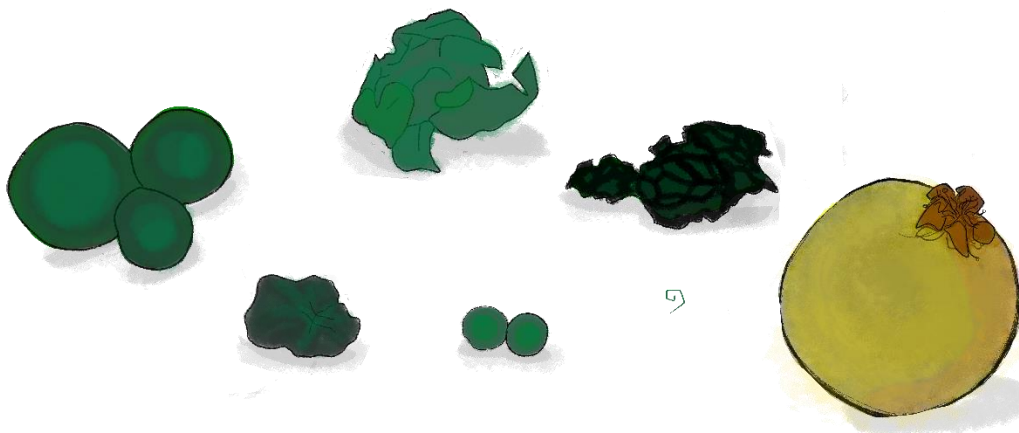
Por otro lado, las poblaciones de *Nostoc sphaericum* (Fig. 3) en humedales de la Reserva Ecológica El Edén, Península de Yucatán exhiben, en cultivo, una fase aseriada que después de desarrollar un talo granular-amorfo (Fig. 3A-H) adopta una apariencia rígida que, después de cuatro meses, volverá a ser lisa y difluente (Fig. 3I), generando así tricomas esporogénicos; mientras que en el tinal, las colonias se exhiben con mayor facilidad posterior a el periodo de inundación, adoptando su apariencia rígida al comenzar el periodo de secas (Becerra-Absalón & Tavera, 2009).



**Figura 3.** Esquema del ciclo de vida de *Nostoc sphaericum* (Becerra-Absalón & Tavera, 2009).

Las cianobacterias, de apariencia *nostocoide*, han sido explotadas por diversas culturas como fuente de alimento (Fig. 4). En América, las poblaciones andinas que arribaron a lo que hoy es Perú (s. XXVII a. e. c.) las nombraron *llulluch'a* y/o *murqutu*; e incluso, hoy en día aún se venden en fresco en el mercado de Cusco, para su consumo como parte de la dieta humana, donde se reconoce a: *Nostoc sphaericum*, *N. verrucosum*, *N. commune* y *N. parmelioides* (Husson, 1993). En

Así fue nombrada *Ge-Xian-Mi* (IV – V e. c), en honor de Ge Hong, quien introdujo estas especias al emperador (Qui *et al.*, 2002). Mientras que, en Mesoamérica, los náhuatl las denominaron *amomoxtl*: esa cosa aguada que Ortega (1972) indicó se trataba de poblaciones de *Nostoc commune* en el Valle de México. El concepto moderno fue acuñado por Paracelso (s. XVII) quien al referirse a el *agujero de la nariz* (*Nostoch*) buscaba recordar que se trataba o de *la polución de una estrella pletórica y lasciva*, o de *la excreta de un planeta reumático* (Potts, 1997).



**Figura 4.** Bodegón compuesto de cinco especies de *Nostoc* (*N. sphaeroides*, *N. muscorum*, *N. commune*, *N. microscopicum* y *N. sphaericum*) en proporción a un fruto tropical (guayaba).

Por tanto, las *cianobacterias nostocoides* son un conjunto de especies sobre el cual mucho se ha descrito acerca de su potencial para transformar dióxido de carbono y luz solar en bio-productos útiles como nutrientes y combustibles (Pérez *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021; Silambarasan *et al.*, 2021); por lo cual, es importante demostrar la identidad taxonómica de las cepas explotables en diversos mercados, tomando en cuenta los caracteres que las hacen útiles para su aprovechamiento.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Comparar la identidad taxonómica de algunas cepas de cianobacterias de apariencia nostocoide aisladas de la Faja Volcánica Transmexicana, a través del análisis integral de algunos de sus caracteres morfológicos y marcadores moleculares.

### **Particulares**

Aislar cianobacterias de aspecto nostocoide, indicando los hábitos en donde fueron encontradas, que crecen en la Faja Volcánica Transmexicana. Para obtener el material biológico unialgal que permita su estudio polifásico.

Describir el material biológico con base en el concepto de especie morfológica a partir de material de campo y en cultivo.

Analizar la identidad de las cepas a partir de su secuencia de la región a ARNr 16S con base en el concepto de especie filogenética para inferir sus relaciones filogenéticas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Esta sección se desarrolló en diferentes fases: Suplementos (S) trabajo de gabinete, (1) colección y trabajo de campo y (2) trabajo de laboratorio.

**S.- Trabajo de gabinete:** consistió en la documentación de fuentes primarias acerca de especies de *Nostoc*, estas referencias abarcan: Komárek (2013) y los 23 artículos marcados con \*\* en la sección de literatura citada; estas incluyen las 41 especies que conforman complejo de géneros 'Nostoc-like' (Tabla S4). A través de esta información se basó la descripción morfológica que delimita la **caracterización morfométrica** (Tablas S3, S4 y S5). Posteriormente, se analizó la **caracterización filogenómica** utilizada para calcular un reloj molecular (Figs. S6, S7 y S8). Además, esta información fue procesada a través de un **análisis de evidencia total** entre las especies discriminadas (Figs. S9 y S10). Este apartado se incluye después de la literatura citada.

**1.- Colección y trabajo de campo:** se consideraron tres cepas de **material biológico** de la colección del herbario IZTA, los códigos F02, Glo-01-Ver y POIzta6.0, por su aspecto nostocóide. Estas corresponden a la exploración de tres localidades en el centro de México. Para F02 y POIzta6.0 se recolectaron en tubos Falcon de 50 ml con medio líquido BG11<sub>0</sub>. En el laboratorio, el material fue sembrado en cajas de Petri a través de la técnica de estría abierta, a partir del precipitado que se logró del tubo de ensaye etiquetado, después de haberlo agitado vigorosamente (Allen & Stainer, 1968; Bellinger & Sigee, 2010).

**2.- Trabajo de laboratorio:** radicó en el aislamiento sistemático de las cepas. Este material fue determinado siguiendo la caracterización morfológica y molecular, es decir una aproximación polifásica (Komárek *et al.*, 2014; 2016; 2018).

**1.1 Material biológico.** Tres cianobacterias: F02, Glo-01-Ver y POIzta6.0, fueron monitoreadas siguiendo una aproximación polifásica (Komárek *et al.*, 2014; Komárek, 2016; Komárek, 2018). El material recibido fue recolectado en: Estado de México, Veracruz y Jalisco; en distintos hábitats: reofilico, subaéreo y sustrato artificial, respectivamente.

Durante cada una de las exploraciones: se seleccionaron los especímenes que se cultivarían, se registró su localización geográfica con un GPS, la temperatura ambiental y algunas características destacables de cada área de estudio. En los hábitats acuáticos, se registró la temperatura del agua con un termómetro Brannan, el pH con un potenciómetro Cole Parmer Digi-sense y la conductividad con un equipo marca Hanna H198312, así como la alcalinidad total y el oxígeno disuelto por la técnica de Winkler (APHA, 2017).

Además, a través de los mismos caracteres de la tabla S4, fueron descritas las cepas F02, Glo-01-Ver y POIzta6.0 para así incluirlos junto con sus secuencias, las secuencias de la *Nostoc-like* (Tabla S2) y la secuencia de *Nostoc cf. commune* 257-15 (Ramírez *et al.*, 2011), en dos historias evolutivas calculadas por los métodos de Máxima parsimonia del programa TNT (Goloboff *et al.*, 2016), que consideran a distintas especies como taxones ancestrales en búsqueda de discutir acerca de la identidad del material biológico entre el total de las especies enlistadas por Komárek (2013) y aquellas citadas en la tabla S4.

**2.1 Cultivos.** Las resiembras se realizaron en medio BG11<sub>0</sub> sólido y se mantuvieron a temperatura ambiente, durante un ciclo de 16:8 h de luz blanca:luz de fluorescencia (Allen, 1968). En caso necesario se agregó cicloheximida para eliminar contaminantes eucariontes (Obrig *et al.*, 1971).

Las resiembras se monitorearon a lo largo de seis meses: primero cada tres días durante tres semanas, posteriormente cada cinco días durante cinco semanas para finalizar con un registro cada 14 días durante cuatro meses (Řeháková *et al.*, 2007).

**2.2 Caracterización taxonómica del material mexicano.** Se realizó la caracterización morfológica de cada espécimen utilizando las claves dicotómicas de Komárek (2013), Komárek & Johansen (2015) y Sant'Anna *et al.* (2017).

Se tomaron micrografías con apoyo de un microscopio óptico de luz polarizada ZEISS Axio Scope.A1 equipado con una cámara ZEISS AxioCAm ICc5 a través del programa ZEN 2 (blue edition). Para su edición, se utilizó el programa Adobe Ilustrador y Clip Studio Paint PRO. Cada diagnóstico se acompañó de las micrografías que señalan los caracteres morfológicos de referencia.

**2.3 Caracterización molecular de cianobacterias mexicanas.** La extracción de ADN se realizó siguiendo las indicaciones de un protocolo GenElute™ Plant Genomic DNA Miniprep Kit. Para la amplificación del gen ARNr 16S se utilizó el set de cebadores específicos cianobacterianos 27F1 (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') y 809R (5'-GCTTCGGCACGGCTCGGGTCGATA-3') (Jungblut *et al.*, 2005) y un AccuPower® PCR PreMix (Bioneer) en un Termociclador Bio-Rad T100™.

El protocolo de la reacción en cadena de la polimerasa fue desarrollado como sigue: un ciclo de 4 min a 95°C; 34 ciclos de 30 s a 94°C, 30 s 55°C y 30 s a 72°C; una elongación a 72°C durante 7 min; para finalizar a 4°C durante un tiempo indeterminado.

Los productos amplificados fueron visualizados en un gel al 1% de agarosa al dejarseles correr durante media hora en una electroforesis con TBE 1x, para ser purificados con un QIAquick™ PCR Purification Kit. Los productos purificados fueron secuenciados utilizando el método del dideoxi-terminal en CINVESTAV, Irapuato.

**2.4 Caracterización filogenética del material mexicano.** Las secuencias de F02, Glo-01-Ver y POIzta 6.0 obtenidas fueron alineadas (una a la vez) en el conjunto de especies enlistado en la Tabla S4, para comparar con las secuencias previamente registradas en el NCBI de los que incluyen los 16 géneros de aspecto nostocóide (*Nostoc*-like) con mayor homología genómica (Fig. 5). De ellas las de mayor homología fueron procesadas en una búsqueda con SILVA Incremental Aligner (SINA 1.2.11) en ACT: Alignment, Classification and Tree Service (Pruesse *et al.*, 2012), incluyendo los servicios de alineamiento y búsqueda y clasificación con computo de árbol en RAxML. Además de ingresadas a la Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) del NCBI (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). La información obtenida se procesó a través de los métodos de Máxima posibilidad y Bootstrap del programa MEGA 11 (Kumar *et al.*, 2018).

Además, las secuencias del material mexicano fueron alineadas en conjunto a las secuencias de la *Nostoc*-like taxa (Tabla S4) y la secuencia parcial a ARNr 16S (HQ877825) del clon 257-15 de *Nostoc* cf. *commune* (1141 pb; Ramírez *et al.*, 2011) para ser incluidas en una matriz de evidencia total que considera los rasgos representados en las tablas S2 y S3 y la descripción del material mexicano a través de los caracteres de la Tabla S1; esta matriz fue procesada en TNT en una búsqueda por nuevas tecnologías (Wenzel, 2002; Goloboff *et al.*, 2016).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**1.1 Nostoc, México.** Las cepas F02, Glo-01-Ver y POIzta 6.0, fueron aisladas de microambientes contrastantes entre sí: la primera fue aislada de material biológico que crecía bentónico en un arroyo del Nevado de Toluca, Estado de México. Mientras, la segunda crecía epífita sobre una bromelaceae en el dosel del bosque mesófilo de montaña en Xico, Veracruz. En tanto, la última crecía sobre un sustrato artificial de una maceta en el área verde en un restaurante de la Ciudad de Guadalajara, Jalisco.

Los resultados de las cianobacterias de aspecto nostocoide determinadas como *Nostoc* spp. aumentan el conocimiento de la ficoflora del país. Ya que F02 es un registro que se suma para el Estado de México, además de las colonias mucilaginosas laxas sobre roca emergente y/o sumergida o sobre troncos de la especie *Nostoc parmelioides* recolectada en el río silíceo 'Carrizal', Valle de Bravo (Cartajena Alcántara *et al.*, 2020). Asimismo, Glo-01-Ver: es el primer reporte en Veracruz de una cianobacteria nostocoide epífita sobre bromeliaceae; donde se ha reportado que *Nostoc* forma parte de la ficoflora en las hondonadas de 'La Mancha' (Vázquez & Legaria-Moreno, 2006). Por último, POIzta 6.0 se suma al registro de *Nostoc caeruleum*, *Nostoc commune* y *Nostoc punctiforme*, quienes fueron recolectados entre el fitoplancton del lago de Chapala, Jalisco (Nuñez Márquez & Reyes González, 1995).

**2.0 Cianobacterias nostocoides mexicanas cultivadas.** La determinación taxonómica utilizando únicamente caracteres morfológicos de las cepas F02, Glo-01-Ver y POIzta 6.0, y la bibliografía consultada indicaron se trataban de *Nostoc commune*, *Desmonostoc muscorum* y *Nostoc sphaeroides*, respectivamente (Komárek, 2013; Komárek & Johansen, 2015; Sant'Anna *et al.*, 2017). Sin embargo, la suma de la secuencia ARNr 16S invalidaron la determinación por taxonomía tradicional, así como no permiten tomar una decisión taxonómica definitiva.

Las determinaciones con base a taxonomía tradicional conllevan a imprecisiones taxonómicas cuando se comparan con las secuencias de los taxa de aspecto nostocoide (*Nostoc-like*). Por tanto, deben de conocerse las secuencias de ARNr 16S, ARNr 23S e ITS para reconocer las diferencias en la estructura secundaria de su transcrito, como ha sido indicado por: Řeháková *et al.* (2007), Hrouzek *et al.* (2013), Komárek (2013), Genuário *et al.* (2015), Bagchi *et al.* (2017), Hentschke *et al.* (2017), Cai *et al.* (2019a), Cai *et al.* (2019b), Saraf *et al.* (2019a), Cai & Li (2020), Cai *et al.* (2020), Soares *et al.* (2020), Lee *et al.* (2021) y Mishra *et al.* (2021).

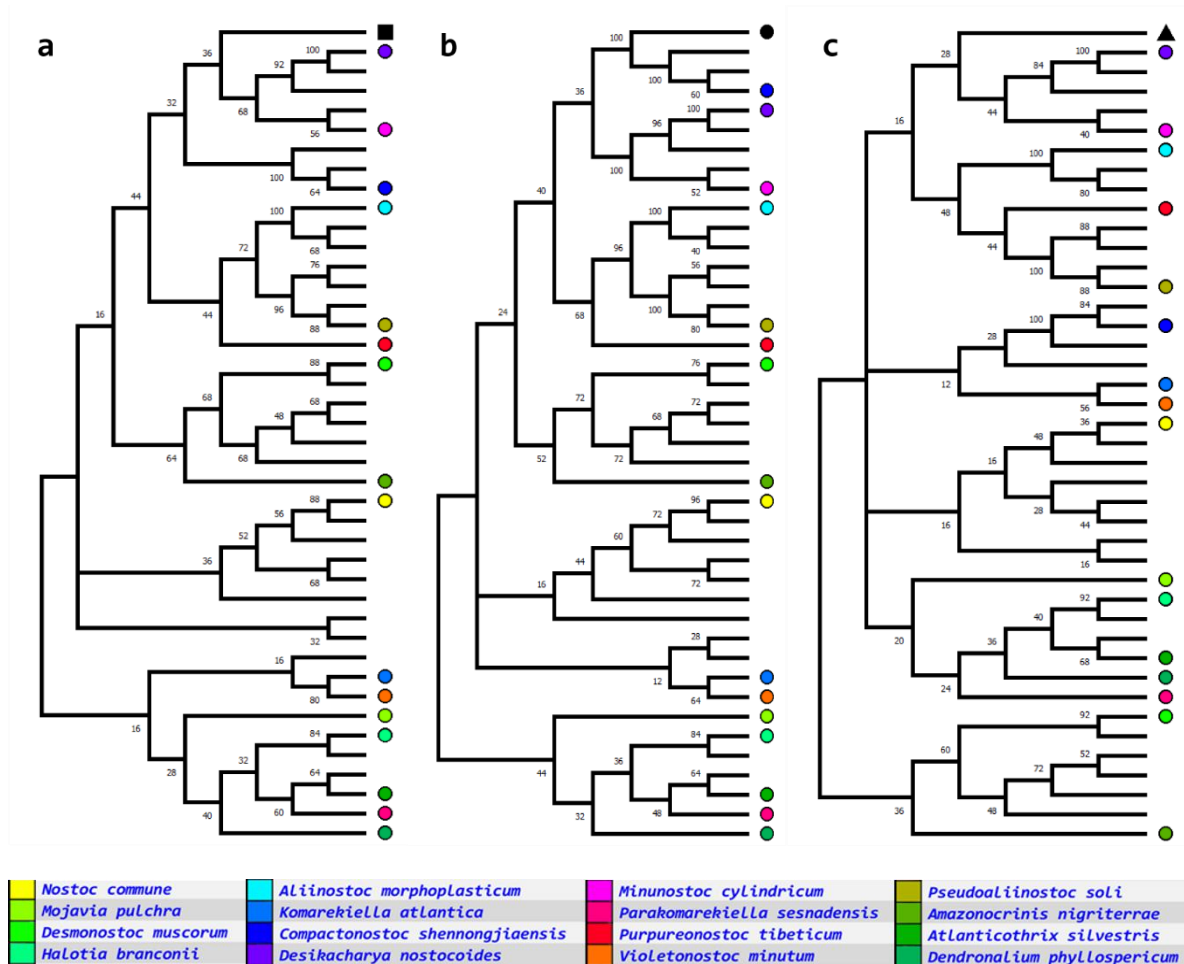


Ahora bien, el inventariado de los recursos en una región representa una de las más importantes prácticas ecológicas en el desarrollo de un proyecto de aprovechamiento sostenible, por lo cual, las monografías tradicionalmente utilizadas para la discriminación taxonómica de un *Nostoc* aún resultan útiles a la hora de describir las microcomunidades de casi cualquier lugar (Sant'Anna, 2007; Kant *et al.*, 2020; Davydov, 2021). Al aproximarse polifásicamente a un conjunto de cepas que presuntamente pertenecen a *Nostoc* se busca contribuir al conocimiento de la ficoflora de México, ya que todos podrían representar nuevos registros al compararlos con los listados de Novelo (2008) y Oliva Martínez & Garduño Solórzano (2020).

Las secuencias al ARNr 16S obtenidas a partir del material mexicano ( $\approx 797$  pb) abarcan alrededor del 69% de la secuencia parcial al ARNr 16S reportada para *Nostoc comunne* EV1-KK1 (AY577536; Řeháková *et al.*, 2007), esto es insuficiente para el análisis estadístico a través de algoritmos filogenéticos. Por lo cual, en un futuro habrá de optarse por repetir la replicación mediante reacción en cadena de la polimerasa con cebadores más amplios (Ramírez *et al.*, 2011), o que abarquen regiones como las que codifican a cianoglobinas (*glnB*; Potts, 2002). Además, podrían complementarse con ensayos de hibridación ADN-ADN (Rosselló-Mora, 2006), o una secuenciación de genoma completo (Gugger *et al.*, 2012), ya que podrían tratarse de novedades científicas.

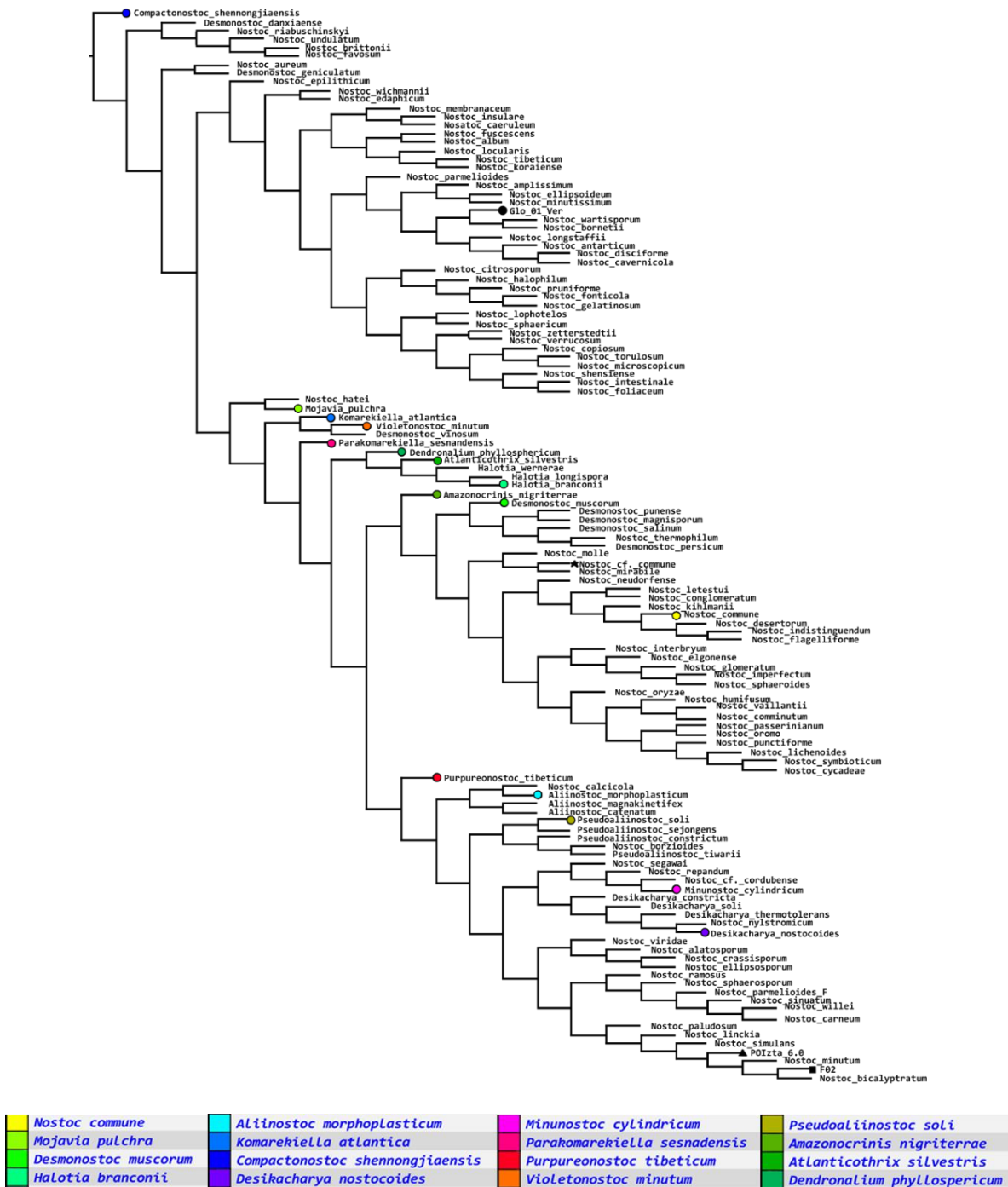
Los resultados obtenidos al compararlas con las secuencias designadas como *Nostoc*-like taxa (Tabla S4), se observan en la Fig. 5: donde las secuencias de F02 (Fig. 5a) y POIzta 6.0 (Fig. 5c) se encuentran en el mismo clado y por tanto más relacionadas con el género *Desikacharya* y la de *Minunostoc cylindricum*; mientras que Glo-01-Ver (Fig. 5b) se emparenta más con las secuencias de *Compactonostoc shennongjiaensis*, *Desmonostoc danxiaense* y *Nostoc favosum*.

Por último, en la Figs. 6 y 7 se observan el análisis de evidencia total que incluye las secuencias del material mexicano en conjunto a su descripción morfométrica; estas clasificaciones resultan ser igual de largas (1.43 cambios por sitio) en sus distancias totales, que la media armónica de las historias evolutivas utilizadas para calcular el reloj molecular de las secuencias a ARNr 16S de la *Nostoc*-like taxa (Fig. S6, S7 y 12;  $\pm 1.41$  cambios por sitio), además de resultar 65% más cortas que las historias construidas con el método de Bootstrap de la Máxima Posibilidad (Tamura & Nei, 1993) incluidas en la Fig. 5, y 79% más cortas que aquellas construidas con las secuencias discriminadas por BLAST y ACT (Figs. 13, 18 y 23).

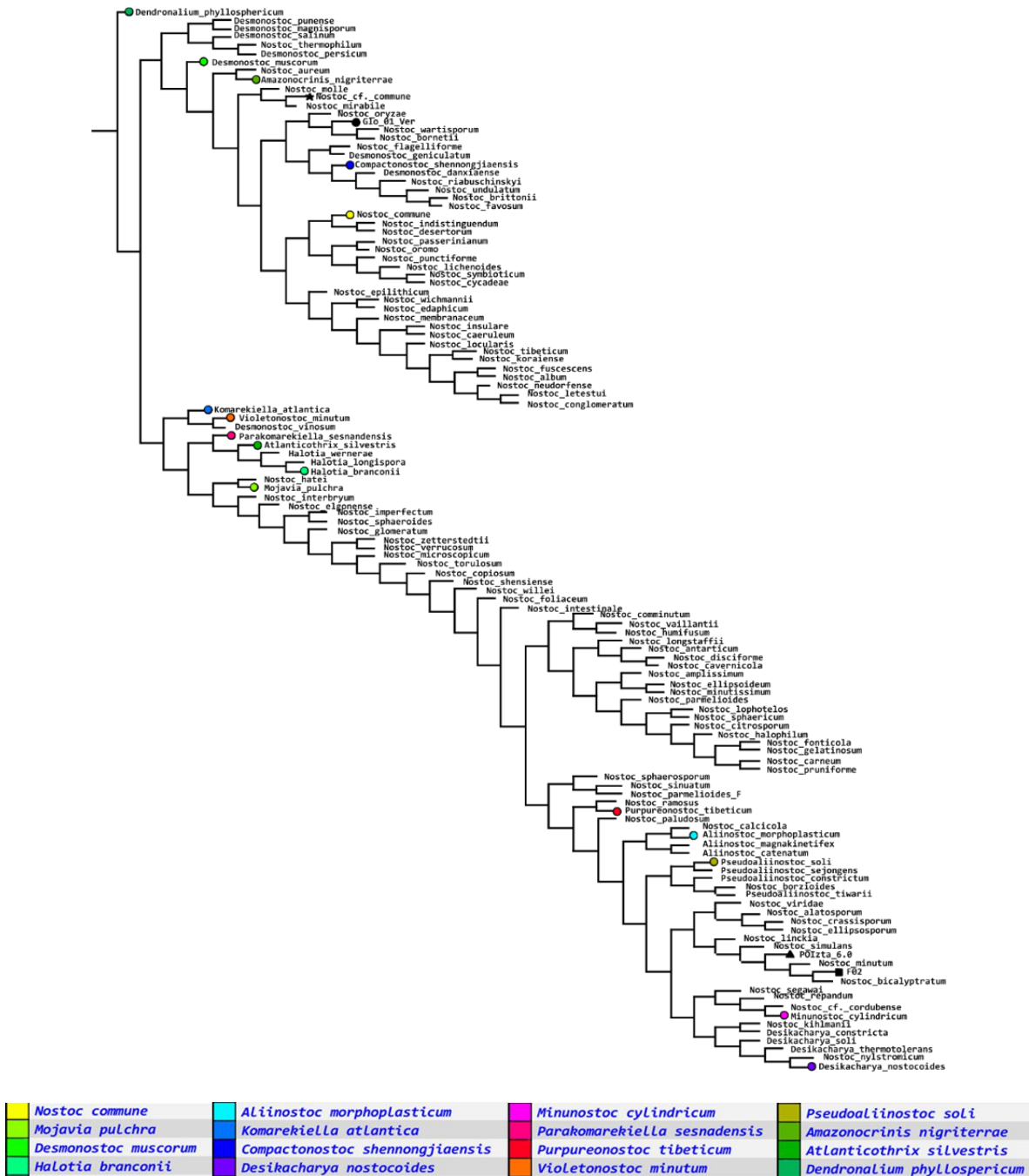


**Figura 5.** Análisis de Máxima Posibilidad (Tamura & Nei, 1993) de las secuencias ARN 16S obtenidas a partir de las cepas aquí estudiadas y de las secuencias de la *Nostoc*-like taxa (Tabla S4) alineadas mediante un CLUSTALW (Thompson *et al.*, 1994) y con un recorte a  $\approx$  797 pb. Las ramas de frecuencias menores del 10% fueron colapsadas, después de realizarse 25 réplicas Bootstrap (Felsenstein, 1985).

- a. Consenso Bootstrap de la secuencia de **F02** (■) dentro de la *Nostoc*-like taxa. Distancia = 2.208 cambios de bases.
- b. Consenso Bootstrap de la secuencia de **Glo-01-Ver** (●) dentro de la *Nostoc*-like taxa. Distancia = 2.209 cambios de bases.
- c. Consenso Bootstrap de la secuencia de **POlza6.0** (▲) dentro de la *Nostoc*-like taxa. Distancia = 2.218 cambios de bases.



**Figura 6.** Análisis de evidencia total de las cianobacterias nostocoides (Tabla S4 + Tabla S2 ∩ Tabla S3) incluyendo los caracteres recopilados para las cepas mexicanas. En el árbol los caracteres continuos tienen una longitud de 86.863 cambios, un IC = 0.101 y un IR = 0.266; los caracteres discretos tienen una longitud de 123 cambios, un IC = 0.266 y un IR = 0.579; y la secuencia de ARN 16S una distancia de 1.428 cambios por base. La distancia total partiendo de *Compactonostoc shennongjiaensis* es de 1966.863 cambios. *Nostoc cf. commune* 257-15 (★), F02 (■), Glo-01-Ver (●) y POIzta6.0 (▲).



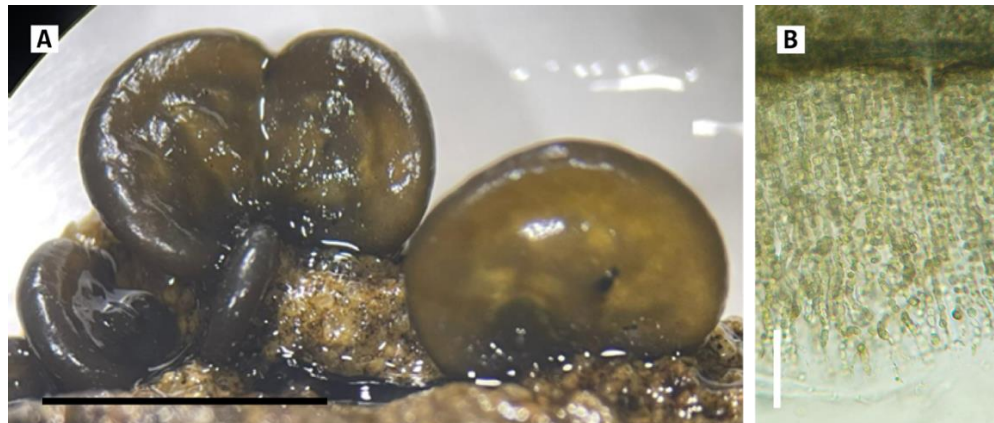
**Figura 7.** Análisis de evidencia total de las cianobacterias nostocoides (Tabla S4 + Tabla S2 ∩ Tabla S3) incluyendo los caracteres recopilados para las cepas mexicanas. En el árbol los caracteres continuos tienen una longitud de 88.554 cambios, un IC = 0.100 y un IR = 0.255; los caracteres discretos tienen una longitud de 122 cambios, un IC = 0.276 y un IR = 0.587; y la secuencia de ARN 16S una distancia de 1.428 cambios por base. La distancia total partiendo de *Dendronalium phyllosphericum* es de 1966.551 cambios. *Nostoc cf. commune* 257-15 (★), F02 (■), Glo-01-Ver (●) y POlZta6.0 (▲).

*Cepas nostocoides analizadas:* enseguida se indican, la identidad taxonómica, código de cultivo, descripción taxonómica, figuras de sus caracteres morfológicos, hábitat, parentescos genético-morfométrico y parecidos potenciales.

***Nostoc* sp<sub>1</sub>.**

Vaucher ex Komarek 2013

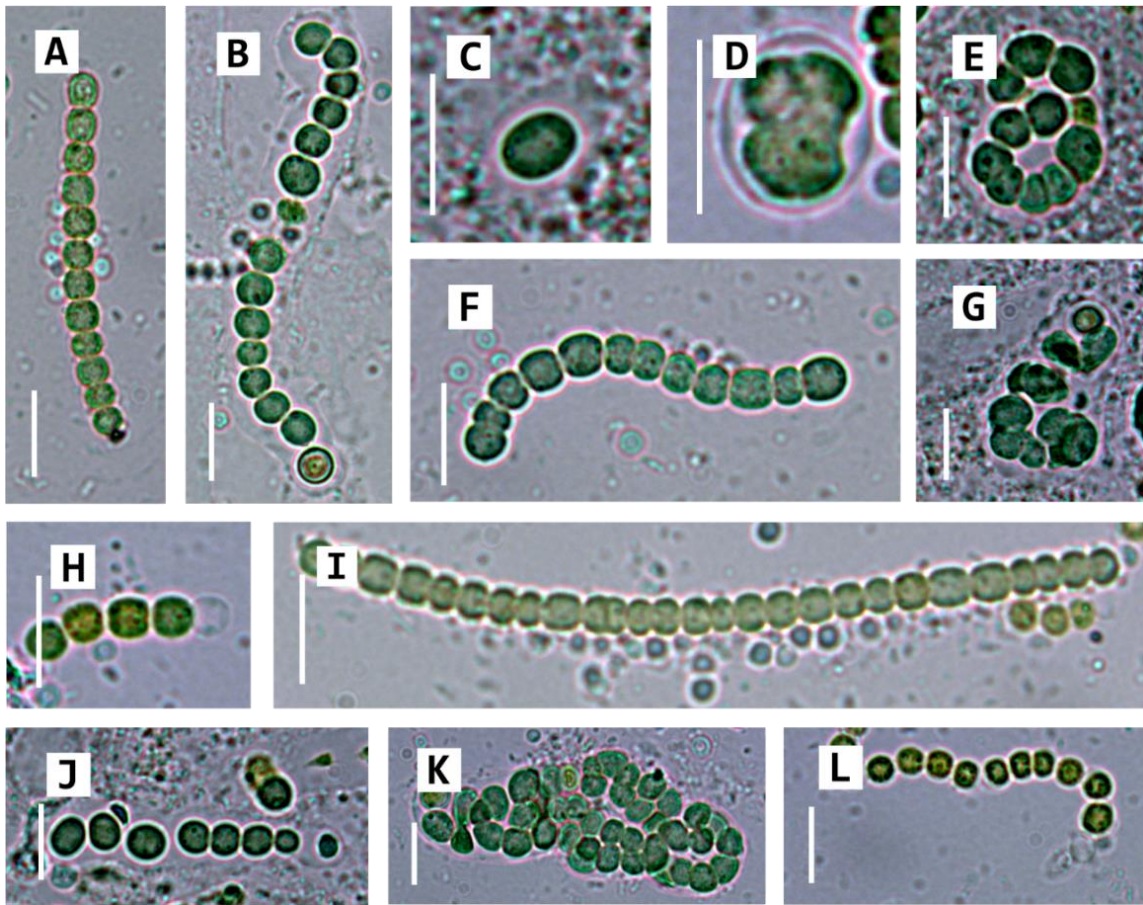
**Código de Cultivo:** F02 / Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. Herbario IZTA.



**Figura 8.** *Nostoc* sp<sub>1</sub>. F02. A) Aspecto general del talo macroscópico (Escala = 1 cm) y B) corte longitudinal del talo macroscópico en fresco (Escala = 10  $\mu$ m).

**Descripción:** El material recolectado en el campo tenía un morfo similar a la oreja de un ratón, de 1.25 cm de longitud y textura cartilaginosa (Fig. 8A), éste presenta un periderma donde se desarrollan filamentos perpendicularmente hacia el interior del talo (Fig. 8B). En cultivos sólidos, de 3 a 4 semanas, se forman colonias de aspecto verrucoso y mucilagoniso conformada por filamentos compactados (Fig. 9K). Los filamentos son monifiliformes, uniseriados (Fig. 9A) y no seriados (Fig. 9G). El tricoma es heterocitado y demuestra un esquema de propagación apoheterocítico. Sus acinetos son elipsoides, de  $\pm 2.48 \mu$ m de ancho y  $\pm 2.79 \mu$ m de largo (Fig. 9C), los cuales desarrollan una célula vegetativa gigante que, a través de una división desigual, concibe a un individuo de cuatro células (Fig. 9D). Su vaina mucilaginosa es evidente al momento de deslizarse (Fig. 9B). Los tricomas pueden alcanzar dimensiones mayores a 20 células isopolares (Fig. 9I). Las células vegetativas tienen forma de barril de 3.18 - (3.42) - 3.64  $\mu$ m de ancho y de 2.27 - (3.37) - 4.09  $\mu$ m de largo. Se trata de una población con un ciclo de vida polimórfico.

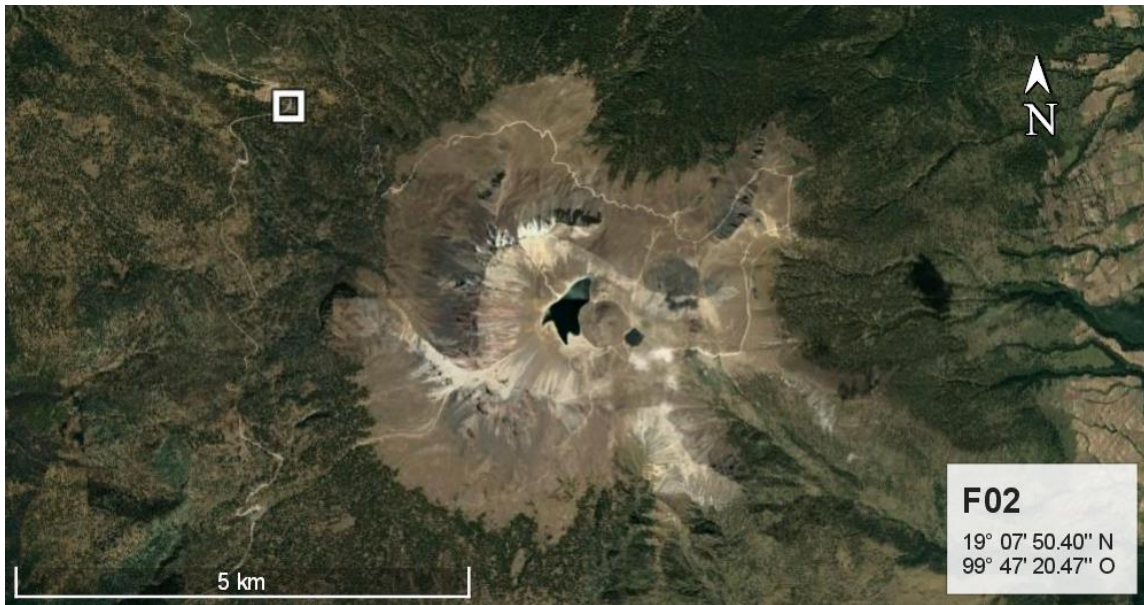




**Figura 9.** Micrografías de *Nostoc* sp<sub>1</sub>. F02. A) tricoma recto de 12 células de largo, B) filamento hormogénico con heterocito, C) acineto elipsoidal, D) división desigual del acineto, E) colonia no seriada, F) tricoma vegetativo, G) separación de hormogonios en colonia no seriada, H) tricoma moniliforme corto, I) tricoma con más de 20 células de largo unidas, J) cadena de acinets, K) tricomas condensados y L) tricoma con células separadas. Escala = 5  $\mu$ m.

**Hábitat:** Bentónico, epilítico, en un arroyo del deshielo del Nevado de Toluca, Estado de México.

El 11 de mayo del 2022 fue recolectado el material biológico, en el arroyo con referencias geográficas 19° 07' 50.40" latitud N, 99° 47' 20.47" longitud O (Fig. 10), a una altitud de 3720 msnm. El material corresponde a una colonia macroscópica en forma de oreja de ratón, epilítico sobre brecha o andesita (Fig. 11).



**Figura 10.** Ubicación geográfica de *Nostoc* sp<sub>1</sub>. **F02.** Imagen tomada con Google Earth.

La temperatura ambiental fue de 22°C; mientras que la temperatura del agua del arroyo fue de 6°C (Fig. 12). Las condiciones limnológicas registradas fueron: pH de 6.4, conductividad de 13  $\mu$ S/cm. Oxígeno disuelto de  $2.35 \pm 0.05$  mg/L y alcalinidad total de  $28 \pm 2.0$  mg CaCO<sub>3</sub>/L.



**Figura 11.** Crecimiento macroscópico en poblaciones silvestres de *Nostoc* sp<sub>1</sub>. **F02.**



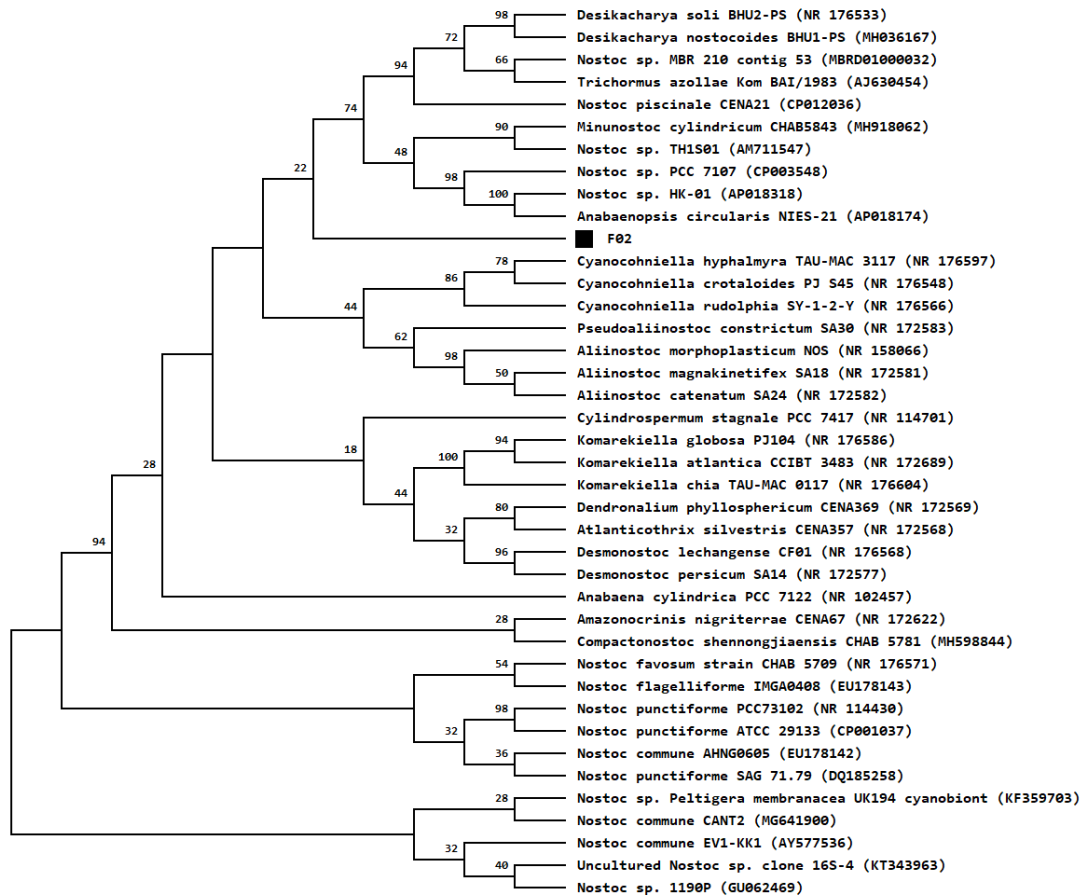


**Figura 12.** Sitio de recolecta de *Nostoc* sp<sub>1</sub>. **F02.**

**Parentesco genético:** La secuencia ARNr 16S (741 pb) de la cepa F02 tiene similitud global con *Nostoc punctiforme* (NR\_114430, 94.53%), *Komarekiella globosa* (NR\_176586, 94.57%), *Cyanocohniella rudolphia* (NR\_176566, 94.58%), *Pseudoallinostoc constrictum* (NR\_172583, 94.72%), *Desmonostoc lechanguense* (NR\_176568, 94.87%), *Anabaena cylindrica* (NR\_102457, 94.99%), *Dendronalium phyllospericum* (NR\_172569, 95.65%), *Cyanocohniella crotaloides* (NR\_176548, 95.80%), *Cyanocohniella hyphalmyra* (NR\_176597, 96.59%) y *Komarekiella chia* (NR\_176604, 97.44%).

El árbol construido considerando el Bootstrap (50) del Análisis de Máxima Posibilidad de entre 40 secuencias (Fig. 13), demuestra que la secuencia de F02 es hermana de secuencias reportadas para *Allinostoc*, *Anabaenopsis*, *Cyanocohniella*, *Desikacharya*, *Minunostoc*, *Nostoc*, *Pseudoallinostoc* y *Trichormus*. Este parentesco se evidencia cuando se contrasta con secuencias de: *Atlanticotrix*, *Desmonostoc*, *Dendronalium*, *Komarekiella* y *Cylindrosperrum*.

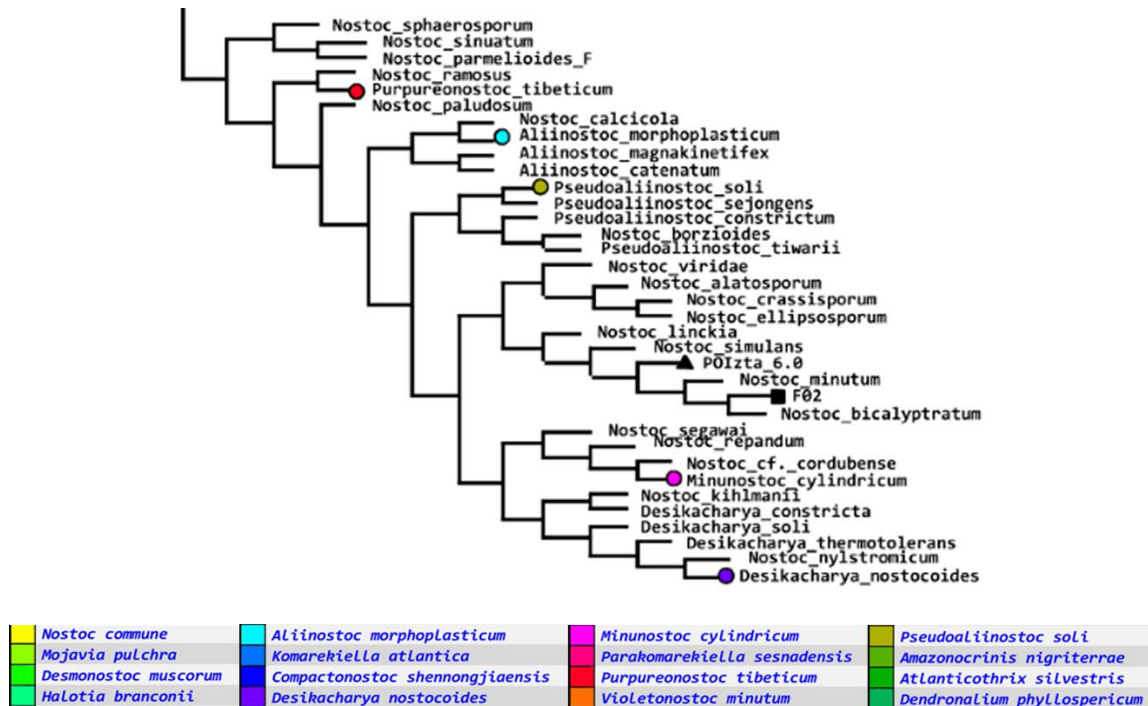




**Figura 13.** Bootstrap (50) del Análisis de Máxima Posibilidad de la secuencia de **F02** (■). La historia evolutiva se construyó considerando  $\approx 764$  pb, resultando en una distancia de 1.652 cambios de bases. Los valores en los nodos representan el soporte Bootstrap en porcentajes.

**Parentesco morfométrico:** Los dos Análisis de Evidencia Total calculados para optimizar estas observaciones (Figs. 6 y 7) ilustran como en una historia de ancestro descendencia demostrada por la secuencia a ARNr 16S de 41 secuencias (Tabla S4), las secuencias de material mexicano y la parsimonia de sus caracteres morfométricos (Tabla S1), se puede variar a la hora de ilustrar las relaciones de parentesco genético, pero ser constante en sus relaciones morfométricas; aun cuando se varíe su ancestro y los árboles se dibujen con valores bajos de consistencia y/o retención.

La Fig. 14 es un acercamiento a la posición de F02 (■) en la historia evolutiva más corta (Fig. 7).



**Figura 14.** Detalle del clúster morfométrico que incluye a **F02** (■) en un Análisis de Evidencia Total donde se consideró a *Dendronalium phyllospericum* como *taxa* ancestral.

De esta manera se pretende demostrar, con el uso de otro algoritmo y con una hipótesis de parentesco morfométrico calibrando una historia de 1.428 cambios de base por sitio (Fig. 7), que la cepa F02 resulta hermana a él clado que incluye a *Minunostoc* y las *Desikacharya*; además de que, este parecido se comparte con las especies de *Aliinostoc* y *Pseudoaliinostoc*.

**Parecidos potenciales:** Las especies cuya similitud genética oscilo entre 95.65 – 97.44 %, no comparten región geográfica ni condiciones ambientales con la cepa F02 (*Komarekiella chia*, *Cyanocohniella hyphalmyra*, *Cyanocohniella crotaloides*, *Dendronalium phyllospericum*); es decir, las primeras son mediterráneas de ambientes terrestre, lentic salobre y costero. Y *D. phyllospericum* es del Bosque de Lluvia del Atlántico brasileño. Mientras, la población mexicana estudiada crece lótica en aguas dulces de temperaturas de 6°C. Además, el método de Maxima Posibilidad la ubica en una rama hermana a él clado que incluye a *Cyanocohniella hyphalmyra* TAU-MAC 3117.

El hábitat de cada una de las especies mencionadas es indicado enseguida: *Komarekiella chia* TAU-MAC 0117 y *Cyanocohniella hyphalmyra* TAU-MAC 3117 fueron recolectadas del tapete microbótico epilítico en la superficie de sustrato calcáreo, cerca de una fuente de luz artificial, en la cueva terrestre Aghio Galas, en la isla de Chios, y de los bentos de un lago salobre de Kalochori, ambos en Grecia (Panou & Gkelis, 2022). *Cyanocohniella crotaloides* PJ S45 se encontraba desarrollando tapetes microbóticos en playas de arena fina en la isla Schiermonnikoog de Países Bajos (Jung *et al.*, 2020); y *Dendronalium phyllospericum* CENA369, sobre las hojas de *Euterpe edulis* (palma) en el parque estatal Serra do Mar de Picinguaba, Ubatuba, Brasil (Oliveira Alvarenga *et al.*, 2021).

Considerando lo calculado por el algoritmo de Máxima Posibilidad (Fig. 13). El género *Aliinostoc* comprende cepas de campos de arroz en Tailandia, cuerpos de agua en la India y algunos lagos salino-alcalinos de Brasil; sin embargo, la especie tipo, *Aliinostoc morphoplastium* NOS, crecía béntonica sobre las rocas y otros sustratos sumergidos en estanques de aguas eutróficas-polutas (Bagchi *et al.* 2017). En particular, *Anabaenopsis circularis* NIES-21 se trata de una población japonesa de la que se conoce su genoma completo (Hirose *et al.*, 2021); además, es una cepa capaz de crecer y fijar nitrógeno en la oscuridad cuando se cultiva en medio glucosado libre de nitrógeno combinado (Watanabe, 1967). A diferencia de la cepa F02, *Cyanocohniella calida*, recolectado originalmente en las aguas termales de Karlovy Vary, República Checa, este no abandona la envoltura de su acineto (Kaštovský *et al.*, 2014). F02 presenta el carácter de enrollarse, como lo hacen las especies del género *Desikacharya*; sin embargo, *Desikacharya nostocoides* fue reportado en los suelos cálidos del Bosque No Clasificado de Bhanpura, India (Saraf *et al.*, 2019a). A su vez, *Minunostoc cylindricum* se recolecto en las paredes rocosas húmedas de la Pequeña Área Escénica de Siete Hoyos en los Bosques de Frondosas Mixtas en la provincia Guizhou de China; pero este género y su especie se distinguen por no desarrollar heterocitos y acinetos, a diferencia de F02 (Cai *et al.*, 2019a). Las secuencias del género *Nostoc* que resultan hermanas a la secuencia parcial de F02 incluyen material registrado como *Nostoc piscinale* CENA21, el cual fue recolectado de los suelos inundables de la isla Mari-Mari del río Solimões en la cuenca del Amazonas en Brasil (Fiore *et al.*, 2005) y se conoce su genoma completo (Leão *et al.* 2016); además de cuatro secuencias registradas como especie de *Nostoc*: HK-01, MBR 210, PCC 7101 y TH1S01. La primera fue recolectada en el Campus del Instituto de Tecnología 'Himeji' en 'Harima' la Ciudad Jardín de las Ciencias, Japón (Kato *et al.*, 2003), se conoce su genoma

completo (Hirose *et al.*, 2021) y ha demostrado conservar su viabilidad posterior a tres años, con y sin luz solar, dentro y fuera de la Estación Espacial Internacional (Tomita-Yokotani *et al.*, 2021); la segunda proviene de lagos tropicales de aguas dulces en Singapur y se conoce su genoma completo (Te *et al.*, 2016); de la tercera también se conoce su genoma completo (Gugger *et al.*, 2012) y proviene de un estanque poco profundo de la península de Point Reyes en Estados Unidos (Rippka, 1979); mientras que la cuarta, proviene de un campo de arroz no inundado por agua en Tailandia (Papaefthimiou *et al.*, 2008). *Pseudoaliinostoc constrictum* SA30, proviene de un arrozal en Ojaksar, Irán (Saraf *et al.* 2018). En particular, *Trichormus azollae* Kom BAl/1983 es de origen incierto (Rajaniemi *et al.*, 2005).

*Atlanticotrix silvestris* CENA357 se trata una especie que crece sobre las hojas de *Garcinia gardenaria* (Rubiaceae) en la misma porción del bosque de lluvias en el atlántico brasileño que *Dendronalium phyllospericum* CENA369 (Oliveira Alvarenga *et al.*, 2021). Las especies entre las *Desmonostoc* han demostrado constituir un grupo tan diverso como el de las *Nostoc*, por lo cual el uso y desuso del género aún está por demostrarse (Hrouzek *et al.*, 2013; Mishra *et al.*, 2021). Las características microscópicas generales de los tricomas vegetativos de F02 pueden compararse con las descripciones de Oliveira Alvarenga *et al.* (2021) para *Atlanticotrix silvestris* CENA357 o de *Dendronalium phyllospericum* CENA369, pero F02 no ha demostrado la germinación de sus heterocitos como lo hacen las especies epifitas del bosque de lluvias brasileño (Oliveira Alvarenga *et al.*, 2021). La germinación de los acinetos de F02, coincide con la formación de una célula vegetativa grande por su división desigual, tal como se observó para el género *Komarekiella* por Hentschke *et al.* (2017); sin embargo, las poblaciones de *Komarekiella atlantica* CCIBT 3483 crecían sobre la corteza de árboles, postes de madera y paredes de concreto del parque estatal Santa Virginia del Bosque de Lluvia Brasileño; las cuales son similares en apariencia a poblaciones recolectadas en un piso de concreto en la isla de Hawaii, Estados Unidos. *Cylindrosperrum stagnale* PCC 7417 proviene del suelo de invernaderos de Suecia (Lyra *et al.*, 2001).

Por otro lado, los dos Análisis de Evidencia Total (Figs. 18 y 19) calculan que la cepa F02 resulta con mayor parsimonia a la morfometría de las especies: *Nostoc linckia*, *N. simulans*, *N. minutum* y *N. bicalyptratum*; además, sugieren que estas especies podrían distribuirse entre las *Aliinostoc*, *Desikacharya*, *Minunostoc* y *Pseudoaliinostoc*; sin embargo uno (Fig. 6) considera que todas estas especies

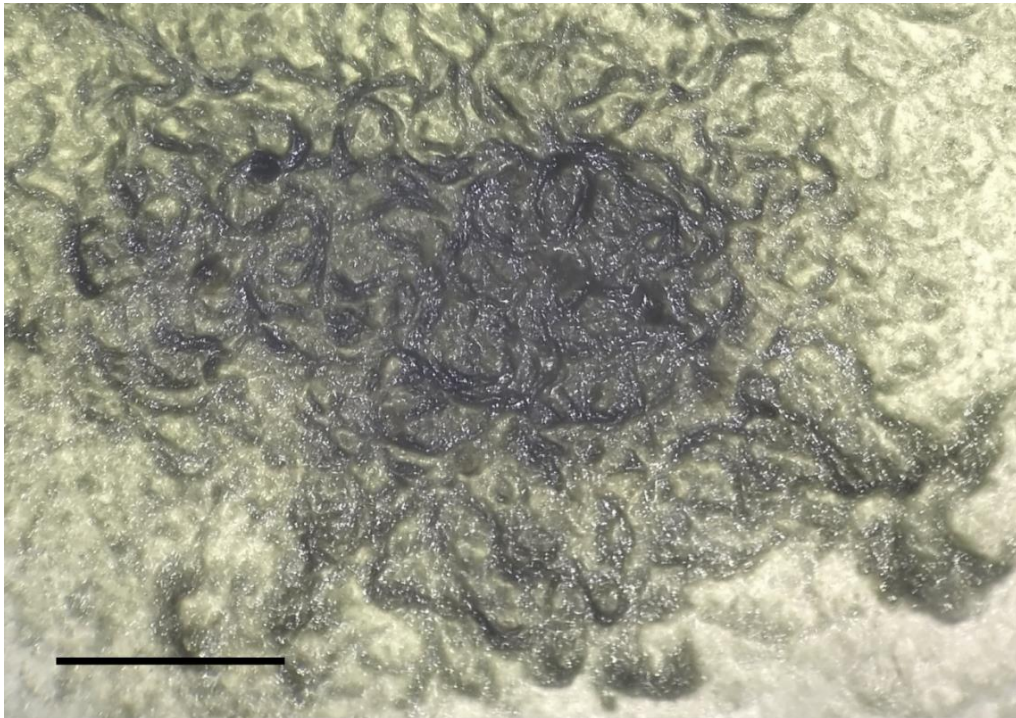
podrían confundirse con *Purpurenostoc tibeticum*, y el otro (Fig. 7) considera que podrían confundirse con *Nostoc paludosum*.

Donde las cinco especies de *Nostoc* han sido citadas para otros países. *Nostoc bycaliptratum* se recolectó en las calizas de los manantiales de recreo en Yunnan, China (Komárek, 2013); *Nostoc linckia* se ha encontrado creciendo en los afluentes de fábricas textiles en Prem Nagar, India (Mona *et al.*, 2011), además de piletas de secado en América del Norte (Komárek & Johansen, 2015); *Nostoc minutum* ha sido reportada en Argentina (Ferrari, 2004); a *Nostoc paludosum* en pantanos del Ártico Americano (Komárek & Johansen, 2015); *Nostoc simulans* se recolectó creciendo en las cavidades de los muros en las casas de Maricao, Puerto Rico (Komárek, 2013). Además, *Purpurenostoc tibeticum* fue aislado de los suelos húmedos del Tibet, China (Cai *et al.*, 2020).

***Nostoc* sp<sub>2</sub>.**

Vaucher ex Komárek 2013

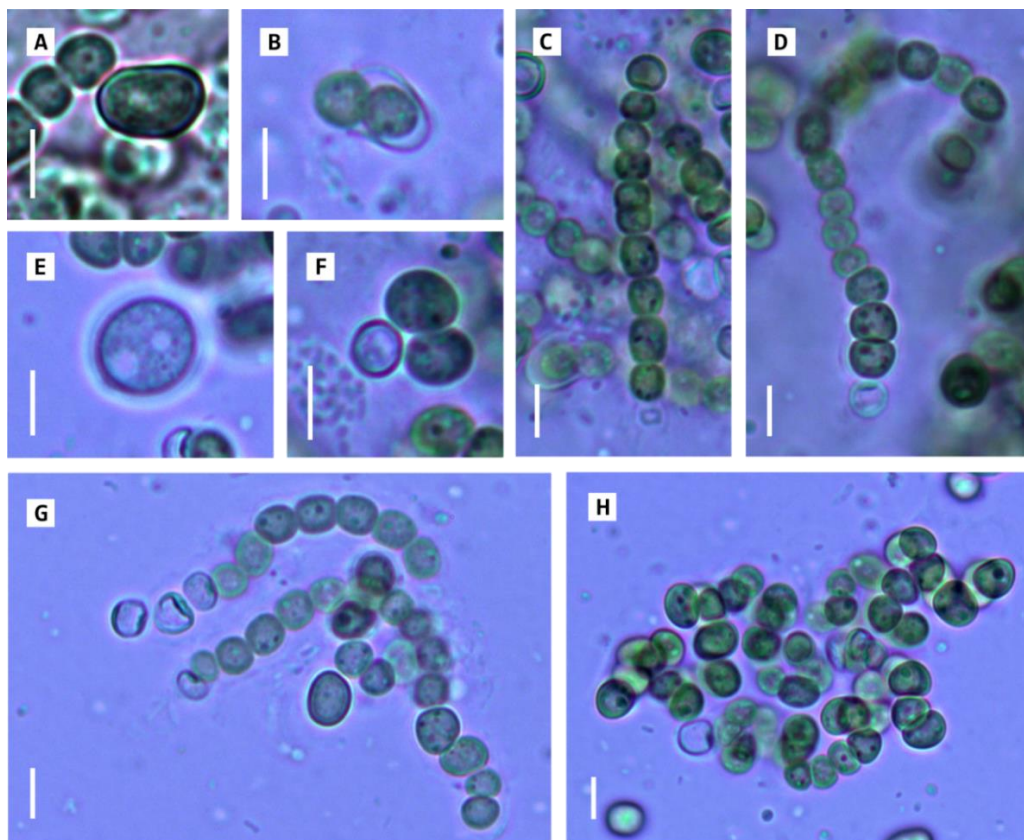
**Código de Cultivo: Glo-01-Ver** / Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. Herbario IZTA.



**Figura 15.** Aspecto general del talo macroscópico *Nostoc* sp<sub>2</sub>. **Glo-01-Ver** (Escala = 1 cm).



**Descripción:** En cultivos sólidos, de tres a cuatro semanas, se desarrollan colonias de apariencia mucilaginosa y color verde bandera (Fig. 15), donde los tricomas se desarrollan enredados en extensas colonias mucilagosas. Los filamentos son moniliformes y presentan una tenue vaina (Fig. 16H). Los tricomas son heterocitados y tienen una apariencia moniliforme uniseriada e isopolar (Fig. 16C). Las células vegetativas tienen forma de barril de 2.86 - (4.29) - 5.72  $\mu\text{m}$  de ancho y de 2.86 - (3.23) - 7.15  $\mu\text{m}$  de largo. Sus heterocitos son terminales (Fig. 16D), a veces en serie (Fig. 16G), con forma de barril de 3.80 - (4.75) - 5.06  $\mu\text{m}$  de ancho y de 4.75 - (5.70) - 6.74  $\mu\text{m}$  de largo. Los acinetos son elipsoides de 2.32 - (4.06) - 8.58  $\mu\text{m}$  de ancho y de 3.26 - (4.58) - 8.58  $\mu\text{m}$  de largo (Fig. 16A). Se propaga a través de germinación de acinetos (Fig. 16B), y la división desigual de las células vegetativas (Fig. 16E).



**Figura 16.** Micrografías de *Nostoc* sp<sub>2</sub>. **Glo-01-Ver.** A) Acineto unido a un tricoma, B) acineto germinando, C) tricoma vegetativo moniliforme, D) tricoma moniliforme con heterocito terminal y tenue vaina, E) célula vegetativa grande atravesando una división desigual, F) resultado de la división desigual de una célula vegetativa grande, G) tricoma con heterocitos terminales en serie y H) arreglo desorganizado de acinetos en una colonia. Escala = 5  $\mu\text{m}$ .

**Hábitat:** Epífita sobre las brácteas de una bromeliaceae (Phytotelmata) del bosque mesófilo de montaña en el camino hacia la Cascada de Texolo, Veracruz.

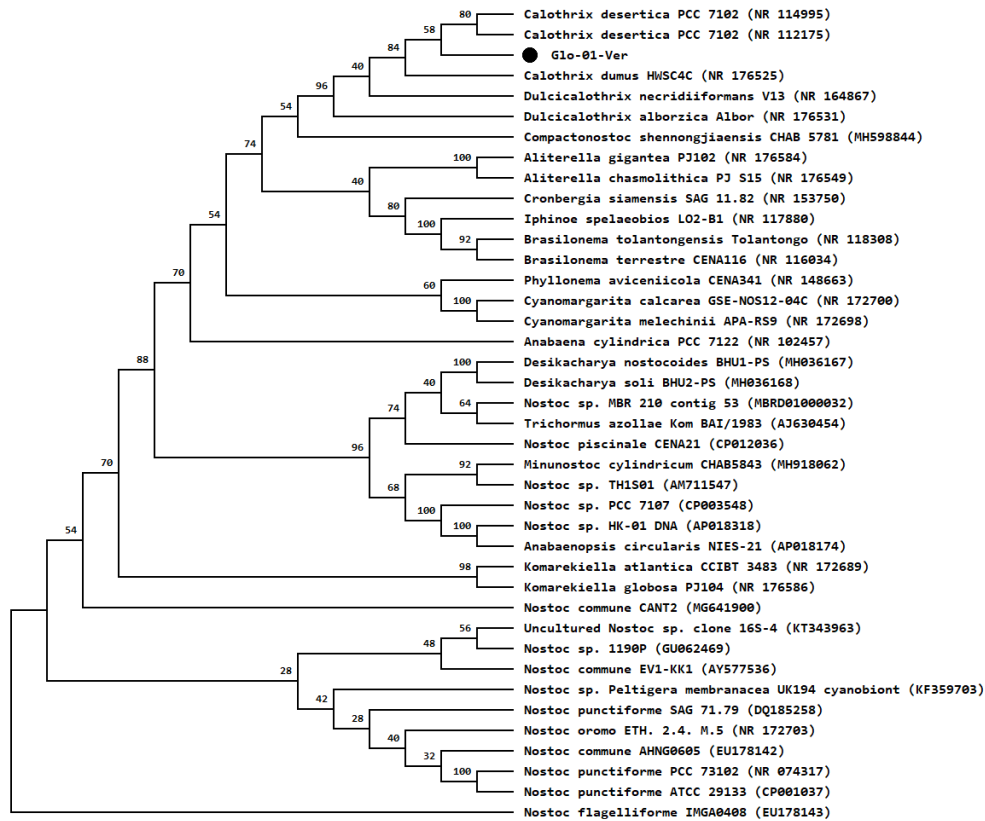
El material original fue recolectado el 5 de septiembre del 2017 por Macías López Felipe Arath. La bromelia se encontraba sobre un *Liquidambar styraciflua* a una altitud de 1300 m s.n.m. La Fig. 17 señala la cascada con referencias geográficas 19° 24' 5.58" N, 96° 59' 42.22" O.



**Figura 17.** Ubicación geográfica de la Cascada de Texolo, donde se recolectó *Nostoc* sp2. **Glo-01-Ver**. Imagen tomada con Google Earth.

**Parentesco genético:** La secuencia ARNr 16S (778 pb) de la cepa Glo-01-Ver. tiene una similitud con secuencias de *Nostoc oromo* (NR\_172703, 89.09%), *Cronbergia siamensis* (NR\_153750, 89.16%), *Brasilonema tolantogensis* (NR\_118308, 89.17%), *Aliterella gigantea* (NR\_176584, 89.19%), *Cyanomargarita calcarea* (NR\_172700, 89.49%), *Anabaena cylindrica* (NR\_102457, 89.74%), *Calothrix dumus* (NR\_176524, 90.64%), *Dulcicalothrix alborzica* (NR\_176531, 92.77%), *Calothrix desértica* (NR\_114995, 93.59%) y *Dulcicalothrix necridiiformans* (NR\_164867, 94.14%).

El árbol construido considerando el Bootstrap (50) del Análisis de Máxima Posibilidad de entre 40 secuencias (Fig. 18), agrupa la secuencia de Glo-01-Ver en un grupo conformado por las secuencias de *Dulcicalothrix*. Este parentesco se evidencia cuando se contrasta con secuencias de *Aliterella*, *Brasilonema Compactonostoc*, *Cronbergia* e *Iphinoe*.

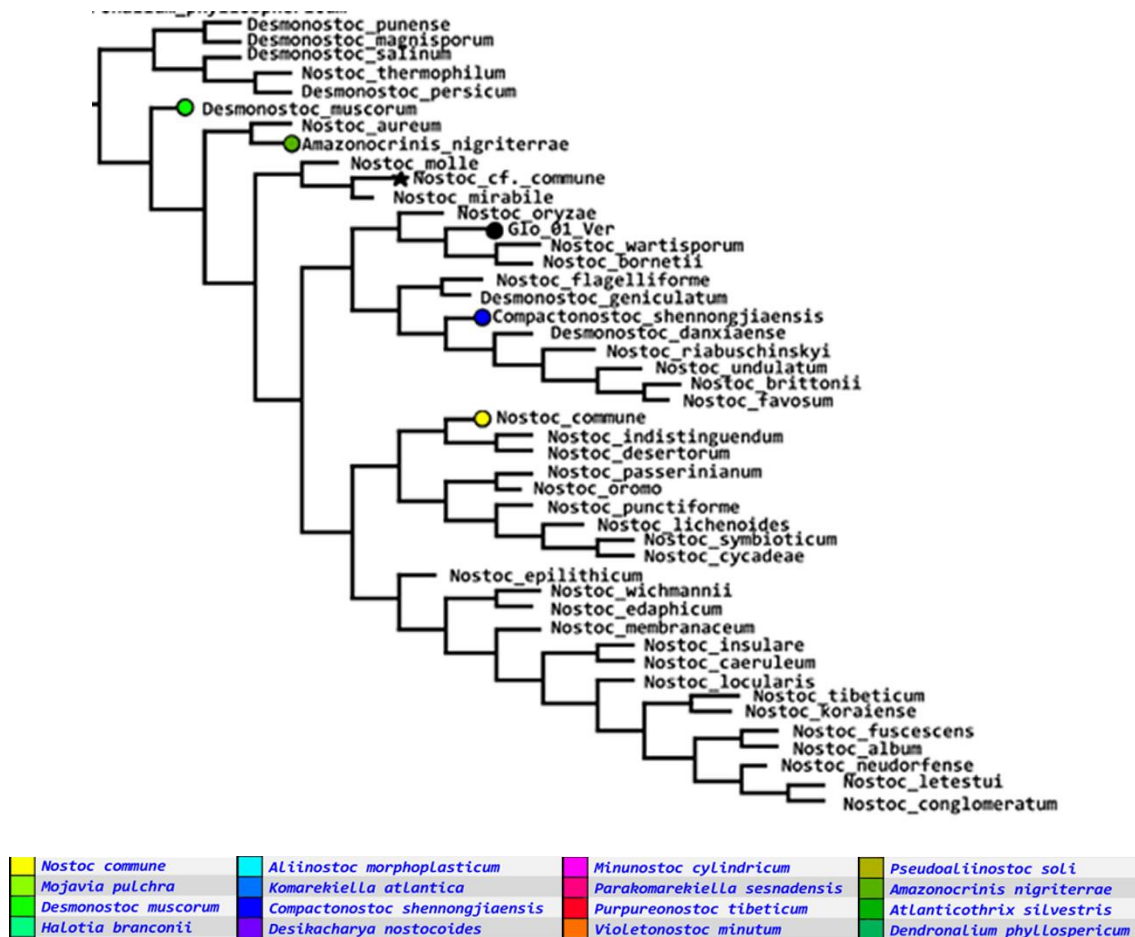


**Figura 18.** Árbol filogenético del Análisis de Máxima Posibilidad de la secuencia de **Glo-01-Ver** (•). La historia evolutiva se construyó considerando  $\approx 797$  pb, resultando en una distancia de 2.081 cambios de bases. Los valores en los nodos representan el soporte Bootstrap en porcentajes.

**Parentesco morfométrico:** Los dos Análisis de Evidencia Total calculados para optimizar estas observaciones (Figs. 6 y 7) ilustran como en una historia de ancestro descendencia demostrada por la secuencia a ARNr 16S de 41 secuencias (Tabla S4), las secuencias de material mexicano y la parsimonia de sus caracteres morfométricos (Tabla S1), puede variar a la hora de ilustrar las relaciones de parentesco genético, pero ser constante en sus relaciones morfométricas; aún cuando se varíe su ancestro y los árboles se dibujen con valores bajos de consistencia y/o retención.



La Fig. 19 es un acercamiento a la posición de Glo-01-Ver (\*) en la historia evolutiva más corta (Fig. 7).



**Figura 19.** Detalle a **Glo-01-Ver** (\*) en el clúster morfométrico evidenciado en un Análisis de Evidencia Total que considera a *Dendronalium phyllospericum* como *taxa* ancestral (Fig. 7).

De esta manera se pretende demostrar, con el uso de otro algoritmo y con una hipótesis de parentesco morfométrico calibrando una historia de 1.428 cambios de base por sitio (Fig. 19), que la cepa Glo-01-Ver resultó hermana a él clado que incluye a *Compactonostoc shennongjiaensis* y algunas especies de *Desmonostoc*.

**Parecidos potenciales:** Las especies cuya similitud osciló entre el 90.64 – 94.14%, no comparten región geográfica ni condiciones ambientales con la cepa Glo-01-Ver. Es decir: *Dulcicalothrix necridiiformans*, crece en un ambiente léntico oligotrófico en Asia meridional; *Calothrix desértica*, de un ambiente aéreo en el Matorral Bajo Tropical Andino chileno; *Dulcicalothrix alborzica* en un ambiente lóxico entre los Bosques Mixtos del Monte Elburz; y *Dulcicalothrix dumus*, de un sustrato artificial en las costas pantanosas de Florida. Mientras, la población mexicana crecía como fitotelmata en un Bosque veracruzano. Además, el método de Máxima Posibilidad la ubica entre en un clado hermano a *Compactonostoc shennongjiaensis* CHAB 5781, quien fue recolectado de muros rocosos húmedos en el Distrito forestal Shennongjia, China (Cai *et al.*, 2019b).

El hábitat de cada una de las especies mencionadas es indicado enseguida: *Dulcicalothrix necridiiformans* MCC 3314 fue recolectado como una colonia macroscópica sumergida en aguas someras de un estanque en una rancharía aislada de Shrirampur, India (Saraf *et al.*, 2019b). *Calothrix desértica* PCC 7102 fue recolectada de la fina arena en algún lugar de Antofagasta, Chile (Sihvonen *et al.*, 2007); *Dulcicalothrix alborzica* CCC13/87-b fue aislada de cantos rodados sumergidos en el río Atrak, Irán (Nowruzi & Shalygin, 2021). *Calothrix dumus* HWSC4C fue recolectado de lapidas de granito en el cementerio H. Warren Smith en Florida, Estados Unidos (Villanueva *et al.*, 2019).

Considerando lo calculado por el algoritmo de Máxima Posibilidad (Fig. 18). El género *Aliterella* originalmente fue reportado para las aguas de la plataforma continental al sur del Océano Atlántico, Brasil, y la turba de algas verdes en suelo ornitogénico en Arctowski, Antártica (Rigonato *et al.*, 2016); sin embargo, *Aliterella chasmolithica* PJ S15 crecía de manera casmoendolítica en rocas de granito en el Parque Nacional ‘Pan de Azúcar’ en el Desierto de Atacama, Chile (Jung *et al.*, 2020), y *Aliterella gigantea* PJ102 fue aislada de *Peltula capensis* (liquen) quien crecía en arenisca temporalmente sumergida en el lecho de un río inundado estacionalmente en la Reserva de la Biosfera Vhembe, Sudáfrica (Jung *et al.*, 2021). Al igual que *Brasilonema bromeliae* SPC951, Glo-01-Ver, fue recolectada como fitotelmata (Fiore *et al.*, 2007). Sin embargo, el material mexicano no presenta una morfología scytonematoide, además, *Brasilonema tolantogensis* Tolantongo fue aislada de paredes de piedra caliza cerca de escorrentías en ambientes subtropicales en Hidalgo, México (Becerra-Absalón *et al.*, 2013) y *Brasilonema terrestre* CENA116 crecía subaerofítica en concreto del parque estatal Ilha do Cardoso, Brasil (Sant’Anna *et al.*, 2011). *Cronbergia siamensis* SAG 11.82 ocurre en suelos húmedos y campos de arroz en Bangkok,

Tailandia (Komárek *et al.*, 2010) y este generó posee una morfología nostocóide como la cepa Glo-01-Ver. Por último, *Iphinoe spelaeobios* LO2-B1 fue aislado de una cueva e Grecia, y se trata de una especie filamentosa que desarrolla verdaderas ramificaciones (Lamprinou *et al.*, 2011).

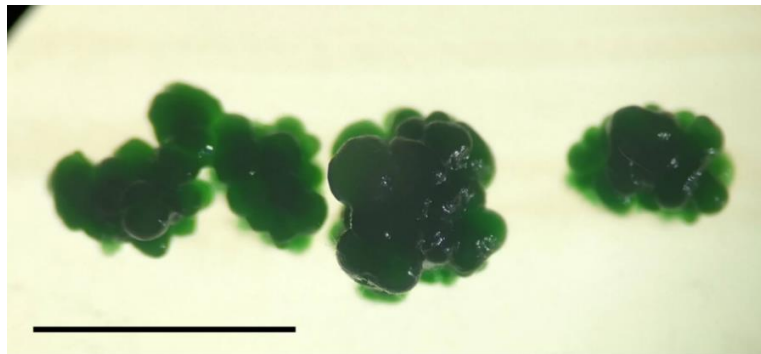
Por otro lado, el primer Análisis de Evidencia Total (Fig. 6) calcula que la cepa Glo-01-Ver resulta con más parsimonia a la morfometría de las especies: *Nostoc wartisporum* y *N. bornetii*, pero, sugiere que esta cepa podría resultar ser un clado distinto a la mayoría de las especies de la *Nostoc*-like taxa. Sin embargo, el segundo Análisis de Evidencia Total (Fig. 7) calcula que la cepa Glo-01-Ver resulta con mayor parsimonia a la morfometría de las especies: *Nostoc oryzae*, *N. wartisporum* y *N. bornetii*, pero, sugiere que esta cepa podría encontrarse en algun clado hermano a *Compactonostoc shennongjiaensis*.

*Nostoc bornetii* es una especie que se recolectó en suelos y entre musgos en la Antártida (Komárek, 2013), además de haberse reportado en manglares de Kerala, India (Arun & Tessy, 2022); *Nostoc oryzae* fue recolectada de campos de arroz en la India y Egipto (Komárek, 2013), además de haberse reportado en las aguas del lago Doiran en Grecia (Gkelis *et al.*, 2014); *N. wartisporum* fue obtenida de cultivos enriquecidos con suelo y agua de arrozales en Lucknow, India (Komárek, 2013), además de arrozales en Uttar Pradesh, India (Prasad & Mehrotra, 1980).

### ***Nostoc* sp<sub>3</sub>.**

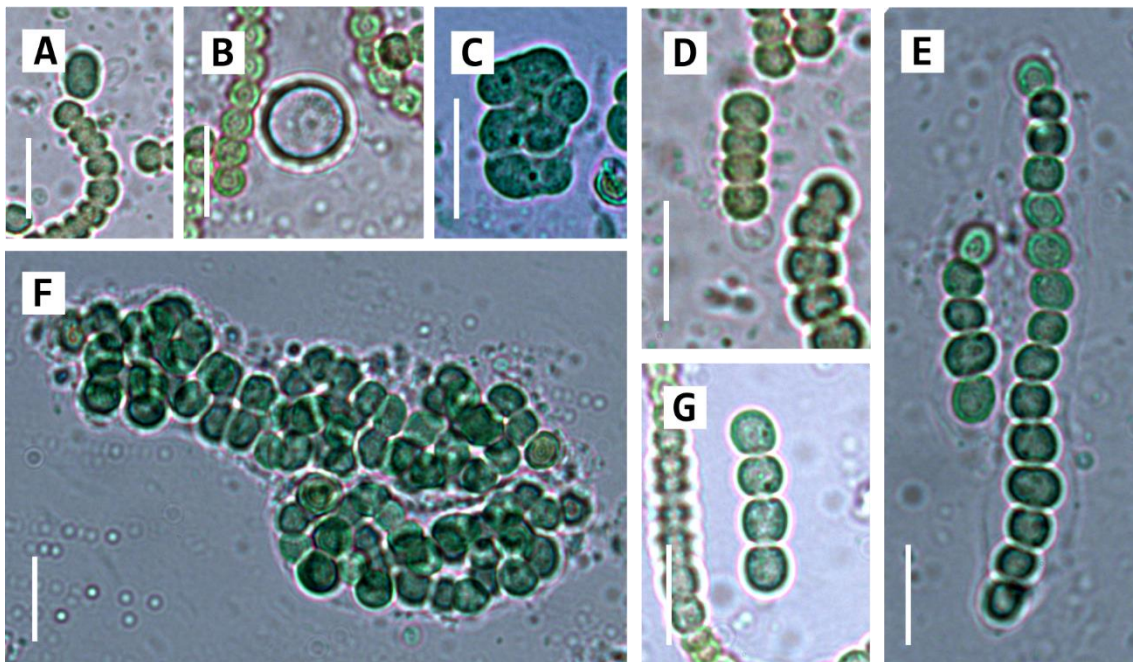
Vaucher ex Komarek 2013

**Código de Cultivo: POIzta6.0/** Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. Herbario IZTA.



**Figura 20.** Aspecto general del talo macroscópico de *Nostoc* sp<sub>3</sub>. **POIzta6.0** (Escala = 25 mm).

**Descripción:** En cultivos sólidos, de tres a cuatro semanas, se desarrollan colonias de apariencia inusual y color verde brillante (Fig. 20), donde los tricomas se distribuyen densamente compactados. Los tricomas presentan una vaina mucilaginosa (Fig. 21E), son heterocitados y tienen una apariencia moniliforme uniseriada e isopolar en sus distintos segmentos (Fig. 21G). Las células vegetativas tienen forma de barril de 3.33 - (3.84) - 4.24  $\mu\text{m}$ , ancho y de (2.42) 3.40 - 3.64  $\mu\text{m}$  de largo. Sus heterocitos son terminales (Fig. 21D), con forma de barril de 3.44 - (3.86) - 4.43  $\mu\text{m}$  de ancho y de 2.95 - (3.60) - 4.36  $\mu\text{m}$  de largo. Los acinetos son esféricos y/o elipsoides, de 2.22 - (3.70) - 4.81  $\mu\text{m}$  de ancho y de 2.59 - (3.70) - 6.66  $\mu\text{m}$  de largo (Fig. 21A). Se propaga a través de la división desigual de las células vegetativas (Fig. 21B).



**Figura 21.** Micrografías de *Nostoc* sp<sub>3</sub>. **POlza6.0.** A) Acineto unido a un tricoma, B) célula vegetativa grande atravesando una división desigual, C) resultado de la división desigual de una célula vegetativa grande, C) tricoma con heterocito terminal, E) tricoma moniliforme con tenue vaina, F) colonia no seriada y G) cadena de acinetos. Escala = 5  $\mu\text{m}$ .

**Hábitat:** Euaérea litofita en la superficie de una maceta de barro con una planta ornamental en el Km 17 de la carretera Chapala-Guadalajara, Jalisco.



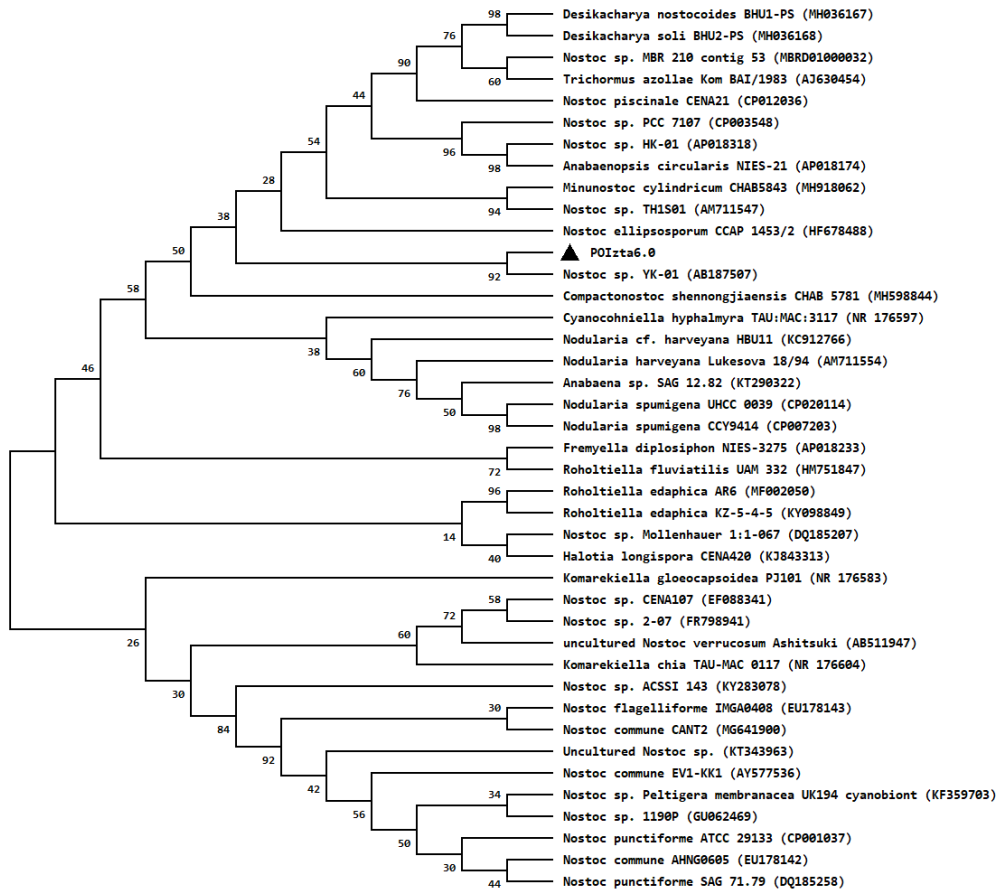
El material fue recolectado el 5 de octubre del 2021 en el estacionamiento del restaurante 'Birrierías Chololo', con referencias geográficas 20° 29' 4.97" N, 103° 16' 13.25" O (Figura 22), a una altitud de 1534 m s.n.m.



**Figura 22.** Ubicación geográfica del restaruante, donde fue recolectado *Nostoc* sp.  
**POLzta 6.0.** Imagen tomada con Google Earth.

**Parentesco genético:** La secuencia ARNr 16S (738 pb) de la cepa POLzta 6.0 tiene una similitud con secuencias de *Allinostoc morphoplasticum* (NR\_158066, 94.57%), *Komarekiella globosa* (NR\_176586, 94.57%), *Cyanocohniella rudolphia* (NR\_176566, 94.58%), *Pseudoallinostoc constrictum* (NR\_172583, 94.72%), *Desmonostoc lechanguense* (NR\_176568, 94.87%), *Anabaena cylindrica* (NR\_102457, 94.99%), *Dendronalium phyllospericum* (NR\_172569, 95.65%), *Cyanocohniella crotaloides* (NR\_176548, 95.80%), *Cyanocohniella hyphalmyra* (NR\_176597, 96.59%) y *Komarekiella chia* (NR\_176604, 97.44%).

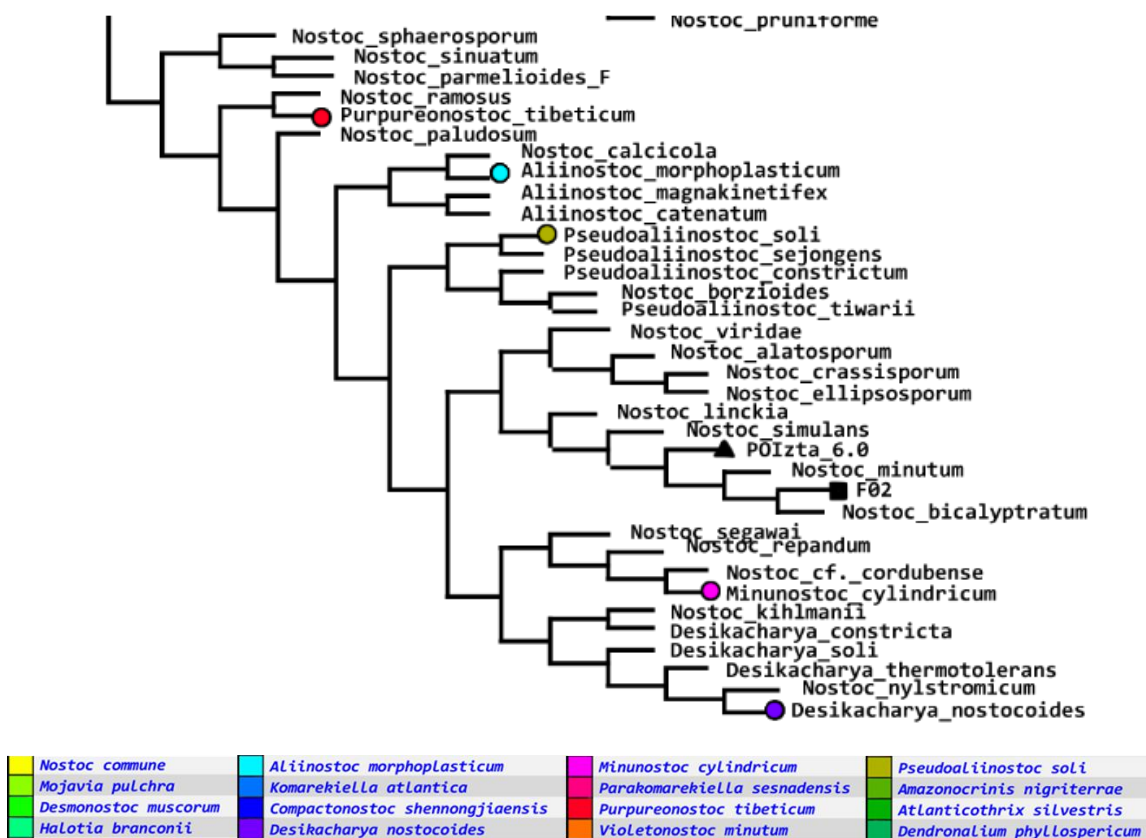
El árbol construido considerando el Bootstrap (50) del Análisis de Máxima Posibilidad de entre 40 secuencias (Fig. 23), demuestra que la secuencia de F02 es hermana de secuencias reportadas para *Anabaenopsis*, *Compactonostoc*, *Desikacharya*, *Minunostoc*, *Nostoc*, y/o *Trichormus*. Este parentesco se evidencia cuando se contrasta con secuencias de *Anabaena*, *Cyanocohniella*, y *Nodularia*.



**Figura 23.** Árbol filogenético del Análisis de Máxima Posibilidad de la secuencia de **POIzta 6.0** (▲). La historia evolutiva se construyó considerando  $\approx 750$  pb, resultando en una distancia de 1.689 cambios de bases. Los valores en los nodos representan el soporte Bootstrap en porcentajes.

**Parentesco morfométrico:** Los dos Análisis de Evidencia Total calculados para optimizar estas observaciones (Fig. 6 y 7) ilustran como en una historia de ancestro descendencia demostrada por la secuencia a ARNr 16S de 41 secuencias (Tabla S4), las secuencias de material mexicano y la parsimonia de sus caracteres morfométricos (Tabla S1), puede variar a la hora de ilustrar las relaciones de parentesco genético, pero ser constante en sus relaciones morfométricas; aun cuando se varíe su ancestro y los árboles se dibujen con valores bajos de consistencia y/o retención.

La Fig. 24 es un acercamiento a la posición de POIzta 6.0 (▲) en la historia evolutiva más corta (Fig. 7).



**Figura 24.** Detalle a **POIzta 6.0** (▲) en el clúster morfométrico evidenciado en un Análisis de Evidencia Total que considera a *Dendronalium phyllospericum* como *taxa* ancestral (Fig. 7).

De esta manera se pretende demostrar, con el uso de otro algoritmo y con una hipótesis de parentesco morfométrico calibrando una historia de 1.428 cambios de base por sitio (Fig. 24), que la cepa POIzta 6.0 resulta hermana al clado que incluye a *Minunostoc* y las *Desikacharya*; además de que, este parecido se comparte con las especies de *Aliinostoc* y *Pseudoaliinostoc*.

**Parecidos potenciales:** Las especies cuya similitud oscilo entre 97.44 – 95.65 % (*Komarekiella chia*, *Cyanocohniella hyphalmyra*, *Cyanocohniella crotaloides*, *Dendronalium phyllospericum*), no comparten región geográfica ni condiciones ambientales con la cepa mexicana POIzta 6.0. Es decir, las primeras son mediterráneas de ambientes terrestre, lénticos salobres y costeros. Y *D. phyllospericum* es del Bosque de Lluvia del Atlántico brasileño. Mientras la población mexicana estudiada crece sobre la superficie de un sustrato artificial de barro.

El hábitat de cada una de las especies mencionadas es indicado enseguida: *Komarekiella chia* TAU-MAC 0117 y *Cyanocohniella hyphalmyra* TAU-MAC 3117 fueron recolectadas del tapete microbótico epilítico en la superficie de sustrato calcáreo, cerca de una fuente de luz artificial, en la cueva terrestre Aghio Galas, en la isla de Chios, y de los bentos de un lago salobre de Kalochori, ambos en Grecia (Panou & Gkelis, 2022). *Cyanocohniella crotaloides* PJ S45 se encontraba desarrollando tapetes microbóticos en playas de arena fina en la isla Schiermonnikoog de Países Bajos (Jung *et al.*, 2020); y *Dendronalium phyllospericum* CENA369, sobre las hojas de *Euterpe edulis* (palma) en el parque estatal Serra do Mar de Picinguaba, Ubatuba, Brasil (Oliveira Alvarenga *et al.*, 2021).

Considerando lo calculado por el algoritmo de Máxima Posibilidad (Fig. 23). En particular, *Anabaenopsis circularis* NIES-21 se trata de una población japonesa de la que se conoce su genoma completo (Hirose *et al.*, 2021); además, es una cepa capaz de crecer y fijar nitrógeno en la oscuridad cuando se cultiva en medio glucosado libre de nitrógeno (Watanabe, 1967). *Compactonostoc shennongjiaensis* CHAB 5781, fue recolectado de muros rocosos húmedos en el Distrito forestal Shennongjia, China (Cai *et al.*, 2019b). POIzta 6.0 presenta el carácter de enrollarse, como lo hacen las especies del género *Desikacharya*; sin embargo, *Desikacharya nostocoides* fue reportado en los suelos cálidos del Bosque No Clasificado de Bhanpura, India (Saraf *et al.*, 2019a). A su vez, *Minunostoc cylindricum* se recolectó en las paredes rocosas húmedas de la Pequeña Área Escénica de Siete Hoyos en los Bosques de Frondosas Mixtas en la provincia Guizhou de China; pero este género y su especie se distinguen por no desarrollar heterocitos y acinetos, a diferencia de POIzta 6.0 (Cai *et al.*, 2019a). Las secuencias del género *Nostoc* que resultan hermanas a la secuencia parcial de POIzta 6.0 incluyen material registrado como *N. piscinale* CENA21, el cual fue recolectado de los suelos inundables de la isla Mari-Mari del río Solimões en la cuenca del Amazonas en Brasil (Fiore *et al.*, 2005) y se conoce su genoma completo (Leão *et al.*, 2016); además de cinco secuencias registradas como especie de *Nostoc*: HK-01, MBR 210, PCC 7101, TH1S01 y YK-01. La primera fue recolectada en el Campus del Instituto de Tecnología 'Himeji' en 'Harima' la Ciudad Jardín de las Ciencias, Japón (Kato *et al.*, 2003), se conoce su genoma completo (Hirose *et al.*, 2021) y ha demostrado conservar su viabilidad posterior a tres años, con y sin luz solar, dentro y fuera de la Estación Espacial Internacional (Tomita-Yokotani *et al.*, 2021); la segunda proviene de lagos tropicales de aguas dulces en Singapur y se conoce su genoma completo (Te *et*



*al.*, 2016); de la tercera también se conoce su genoma completo (Gugger *et al.*, 2012) y proviene de un estanque poco profundo de la península de Point Reyes en Estados Unidos (Rippka, 1979); mientras que la cuarta, proviene de un campo de arroz no inundado por agua en Thailandia (Papaefthimiou *et al.*, 2008); por último, la quinta, es japonesa (Takaichi *et al.*, 2005). En particular, *Trichormus azollae* Kom BAI/1983 es de origen incierto (Rajaniemi *et al.*, 2005).

*Anabaena* sp. SAG 12.82 fue recolectada de una duna de arena húmeda en la Isla Föhr en Alemania (Kozlíková-Zapomělová *et al.*, 2016). *Cyanocohniella hyphalmyra* TAU-MAC 3117 fue recolectada de los bentos de un lago salobre de Kalochori, Grecia (Panou & Gkelis, 2022). *Nodularia harveyana* Lukesova 18/94 proviene de una pradera salina en Sedlec, República Checa (Papaefthimiou *et al.*, 2008); *Nodularia spumigena* CCY9414 fue aislada de muestras recolectadas en la superficie de las aguas en el mar de Bornholm, Dinamarca (Voß *et al.*, 2013); *Nodularia* cf. *harveyana* HBU11 proviene del suelo laterítico a la orilla de un abrevadero en el Parque Nacional 'Tsavo West', Kenia (Řeháková *et al.*, 2014); y *Nodularia spumigena* UHCC 0039 fue aislada del Golfo de Finlandia (Teikari *et al.*, 2018).

Por otro lado, los dos Análisis de Evidencia Total (Fig. 18 y 19) calculan que la cepa POLzta 6.0 resulta parsimoniosa a la morfometría de las especies: *Nostoc linckia*, *N. simulans*, *N. minutum* y *N. bycaliptratum*; además, sugieren que estas especies podrían distribuirse entre las *Aliinostoc*, *Desikacharya*, *Minunostoc* y *Pseudoaliinostoc*; sin embargo uno considera que todas estas especies podrían confundirse con *Purpurenostoc tibeticum* (Fig. 18), y el otro considera que podrían confundirse con *Nostoc paludosum* (Fig. 19).

*Nostoc bycaliptratum* es una especie que se recolecto en las calizas de los manantiales de recreo en Yunnan, China (Komárek, 2013); *Nostoc linckia* es una especie que se ha encontrado creciendo en los afluentes de fábricas textiles en Prem Nagar, India (Mona *et al.*, 2011), además de piletas de secado en América del Norte (Komárek & Johansen, 2015); *Nostoc minutum* es una especie que ha sido reportada en Argentina (Ferrari, 2004); se ha reportado a *Nostoc paludosum* en pantanos del Ártico Americano (Komárek & Johansen, 2015); *Nostoc simulans* se recolecto creciendo en las cavidades de los muros en las casas de Maricao, Puerto Rico (Komárek, 2013); y *Purpurenostoc tibeticum* fue aislado de los suelos húmedos del Tibet, China (Cai *et al.*, 2020).

## CONCLUSIÓN

La comparación entre los métodos morfológico y molecular para la discriminación taxonómica de una cianobacteria nostocoide corrobora que todas las poblaciones comparten una similitud global que no permite distinguirla entre ellas.

Los aislamientos del material biológico permitieron la caracterización morfológica y molecular de diversos representantes. Algunas poblaciones crecen en consorcios que no pueden ser tratados a través de técnicas moleculares simples.

La Faja Volcánica Transmexicana es rica en cianobacterias de aspecto nostocoide que se desarrollan en hábitos lóuticos, fitotelmatas y epilíticos.

Las cianobacterias de aspecto nostocoide aisladas de México exhiben ciclos de vida polimórficos y la descripción a detalle del desarrollo de cada uno conlleva un monitoreo específico que va más allá de los propósitos de este documento. Esto indica la necesidad de futuras investigaciones que apunten a la determinación taxonomica polifásica del material mexicano.

## LITERATURA CITADA

- Allen M. M. (1968). Simple Conditions for Growth of Unicellular Blue-Green Algae on Plates. *Journal of Phycology* 4: 1-4.
- Allen M. M. & Stainer R. Y. (1968). Selective Isolation of Blue-green Algae from Water and Soil. *The Journal of General Microbiology* 51: 203-209.
- APHA (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (23th ed.) USA. American Public Health Association.
- Arun T. R. & Tessy P. P. (2022). Mangrove-Associated Cyanobacteria of *Nostoc* spp. (Nostocales, Nostocaceae) from Kerala State, India. *International Journal on Algae* 24(2): 145-158.
- \*\*Bagchi S. N., Dubey N. & Singh P. (2017). Phylogenetically distant clade of *Nostoc*-like taxa with the description of *Aliinostoc* gen. nov. and *Aliinostoc morphoplasticum* sp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 67(9): 3329-3338.
- Bakus G. J. (2007). *Quantitative Analysis of Marine Biological Communities. Field Biology and Environment*. (ed.) USA. Wiley-Interscience.
- Bánki O., Roskov Y., Döring M., Ower G., Vandepitte L., Hobern D., Remsen D., Schalk P., DeWalt R. E., Keping M., Miller J., Orrell T., Aalbu R., Adlard R., Adriaenssens E. M., Aedo C., Aesch E., Akkari N., Alfenas-Zerbini P., *et al.* (2022). Catalogue of Life Checklist (Version 2022-07-12). Catalogue of Life. <https://doi.org/10.48580/dfpz>
- Becerra-Absalon I. & Tavera R. (2009). Life cycle of *Nostoc sphaericum* (Nostocales, Cyanoprokaryota) in tropical wetlands. *Nova Hedwigia* 88: 117-128.
- Becerra-Absalon I., Buhse T., Polanco C. & Tavera R. (2012). Effect of Nitrogen and Periphyton Extract on the Grow of *Nostoc sphaericum* in Cultures. *International Scholarly Research Network [ISRN] Ecology* 2012: 935476.
- Becerra-Absalon I., Rodarte B., Ososrio K., Alba-Lois L., Segal-Kischinevsky C. & Montejano G. (2013). A new species of Brasilonema (Scytonemataceae, Cyanoprokaryota) from Tolantongo, Hidalgo, Central Mexico. *Fottea, Olomouc* 13(1): 25-38.
- Becerra-Absalon I., Muñoz-Martin M. Á. Montejano G. & Mateo P. (2019). Differences in the Cyanobacterial Community Composition of Biocrust From

- the Drylands of Central Mexico. Are There Endemic Species? *Frontiers in Microbiology* 10: 937.
- Bellinger E. G. & Sigeo D. C. (2010). *Freshwater Algae. Identification and Use as Bioindicators*. (ed.) UK: Wiley-Blackwell.
- Boden J. S., Konhauser K. O., Robbins L. J. & Sánchez-Baracaldo P. (2021). Timing the evolution of antioxidant enzymes in cyanobacteria. *Nature Communications* (12): 4742.
- \*\*Cai F. & Li R. (2020). *Purpureonostoc*, a new name for a recently described genus of Nostoc-like cyanobacteria. *Fottea, Olomouc* 20(2): 111.
- \*\*Cai F., Peng X. & Li R. (2020). *Violetonostoc minutum* gen. et sp. nov. (Nostocales, Cyanobacteria) from a rocky substrate in China. *Algae* 35(1): 1-15.
- \*\*Cai F., Yang Y., Wen Q. & Li R. (2018). *Desmonostoc danxiaense* sp. nov. (Nostocales, Cyanobacteria) from Danxia mountain in China based on polyphasic approach. *Phytotaxa* 367 (3): 233-244.
- \*\*Cai F., Li X., Geng R., Peng X. & Li R. (2019a). Phylogenetically distant clade of *Nostoc*-like taxa with the description of *Minunostoc* gen. nov. and *Minunostoc cylindricum* sp. nov. *Fottea, Olomouc* 19(1): 13-24.
- \*\*Cai F., Li X., Yang Y., Jia N., Huo D. & Li R. (2019b). *Compactonostoc shennongjiaensis* gen. et sp. nov. (Nostocales, Cyanobacteria) from a wet rocky wall in China. *Phycologia* 58: 200-210.
- \*\*Cai F., Wang Y., Yu., Wang J., Peng X. & Li. R. (2020). Proposal of *Purpurea* gen. nov. (Nostocales, Cyanobacteria), a novel cyanobacterial genus from wet soil samples in Tibet, China. *Fottea, Olomouc* 20(1): 86-97.
- \*\*Cai F., Yu G., Liu Y., Sun Y. & Li R. (2021). Description of two new species of *Nostoc* from China based on the polyphasic approach. *Fottea, Olomouc* 21(2): 259-271.
- Carmona Jiménez J., Ramírez Rodríguez R., Bojorge-García M. G., González Hidalgo B. & Cantoral-Uriza E. A. (2016). Estudio del valor indicador de las comunidades de algas bentónicas: Una propuesta de evaluación y aplicación en el río Magdalena, Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 32(2): 139-152.
- Carmona-Jiménez J. & Caro-Borrero A. (2017). The last peri-urban rivers of the Mexico Basin: establishment of potential reference conditions through the

evaluation of ecological quality and biological indicators. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88: 425-436.

Cartajena Alcántara M. G., Carmona Jiménez J. & Pero Úrizar E. (2020). Aspectos ecológicos, taxonómicos y de distribución de cianobacterias bentónicas en cinco ríos de la región central de México. *Acta Botanica Mexicana* 127: e1639

CONABIO [Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad] (2008). Algas, en Ocegueda S. y Llorente-Bousquets J. (coords.) *Catálogo taxonómico de especies de México, en Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO. México, CD1.

Cordeiro R., Luz R., Vasconcelos V., Goncalves V. & Fonseca A. (2020). Cyanobacteria Phylogenetic Studies Reveal Evidence for Polyphyletic Genera from Thermal and Freshwater Habitats. *Diversity* 12: 298.

Davydov D. (2021). Cyanobacterial diversity of Svalbard Archipelago. *Polar Biology* 44: 1967-1978.

\*\*de Alvarenga L. V., Vaz M. G. M. V., Genuário D. B., Esteves-Ferreira A. A., Almeida A. V. M., de Castro N. V., Lizieri C., Souza J. J. L. L., Schaefer C. E. G. R., Nunes-Nesi A., & Araújo W. L. (2018). Extending the ecological distribution of *Desmonostoc* genus: proposal of *Desmonostoc salinum* sp. nov., a novel Cyanobacteria from a saline–alkaline lake. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 68: 2770-2782.

Evans R. D. & Johansen J. R. (1999). Microbiotic Crust and Ecosystem Processes. *Critical Reviews in Plant Sciences* 18(2): 183-225.

Farjon A. (2017). *A Handbook Of The World's Conifers. Volume 1.* (2nd ed.) USA: Brill.

Ferrari S. G., Guzmán G. C., Silva P. G., Alcaráz L. E., Silva H. J. & González D. M. (2004). Captación de Cadmio por Biomasa Libre o Inmovilizada de *Nostoc minutum* (Cianobacteria filamentosa). *Acta Toxicológica Argentina* 12(1): 19-22.

Felsenstein J. (1985). Confidence limits on phylogenies: An approach using the bootstrap. *Evolution* 39: 783-791.

Fiore M. de F., Neilac B. A., Copp J. N., Rodrigues J. L. M., Tsaia S. M., Lee. H. & Trevors J. T. (2005). Characterization of Nitrogen-fixing cianobacteria in the Brazilian Amazon floodplain. *Water Research* 39(20): 5017-5026.

- Fiore M. F., Sant'Anna C. L., de Paiva Azevedo M. T., Komárek J., Kaštovsky J., Sulek J. & Sturion Lorenzi A. (2007). The cyanobacterial genus *Brasilonema*, gen. nov., a molecular and phenotypic evaluation. *Journal of Phycology* 43(4): 789-798.
- Gaucher C., Boggiani P. C., Sprechmann P., Sial A. N. & Fairchild T. (2003). Integrated correlation of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado and Corrubá Groups (Uruguay and Brazil): palaeogeographic, paleoclimatic and paleobiologic implications. *Precambrian Research* 120: 241-278.
- \*\*Genuário D. B., Marc M. G., Vaz al V., Hentschke G. S., Sant'Anna C. L. & Fiore M. F. (2015). *Halotia* gen. nov., a phylogenetically and physiologically coherent cyanobacterial genus isolated from marine coastal environments. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 65: 663-675.
- Gkelis S., Fernández Tussy P. & Zaoutsos N. (2014). Isolation and preliminary characterization of cyanobacteria strains from freshwaters of Greece. *Open Life Sciences* 10: 52-60.
- Goethe J. W. von (2009). *The Metamorphosis of Plants*. (ed.) Massachusetts Institute of Technology: Spain.
- Goloboff P. A., Mattoni C. I. & Quinteros A. S. (2006). Continuous characters analyzed as such. *Cladistics* 22(6): 589-601.
- Goloboff P. A., Farris J. S. & Nixon K. C. (2008). TNT, a free program for phylogenetic analysis. *Cladistics* 24(5): 774-786.
- Goloboff P. A. & Catalano S. A. (2016). TNT version 1.5, including a full implementation of phylogenetic morphometrics. *Cladistics* 32(3): 221-238.
- Gugger M., Coursin T., Rippka R., Tandeau De Marsac N., Huntemann M., Wei C.-L., Han J., Detter J.C., Han C., Tapia R., Davenport K., Daligault H., Erkkila T., Gu W., Munk A.C.C., Teshima H., Xu Y., Chain P., Chen A., Krypides N., Mavromatis K., Markowitz V., Szeto E., Ivanova N., Mikhailova N., Ovchinnikova G., Pagani I., Pati A., Goodwin L., Peters L., Pitluck S., Woyke T. & Kerfeld C. (2012). Finished genome of *Nostoc* sp. PCC 7107. *Unpublished*.
- Guiry M. D. in Guiry M. D. & Guiry G. M. (2022). *AlgaeBase*. - World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>

- Haeckel E. (2018). *The History of Creation. Or the Development of the Earth and its Inhabitants by the Action of Natural Causes, Volume 1.* (ed.) Routledge: USA.
- Hall T. A. (1999). BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series* 41: 95-98.
- Harayama S. & Kasai H. (2006). Bacterial Phylogeny Reconstruction from Molecular Sequences. In: E. Stackebrandt (ed). *Molecular Identification, Systematics, and Population Structure of Prokaryotes.* Germany. Springer. 105-140.
- Hauer T. & Komárek J. (2021). *CyanoDB 2.0* - On-line database of cyanobacterial genera. - World-wide electronic publication, Univ. of South Bohemia & Inst. of Botany AS CR. <http://www.cyanodb.cz>.
- \*\*Hentschke G. S., Johansen J. R., Pietrasiak N., Rigonato J., Fiore M. F. & Sant'Anna C. L. (2017). *Komarekiella atlantica* gen. et sp. nov. (Nostocaceae, Cyanobacteria): a new subaerial taxon from the Atlantic Rainforest and Kauai, Hawaii. *Fottea, Olomouc* 17(2): 178-190.
- Hirose Y., Ohtsubo Y., Misawa N., Yonekawa C., Nagao N., Shimura Y., Fujisawa T., Kanesaki Y., Katoh H., Katayama M., Yamaguchi H., Yoshikawa H., Ikeuchi M., Eki T., Nakamura Y. & Kawachi M. (2021). Genome sequencing of the NIES Cyanobacteria collection with a focus on the heterocyst-forming clade. *DNA Research* 28(6): 1-11.
- \*\*Hrouzek P., Lukešová A., Mareš J. & Ventura S. (2013). Description of the cyanobacterial genus *Desmonostoc* gen. nov. including *D. muscorum* comb. nov. as a distinct, phylogenetically coherent taxon related to the genus *Nostoc*. *Fottea, Olomouc* 13(2): 201-213.
- Husson, J.P. (1993). La poesía quechua prehispánica: Sus reglas, sus categorías, sus temas, a través de los poemas transcritos por Waman Puma de Ayala. *Revista de Crítica Literaria Latinoamericana* 37: 63-85
- Ibarra-Gallardo C. E. & Novelo E. (2018). Algas y cianoprocariontes epilíticos de la Zona Arqueológica de Yaxchilán, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 89: 590-603.
- Joneson S. & O'Brien H. (2017). A molecular investigation of free-living and lichenized *Nostoc* sp. and symbiotic lifestyle determination. *The Bryologist* 120(4): 371-381.

- Jung P., Mikhailyuk T., Emrich D., Baumann K., Dultz S. & Büdel B. (2020). Shifting Boundaries: Ecological and Geographical Range extension Based on Three New Species in the Cyanobacterial Genera *Cyanocohniella*, *Oculatella*, and, *Aliterella*. *Journal of Phycology* 56(5): 1216-1231.
- Jung P., Brust K., Schultz M., Büdel B., Donner A. & Lakatos M. (2021). Opening the Gap: Rare Lichens With Rare Cyanobionts – Unexpected Cyanobiont Diversity in Cyanobacterial Lichens of the Order Lichinales. *Frontiers in Microbiology* 12: 728378.
- Jungblut A.-D., Hawes I., Mountfort D., Hitzfeld B., Dietrich D. R., Burns B. P. & Neilan B. A. (2005). Diversity within cyanobacterial mat communities in variable salinity meltwater ponds of McMurdo Ice Shelf, Antarctica. *Environmental Microbiology* 7(4): 519-529.
- \*\*Kabirataj S., Nematzadeh G. A., Talebi A. F., Saraf A., Suradkar A., Tabatabaei M. & Singh P. (2020). Description of novel species of *Allinostoc*, *Desikacharya* and *Desmonostoc* using a polyphasic approach. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 70: 3413-3426.
- Kant R., Sarma K., Saini A., Singh J., Ziyaul N., & Kumar S. (2020). Diversity of the *Nostoc* Vaucher (Nostocales, Cyanoprokaryota) from Tripura, India. *The Journal of Indian Botanical Society* 10(1&2): 16-29.
- Kaštovský J., Berrendero Gomez E., Hladil J. & Johansen J. R. (2014). *Cyanocohniella calida* gen et sp. nov. (Cyanobacteria: Aphanizomenonaceae) a new cyanobacterium from the thermal springs from Karlovy Vary, Czech Republic. *Phytotaxa* 181(5): 279-292
- Kato H., Shiga Y., Nakahira Y. & Ohmory M. (2003). Isolation and Characterization of a Drought-Tolerant Cyanobacterium, *Nostoc* sp. HK-01. *Microbes and Environments* 18(2): 82-88.
- Klingenberg C. P. & Gidaszewski N. A. (2010). Testing and Quantifying Phylogenetic Signals and Homoplasy in Morphometric Data. *Systematic Biology* 59(3): 245-261.
- Kaufman L. & Rousseeuw P. J. (2005). *Findings groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis.* (ed.) USA: Wiley-Interscience.
- Komárek J., Zapomělová E. & Hindák F. (2010). *Cronbergia* gen. nov., a new cyanobacterial genus (Cyanophyta) with a special strategy of heterocyst formation. *cCryptogamie, Algologie* 31 (3): 321-341.



- \*\*Komárek J. (2013). *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Bd. 19/3: Cyanoprokaryota 3. Teil / 3rd part: Heterocytous Genera* (ed.) Germany: Springer.
- Komárek J. (2016). A polyphasic approach for the taxonomy of cyanobacteria: principles and applications. *European Journal of Phycology*, 51(3): 346-353.
- Komárek J. (2018). Several problems of the polyphasic approach in the modern cyanobacterial system. *Hydrobiologia* 811: 7-17.
- Komárek J. & Johansen (2015). Chapter 4. Filamentous Cyanobacteria. In Wehr J. D., Sheath R. G., & Kociolek J. P. (ed.) *Freshwater Algae of North America. Ecology and Classification* (pp. 135-235). USA. Academic Press.
- Komárek J., Kaštovský J., Mareš J., & Johansen J. R. (2014). Taxonomic classification of cyanoprokaryotes (cyanobacterial genera) 2014, using a polyphasic approach. *Preslia* 86: 295-335.
- Kozlíková-Zapomělová E., Chatchawan T., Kaštovský J. & Komárek J. (2016). Phylogenetic and taxonomic position of the genus *Wollea* with the description of *Wollea salina* sp. nov. (Cyanobacteria, Nostocales). *Fottea, Olomouc* 16(1): 43-55.
- Kumar S., Stecher G., Li M., Knyaz C. & Tamura K. (2018). MEGA X: Molecular Evolutionary Genetics Analysis across computing platforms. *Molecular Biology and Evolution* 35:1547-1549.
- Lamprinou V., Hernández-Mariné M., Canals T., Kormas K., Economou-Amilli A. & Pantazisou A. (2011). Morphology and molecular evaluation of *Iphinoe spelaebios* gen. nov., sp. nov. and *Loriellopsis cavernicola* gen. nov., sp. nov., two stigonematalean cyanobacteria from Greek and Spanish caves. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 61(12): 2907-2915.
- Lazaroff N. (1966). Photoinduction and photoreversal of the nostocacean developmental cycle. *Journal of Phycology* 11(1): 7-17.
- Leão T., Guimarães P. I., Costa de Melo A. G., Jucá Ramos R. T., Leão P. N., Silva A., Fatima Fiore M., & Cruz Schneider M. P. (2016). Draft Genome Sequence of the N<sub>2</sub>-fixing Cyanobacterium *Nostoc pscinale* CENA21, Isolated from the Brazilian Amazon Floodplain. *Genome Announcements* 4(2): e00189-16.
- \*\*Lee N.J., Bang S.D., Kim T., Ki J.S., & Lee O.M. (2021). *Pseudoaliinostoc sejongens* gen. & sp. nov. (Nostocales, Cyanobacteria) from floodplain soil of

- the Geum River in Korea based on a polyphasic approach. *Phytotaxa* 472(1): 55-70.
- Li N. Li Z., Zhao S., Ma H., Zhang W., Kang Z., ZHU M., Wang Z., & He H. (2021)9 . Effect of *Nostoc commune* on Gelation and Rheological Properties of Chicken Breast Meat Batters. *Shipin Kexue/Food Science* 42(2): 53-59.
- Liu D., Liberton., Hendry J. I., Aminian-Dehkordi J., Maranas C. D. & Pakrasi H. B. (2021). Engineering biology approaches for food and nutrient production by cyanobacteria. *Current Opinion in Biotechnology* 67: 1-6.
- Lyra C., Suomalainen S., Gugger M., Vezie C., Sundman P., Paulin. & Sivonen K. (2001). Molecular characterization of planktic cyanobacteria of *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis* and *Planktothrix* genera. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 51: 513-526.
- Maddison W. P. & Maddison D.R. (2021). *Mesquite: a modular system for evolutionary analysis*. Version 3.70. <http://www.mesquiteproject.org>
- Malar C. M., Krüger M., Krüger C., Wang Y., Etajich J. E. Keller J., Chen E. C. H., Yildir G., Villeneuve-Laroche M., Roux C., Delauxx P.-M. & Corradi N. (2021). The genome of *Geosiphon pyriformis* reveals ancestral traits linked to the emergence of the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Current Biology* 31: 1570-1577.
- Margulis L. & Chapman M. J. (2009). *Kingdoms & Domains: An Illustrated Guide to the Phyla of Life on Earth*. (4th ed.) USA: W. H. Freeman and Company.
- Mateo P., Perona E., Berrendero E., Leganés F., Martín M. & Golubić S. (2011). Life cycle as a stable trait in the evaluation of diversity of *Nostoc* from biofilms in rivers. *FEMS Microbiology Ecology* 76(2): 185-198.
- \*\*Mesfin M., Johansen J. R., Pietrasiak N., & Baldarelli L. M. (2020). *Nostoc oromo* sp. nov. (Nostocales, Cyanophyceae) from Ethiopia. a new species based on morphological and molecular evidence. *Phytotaxa* 433(2): 81-93.
- \*\*Miscoe L. H., Johansen, J. R., Vaccarino, M. A., Pietrasiak, N. & Sherwood, A. R. (2016). The diatom flora and cyanobacteria from caves on Kauai, Hawaii. II. Novel Cyanobacteria. From Caves On Kauai, Hawaii. *Bibliotheca Phycologica* 120: 75-152.
- Mishra D., Saraf A., Kumar N., Pal S. & Singh P. (2021). Issues in cyanobacterial taxonomy: comprehensive case study of unbranched, false branched and true branched heterocystous cyanobacteria. *FEMS Microbiology Letters* 368: fnab005.

- Mona S., Kaushik A., & Kaushik C. P. (2011). Hydrogen production and metal-dye bioremoval by *Nostoc linkia* strain isolated from textile mill oxidation pond. *Bioresource Technology* 102(3): 3200-3205.
- Montejano-Zurita G. & González-González J. (1981). Notas sobre la variación y ciclos de vida de *Nostoc microscopicum* Carmichael. *Phycologia Latinoamericana* 1: 47-59.
- Nabout J. C., Rocha B. da S., Carneiro F. M. & Sant' Anna C. L. (2013). How many species of Cyanobacteria are there? Using a discovery curve to predict the species number. *Biodiversity and Conservation* 22: 2907-2918.
- Naef A. (1972). Cephalopoda. *Fauna und Flora des Golfes von Neapel und der Angrenzenden Meeres-Abschnitte*, Monograph 35, Part I, [Vol I], Fascicle I. Smithsonian Institution Libraries, Washington, DC.
- Nakazawa H. (2018). *Darwinian Evolution of Molecules. Physical and Earth-Historical Perspective of the Origin of Life* (ed.) Singapore: Springer.
- Novelo E. (2008). *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 90. Cyanoprokaryota J. Komárek*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. Departamento de Botánica: México.
- Nowruzi B. & Shalygin S. (2021). Multiple phylogenies reveal a true taxonomic position of *Dulcicalothrix alborzica* sp. nov. (Nostocales, Cyanobacteria). *Fottea, Olomouc* 21(2): 235-246.
- Nuñez Márquez I. G. & Reyes González M. E. (1995). *Contribución al conocimiento del fitoplancton del lago de Chapala, Jalisco, México, durante el periodo de febrero a mayo de 1989, 90 y 91* (tesis de licenciatura). Universidad de Guadalajara. Centro universitario de ciencias biológicas y agropecuarias. División de ciencias biológicas y Ambientales. México
- Estudio de la diversidad de organismos fotosintéticos en biocostras de suelos desérticos de San Luis Potosí* (tesis de maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. Posgrado en Ciencias en Biología Molecular. México.
- Obrig T. G., Culp W. J., McKeehan W. L., & Hardesty B. (1971). The Mechanism by which Cycloheximide and Related Glutarimide Antibiotics Inhibit Peptide Synthesis on Reticulocyte Ribosomes. *The Journal of Biological Chemistry* 246(1): 174-181.
- Ochman H., Elwyn S. & Moran N. A. (1999). Calibrating bacterial evolution. *PNAS* 96(22): 12638-12643.

- Oliva Martínez M. G. & Garduño Solórzano G. (2017). *Cianobacterias. Cyanobacteria, Cyanoprokaryota*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala: México.
- \*\*Oliveira Alvarenga D., Dini Andreote A. P., Zanini Branco L. H., Delbaje E., Cruz R. B., de Mello Varani A. & Fiore M. F. (2021). *Amazonocrinis nigriterrae* gen. nov., sp. nov., *Atlanticothrix silvestris* gen. nov., sp. nov. and *Dendronalium phyllosphericum* gen. nov., sp. nov., nostocacean cyanobacteria from Brazilian environments. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 71: 3329-3338.
- Ortega, M. (1972). Estudio de las algas comestibles del Valle de México. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 14: 85-97.
- Ortiz-Burgos S. (2016). Shannon-Weaver Diversity Index. In Kennish M. J. (ed). *Encyclopedia of Estuaries* (pp. 572). USA. Springer.
- Panou M. & Gkelis S. (2022). Unravelling unknown cyanobacteria diversity linked with HCN production. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 166: 107322.
- Papaefthimiou D., Hrouzek P., Mugnai M. A., Lukesova A., Turicchia S., Rasmussen U. & Ventura S. (2008). Differential patterns of evolution and distribution of symbiotic behaviour in nostocacean cyanobacteria. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 58: 553–564.
- Paterson C. (1988). Homology in Classical and Molecular Biology. *Molecular Biology and Evolution* 5(6): 603-625.
- Pérez G., Cerecetto V. & Irisarri P. (2020). Potencial cyanobacterial inoculants for rice described from a polyphasic approach. *Agrociencia Uruguay* 24(2): 52.
- Piccardi R., Frosini A., Tredici M. R. & Margheri M. C. (2000). Bioactivity in free-living and symbiotic cyanobacteria of the genus *Nostoc*. *Journal of Applied Phycology* 12: 543-547.
- Potts M. (1997). Etymology of the Genus Name *Nostoc* (Cyanobacteria). *International Journal of Systematic Bacteriology* 47(2): 584.
- Potts M. (2002). *Nostoc*. In Whitton B. A. and Potts M. (ed). *The Ecology of Cyanobacteria. Their Diversity in Time and Space* (465-504). (ed.) USA. Kluwer Academic Publishers.
- Prasad B. N. & Mehrotra R. K. (1980). Blue-green algae of paddy fields of Uttar Pradesh. *Phykos* 19(1): 121-128.

- Prasanna R., Sood A., Ratha S. K. & Singh P. K. (2014). Cyanobacteria as a “green” option for sustainable agriculture. In Sharma N. K., Rai A. K., and Stal L. J. (ed). *Cyanobacteria. An Economic Perspective* (145-165). (ed.) India: John Wiley & Sons, Ltd.
- Pruesse E., Peplies J. & Glöckner F. O. (2012). SINA: accurate high-throughput multiple sequence alignment of ribosomal RNA genes. *Bioinformatics* 28: 1823-1829.
- Qui B., Liu J., Liu Z. & Liu S. (2002). Distribution and ecology of the edible cyanobacterium Ge-Xian-Mi (*Nostoc*) in rice fields of Hefeng Country in China. *Journal of Applied Phycology* 14: 423-429.
- Rajaniemi P., Hrouzek P., Kaštovská K., Willame R., Rantala A., Hoffmann L., Komárek J. & Sivonen K. (2005). Phylogenetic and morphological evaluation of the genera *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Trichormus* and *Nostoc* (Nostocales, Cyanobacteria). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 55: 11-26.
- Rambaut A. (2009). *Fig Tree, version 1.4.3*. Computer program distributed by the author, website: <http://tree.bio.ed.ac.uk/software/figtree/> [accessed July 12, 2022].
- Ramírez M., Hernández-Mariné M., Novelo E. & Roldán M. (2010). Cyanobacteria containing biofilms from a Mayan monument in Palenque Mexico. *Biofouling* 26 (4): 399-409.
- Ramírez M., Hernández-Mariné M., Mateo P., Berrendero E. & Roldán M. (2011). Polyphasic approach and adaptive strategies of *Nostoc* cf. *commune* (Nostocales, Nostocaceae) growing on maya monuments. *Fottea* 11 (1): 73-86.
- \*\*Řeháková K., Johansen J. R., Casamatta D. A., Xuesong L. & Vincent J. (2007) Morphological and molecular characterization of selected desert soil cyanobacteria: three species new to science including *Mojavia pulchra* gen. et sp. nov. *Phycologia*, 46 (5): 481-502.
- Řeháková K., Mareš J., Lukešová A., Zapomělová E., Bernardová K. & Hrouzek P. (2014). *Nodularia* (Cyanobacteria, Nostocaceae): a phylogenetically uniform genus with variable phenotypes. *Phytotaxa* 172 (3): 235-246.
- Rigonato J., Gama W. A., Alvarenga D. O., Zanini Branco L. H., Brandini F. P., Genuário D. B. & Fiore M. F. (2016). *Aliterella atlantica* gen. nov., sp. nov., and *Aliterella antartica* sp. nov., novel members of coccoid Cyanobacteria. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 66: 2853-2861.

- Rippka R., Deruelles J., Waterbury J. B., Herdman M. & Stanier R. Y. (1979). Generic Assignments, Strain Histories and Properties of Pure Cultures of Cyanobacteria. *Journal of General Microbiology* 111: 1-61.
- Rodríguez-Flores R. & Carmona Jiménez J. (2018). Ecology and distribution of macroscopic algae communities in streams from the Basin of Mexico. *Botanical Sciences* 96(1): 63-75.
- Rosselló-Mora R. (2006). DNA-DNA Reassociation Methods Applied to Microbial Taxonomy and Their Critical Evaluation. In Stackebrandt E. (ed). *Molecular Identification, Systematics, and Population Structure of Prokaryotes* (23-50). (ed.) Germany: Springer.
- Sánchez-Baracaldo P., Bianchini G., Wilson J. D. & Knoll A. H. (2021). Cyanobacteria and biogeochemical cycles through Earth history. *Trends in Microbiology* 30(2): 143-157.
- Sant'Anna C. L., de Paiva Azevedo M. T., Zanini Branco L. H & Komárek J. (2007). New aerophytic morphospecies of *Nostoc* (Cyanobacteria) from São Paulo State, Brazil. *Hoehnea* 34(1): 95-101.
- Sant'Anna C. L., de Paiva Azevedo M. T., Fiore M. F., Sturion Lorenzi A., Kaštovský J. & Komárek J. (2011). Subgeneric diversity of *Brasilonema* (Cyanobacteria, Scytonemataceae). *Brazilian Journal of Botany* 34(1): 51-62.
- Sant'Anna C. L., Zanini Branco L. H., de Paiva Azevedo M. T., Werner V. R. & da Silva Malone C. F. (2017). Cyanobacteria. In de Mattos Bicudo C. E. e Menezes M. (ed). *Gêneros de Algas de Águas Continentais no Brasil: Chave para identificação e descrição* (33-108). (3ra ed.) Brazil: RiMa Editora.
- \*\*Saraf A., Dawda H.G., Suradkar A., Behere I., Kotulkar M., Shaikh Z. M., Kumat A., Batule P., Mishra D. & Singh D. (2018). Description of two new species of *Aliinostoc* and one new species of *Desmonostoc* from India based on the Polyphasic Approach and reclassification of *Nostoc punensis* to *Desmonostoc punense* comb. Nov. *FEMS Microbiology Letters* 36S; fny272.
- \*\*Saraf A. G., Dawda H. G. & Singh P. (2019a). *Desikacharya* gen. nov., a phylogenetically distinct genus of Cyanobacteria along with the description of two new species, *Desikacharya nostocoides* sp. nov. and *Desikacharya soli* sp. nov., and reclassification of *Nostoc thermotolerans* to *Desikacharya thermotolerans* comb. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 69: 309-315.
- Saraf A., Suradkar A., Dawda H. G., Gaysina L. A., Gabidulin Y., Kumat A., Behere I., Kotulkar M., Batule P. & Singh P. (2019b). Phylogenetic complexities of members of Rivulariaceae with the re-creation of the family

Calotrichaceae and description of *Dulcicalothrix necridiiformans* gen nov., sp nov., and reclassification of *Calothrix desertica*. *FEMS Microbiology Letters* 366: fnz2019.

Satjarak A., Graham L. E., Piotrowski M. J., Trest M. T., Wilcox L. W., Cook M. E., Knack J. J. & Arancibia-Avila P. (2021). Shotgun metagenomics and microscopy indicate diverse cyanophytes, other bacteria, and microeukaryotes in the epimicrobiota of a northern Chilean wetland *Nostoc* (Cyanobacteria). *Journal of Phycology* 57(1): 39-50.

Schoch C. L. et al. (2020). *NCBI Taxonomy: a comprehensive update on curation, resources and tools*. Database (Oxford): baaa062. PubMed: 32761142 PMC: PMC7408187.

Schopf J. W. (1993). Microfossils of the Early Archean Apex Chert: New Evidence of the Antiquity of Life. *Science* (260): 640-646.

Sihvonen L. M., Lyra C., Fewer D. P., Rajaniemi-Wacklin P., Lehtimäki J. M., Wahlsten M. & Sivonen K. (2007). Strains of the cyanobacterial genera *Calothrix* and *Rivularia* isolated from the Baltic Sea display cryptic diversity and are distantly related to *Gloeotrichia* and *Tolypothrix*. *FEMS Microbiology Ecology* 61: 74-84.

Silambarasan S., Logeswari P., Sivaramakrishnan R., Kamaj B., Lan Chi N. T. & Cornejo P. (2021). Cultivation of *Nostoc* sp. LS04 in municipal wastewater for biodiesel production and their deoiled biomass cellular extracts as biostimulants for *Lactuca sativa* growth improvement. *Chemosphere* 280: 130644.

\*\*Singh P., Shaikh Z. M., Gaysina L. A., Surakar A. & Smanta U. (2016). New species of *Nostoc* (cyanobacteria) isolated from Pune, India, using morphological, ecological and molecular attributes. *Plant Systematics and Evolution* 302: 1381-1394.

\*\*Singh P., Šnokhousova J., Saraf A., Sarudkar A. & Elster J. (2020). Phylogenetic evaluation of the genus *Nostoc* and Description of *Nostoc neudorfense* sp. nov., from the Czech Republic. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 70: 2740-2749.

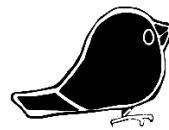
\*\*Soares F., Ramos V., Trovão J., Cardoso S. M., Tiago I. & Portugal A. (2021). *Parakomarekiella sesnandensis* gen. et sp. nov. (Nostocales, Cyanobacteria) isolated from the Old Cathedral of Coimbra, Portugal (UNESCO World Heritage Site). *European Journal of Phycology* 56: 301-315.



- Soo R. M., Hemp J., Parks D. H., Fischer W. W. & Hugenholtz P. (2017). On the origins of oxygenic photosynthesis and aerobic respiration in Cyanobacteria. *Science* 355(6332): 1436-1440.
- Stackebrandt E. (2006). Exciting Times: The Challenge to be a Bacterial Systematist. In Stackebrandt E. (ed). *Molecular Identification, Systematics, and Population Structure of Prokaryotes* (1-22). (ed.) Germany: Springer.
- \*\*Suradkar A., Villanueva C., Gaysina L. A., Casamatta D. A., Saraf A., Dighe, Mergu R. & Singh P. (2017). *Nostoc thermotolerans* sp. nov., a soil-dwelling species of Nostoc (Cyanobacteria). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 67(5): 1296-1305.
- Swofford D. L. (2003). *PAUP\*. Phylogenetic Analysis Using Parsimony (\*and Other Methods)*. Version 4.0 Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts.
- Takaichi S., Mochimaru M., Maoka T. & Katoh H. (2005). Myxol and 4-Ketomyxol 2'-Fucosides, not Rhamnosides, from *Anabaena* sp. PCC 7120 and *Nostoc punctiforme* PCC 73102, and Proposal for the Biosynthetic Pathway for Carotenoids. *Plant and Cell Physiology* 18(2): 82-88.
- Tamura K. & Nei M. (1993). Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees. *Molecular Biology and Evolution* 10: 512-526.
- Taylor T. N, Taylor E. L. & Krings M. (2009). *Paleobotany. The biology and evolution of fossil plants*. (2nd ed.) Academic Press: USA.
- Te S. H., Tan B. F., Thompson J. R., & Gin K., Y.-H. (2016). Draft Genome Sequences of Two Benthic Cyanobacteria, *Osillatoriales* USR 001 and *Nostoc* sp. NBR 210, Isolated from Tropical Freshwater Lakes. *Genome Announcements* 4(5): e011115-16.
- Teikari J. E., Hou S., Wahlsten M., Hess W. R. & Sivonen K. (2018). Comparative Genomics of the Baltic Sea Toxic Cyanobacteria *Nodularia spumigena* UHCC 0039 and Its Response to Varying Salinity. *Frontiers in Microbiology* 9: 356.
- Tomita-Yokotani K., Kimura S., Ong M., Tokita M., Katch H., Abe T., Hashimoto H., Sonoike K. & Ohmori M. (2021). Investigation of *Nostoc* sp. HK-01, Cell survival over Three Years during the Tanpopo Mission. *Astrobiology* 21(12): 1505-1514.
- Tomitani A., Knoll A. H., Cavanaugh C. M. & Ohno T. (2006). The evolutionary diversification of cyanobacteria: Molecular-phylogenetic and paleontological perspectives. *PNAS* 103(14): 5442-5447.

- Torres Bárcenas N. V. (2021). *Estudio de la diversidad de organismos fotosintéticos en biocostras de suelos desérticos de San Luis Potosí* (tesis de maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. Posgrado en Ciencias en Biología Molecular. México.
- Tsukuda M., Kitahara K. & Miyazaki K. (2017). Comparative RNA function analysis reveals high functional similarity between distantly related bacterial 16S rRNAs. *Scientific Reports* 7: 9993.
- Vázquez G. & Legaria-Moreno L. (2006). Las algas. En Moreno-Casasola (ed). *Entornos veracruzanos: la costa de La Mancha* (247-260). (ed.) México: Instituto de Ecología.
- Verleyen E., Sabbe K., Hodgson D., Grubisic S., Taton A., Cousin S., Wilmotte A., De Wever A., Van der Gusct K. & Vyverman W. (2010). Structuring effects of climate-related environmental factors on Antarctic microbial mat communities. *Aquatic Microbial Ecology* 59: 11-24.
- Vidal L., Ballot A., Azevedo S. M. F. O., Padisák J. & Welker M. (2021). Introduction to cyanobacteria. In Chorus I. & Welker M. (ed). *Toxic Cyanobacteria in Water* (163-212). (2nd ed.) UK: CRC Press.
- Villanueva C. D., Garvey A. D., Hašler G. P., Dvořák P., Poulíčková A., Norwich A., R. & Casamatta D. A. (2019). Descriptions of *Brasilonema geniculatum* and *Calothrix dumus* (Nostocales, Cyanobacteria): two new taxa isolated from cemetery tombstones. *Phytotaxa* 387 (1): 1-20.
- Villaseñor J. L. (2015). ¿La crisis de la biodiversidad es la crisis de la taxonomía? *Botanical Sciences* 93(1): 3-14.
- Voß B., Bolhuis H., Fewer D. P., Kopf M., Möke F., Haas F., El-Shewhawy R., Hayes P., Bergman B., Sivonen K., Dittman E., Scanlan D. J., Hagemann M., Stal L., J. & Hess W. R. (2013). Insights into the Physiology and Ecology of the Brackish-Water-Adapted Cyanobacterium *Nodularia spumigena* CCY9414 Based on a Genome-Transcriptome Analysis. *PLOS ONE* 8(3): e60224.
- Watanabe A. (1967). Heterotrophic Nitrogen Fixation by the Blue-Green Alga *Anabaenopsis circularis*. *Nature* 214: 738.
- Ward R. D., Stajich J. E., Johansen J. R., Huntemann M., Clum A., Foster B., Foster B., Roux S., Palaniappan K., Varghese N., Mukherjee S., Reddy T. B. K., Daum C., Copeland A., Chen I.-M. A., Ivanova N. N., Kyrpides N. C., Shapiro N., Elie-Fadrosh E. A. & Pietrasiaka N. (2021). Metagenome Sequencing to Explore Phylogenomics of Terrestrial Cyanobacteria. *Microbiology Resources Announcements* 10 (22): e00258-21.

- Wenzel J. W. (2002). Phylogenetic Analysis: The Basic Method. In DeSalle R., Giribet G. and Wheeler W. (ed). *Techniques in Molecular Systematics and Evolution* (4-30). (ed.) Basel: Springer.
- Williams D. M & Ebach M. C. (2008). *Foundations of Systematics and Biogeography* (ed.) USA: Springer.
- Williams T. A., Foster P. G., Cox C. J. & Empley T. M. (2013). An archaeal origin of eukaryotes supports only two primary domains of life. *Nature* 504: 231-236.



*Los seres organizados están sometidos al imperio de los agentes físicos  
y como tales, satisfacen el principio fundamental de la dinámica  
este es:  
el movimiento jamás nace de la nada  
y siempre resulta de otro movimiento*

— **Petro Angelo Secchi**



A través de la matriz propuesta en la tabla S1, fueron registrados en la Tabla S2, cada uno de los caracteres de las 41 especies que abarcan 16 géneros del complejo *Nostoc*-like. De igual manera, se consideró la matriz de la Tabla S1, para señalar los caracteres de las 84 especies citadas para Europa y otras regiones (Tabla S3).

**Tabla S2.** Descripciones morfométricas para cada especie de *Nostoc*-like taxa; donde indica sus caracteres continuos (0-4) y discretos (5-18) además de su estado de carácter. Los caracteres continuos no han sido transformados a una distribución decimal.

#	g	#	Especie	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	a	1	<i>Nostoc commune</i> EV1-KK1 Řeháková et Johansen 2007	135	318	161	24	12	0	2	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
2		2	<i>Nostoc desertorum</i> Řeháková et Johansen 2007	842	345	-	4		0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
3		3	<i>Nostoc indistinguishendum</i> Řeháková et Johansen 2007	99	108	246	11	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
4		4	<i>Nostoc Lichenoides</i> Vaucher ex Řeháková et Johansen 2007	93	164	293	18	32	2	4	5	-	-	1	1	1	1	0	1	1	1	1
5		5	<i>Nostoc cavernicola</i> Miscoe et Johansen 2016	17	139	163	82	96	0	2	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1
6		6	<i>Nostoc neudorfense</i> Singh, Šnokhousová et Elster 2020	64	218	-	34		0	2	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
7		7	<i>Nostoc oromo</i> Mesfin et Johansen 2020	130	239	77	18	6	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0
8		8	<i>Nostoc favosum</i> Cai et Li 2021	46	68	-	15		0	3	0	1	?	1	1	1	1	0	0	1	0	1
9		9	<i>Nostoc mirabile</i> Cai et Li 2021	39	45	-	12		0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
10	b	1	<i>Mojavia pulchra</i> Řeháková et Johansen 2007	737	511	-	7		0	2	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
11	c	1	<i>Desmonostoc muscorum</i> (Agardh ex Bornet et Flahaukt) Hrouzek et Ventura 2013	128	313	432	24	34	0	2	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
12		2	<i>Desmonostoc geniculatum</i> Miscoe Pietrasiak et Johansen 2016	148	103	208	7	14	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
13		3	<i>Desmonostoc vinosum</i> Miscoe et Johansen 2016	30	24	133	8	44	0	3	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
14		4	<i>Desmonostoc danxianense</i> Cai et Li 2018	41	53	299	13	73	0	0	0	1	?	?	1	1	1	0	1	1	1	1
15		5	<i>Desmonostoc magnisporum</i> Saraf Singh et al. 2018	81	160	-	20		0	1	0	?	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
16		6	<i>Desmonostoc punensis</i> (Singh) Saraf Singh et al. 2018	66	108	173	16	26	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	?	1	1
17		7	<i>Desmonostoc salinum</i> de Alvarenga et al. 2018	77	167	493	22	64	0	2	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
18		8	<i>Desmonostoc persicum</i> Kabirnataj et al. 2020	63	207	303	33	48	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
19	d	1	<i>Halotia branconii</i> Genuário et al. 2015	38	?	66	17		0	1	?	1	1	1	1	1	1	0	1	1	?	?
20		2	<i>Halotia longispora</i> Genuário et al. 2015	55	?	134	24		0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	?	?
21		3	<i>Halotia wernerae</i> Genuário et al. 2015	61	?	159	26		0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	?	?
22	e	1	<i>Alinostoc morphoplasticum</i> Bagchi et al. 2017	50	73	140	15	28	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	?	1	0
23		2	<i>Alinostoc catenatum</i> Kabirnataj et al. 2020	111	178	258	16	23	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	?	1	0
24		3	<i>Alinostoc magnakitifex</i> Kabirnataj et al. 2020	35	67	346	19	99	0	0	0	?	?	1	1	1	1	0	1	1	1	1
25	f	1	<i>Komarekiella atlantica</i> Hentschke Johansen et Sant'Anna 2017	80	38	114	5	14	0	2	0	1	?	?	1	1	1	0	1	1	1	1
26	g	1	<i>Compactonostoc shennongjiaensis</i> Cai et Li 2019	76	21	-	3	-	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
27	h	1	<i>Desikacharya nostocoides</i> Saraf Singh et al. 2019	89	170	-	19	-	0	1	0	?	?	?	1	1	1	0	0	1	1	1
28		2	<i>Desikacharya soli</i> Saraf Singh et al. 2019	72	162	-	23	-	0	1	0	?	?	?	1	1	1	0	0	1	1	1
29		3	<i>Desikacharya thermotolerans</i> (Suradkar et al) Saraf Singh et al. 2019	62	181	-	29	-	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
30		4	<i>Desikacharya constricta</i> Kabirnataj et al. 2020	110	299	-	27	-	0	0	0	?	?	?	1	1	1	1	0	1	1	1
31	i	1	<i>Minunostoc cylindricum</i> Cai et Li 2019	53	-	-	-	-	0	1	0	1	?	?	1	1	1	0	0	1	0	0
32	j	1	<i>Parakomarekiella sesnadenensis</i> F.Soaes Vramos et A.Portugal 2020	83	157	26	19	3	0	1	0	1	?	?	?	1	1	1	1	1	1	1
33	k	1	<i>Purpureonostoc tibeticum</i> (Cai et Li) Cai et Li 2020	51	53	344	10	67	0	1	0	0	?	?	1	1	1	1	0	1	?	0
34	l	1	<i>Violetonostoc minutum</i> Cai et Li 2020	13	3	-	2	-	0	3	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
35	m	1	<i>Pseudoalinostoc constrictum</i> (Kabirnataj et al.) Lee Ki et Lee 2021	92	226	-	25	-	0	1	0	?	?	?	1	1	1	1	0	1	1	1
36		2	<i>Pseudoalinostoc sejongens</i> Bang Ki et Lee 2021	91	420	423	46	46	0	1	0	?	?	?	1	1	1	1	1	1	1	1
37		3	<i>Pseudoalinostoc soli</i> (Saraf Singh et al.) Lee Ki et Lee 2021	41	73	?	18	-	0	1	0	?	?	?	1	1	1	1	1	1	1	1
38		4	<i>Pseudoalinostoc tiwarii</i> (Saraf Singh et al.) Lee Ki et Lee 2021	160	72	?	5	-	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	?	1	1	1
39	n	1	<i>Amazonocrinis nigriterrae</i> Oliveira et al. 2021	39	94	-	24	-	0	?	0	1	?	?	0	1	1	1	0	0	?	1
40	o	1	<i>Atlanticothrix silvestris</i> Oliveira et al. 2021	12	11	26	9	22	0	?	0	1	?	?	1	1	1	1	0	1	?	1
41	p	1	<i>Dendronalium phyllospericum</i> Oliveira et al. 2021	14	29	52	21	37	0	?	0	1	?	?	1	1	1	1	0	1	?	1

Los datos registrados en las tablas S2 y S3, por separado y en conjunto, fueron procesados en el programa Tree Analysis using New Technology (TNT; Goloboff *et al.*, 2008). Donde los caracteres continuos fueron tratados en una distribución decimal (Bakus, 2007; Goloboff *et al.*, 2006). Para cada una de las clasificaciones se calculó su Índice de Consistencia y su Índice de Retención (Klingenberg & Gidaszewski, 2010).

**Tabla S3.** Descripciones morfométricas de las 84 especies de *Nostoc* mencionadas por Komárek (2013); reunidas en cuatro grupos, donde: A) especies en aguas dulces de Europa central, B) especies endofíticas (simbiontes), C) especies europeas inciertas y D) principales especies fuera de Europa. Se indica sus caracteres continuos (0-4) y discretos (5-18) además de su estado de carácter. Los caracteres continuos no han sido transformados a una distribución decimal.

#	E	#	Especie	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	A	1	<i>Nostoc kihlmanii</i> Lemmermann 1900	305	491	-	16	-	0	2	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
2		2	<i>Nostoc prunifforme</i> [Linnaeus] Agardh ex Bornet et Flahault 1888	243	276	1000	11	41	1	3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
3		3	<i>Nostoc caeruleum</i> Lyngbye ex Bornet et Flahault 1888	260	259	-	10	-	0	3	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0
4		4	<i>Nostoc sphaericum</i> Vaucher ex Bornet & Flahault 1888	79	271	330	34	42	0	3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
5		5	<i>Nostoc parmelioides</i> Kützing ex Bornet et Flahault 1888	105	197	204	19	19	0	3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
6		6	<i>Nostoc sphaeroides</i> Kützing ex Bornet et Flahault 1888	214	277	1000	13	47	0	2	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1
7		7	<i>Nostoc linckia</i> [Roth] Bornet et Flahault 1888	57	177	459	31	81	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
8		8	<i>Nostoc carneum</i> [Lyngbye] Agardh ex Bornet et Flahault 1888	133	229	496	17	37	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
9		9	<i>Nostoc verrucosum</i> [Linnaeus] Agardh ex Bornet et Flahault 1888	101	222	213	22	21	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
10		10	<i>Nostoc zetterstedtii</i> Areschoug ex Bornet et Flahault 1888	79	733	222	93	28	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
11		11	<i>Nostoc cf. corallense</i> Prosperí 1985	68	347	-	51	-	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0
12		12	<i>Nostoc punctiforme</i> (Kützing ex Hariot) Hariot 1891	70	153	220	22	31	0	4	3	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
13		13	<i>Nostoc edaphicum</i> Kondratieva 1962	170	383	-	23	-	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
14		14	<i>Nostoc flagelliforme</i> Berkeley et Curtis ex Bornet et Flahault 1888	130	222	-	17	-	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0
15		15	<i>Nostoc microscopicum</i> Carmichael ex Bornet et Flahault 1888	425	587	741	14	17	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
16		16	<i>Nostoc commune</i> Vaucher ex Bornet et Flahault 1888	135	318	161	24	12	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
17		17	<i>Nostoc paludosum</i> Kützing ex Bornet et Flahault 1888	48	196	339	41	71	0	2	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
18		18	<i>Nostoc minutissimum</i> Kützing ex Bornet et Flahault 1888	5	21	76	42	152	0	3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
19		19	<i>Nostoc minutum</i> Desmazières ex Bornet et Flahault 1888	16	105	174	66	109	0	3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
20		20	<i>Nostoc calcicola</i> Brébisson ex Bonet et Flahault 1888	20	92	134	46	67	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
21		21	<i>Nostoc passerinatum</i> [DeNotaris] Bornet ex Bonet et Flahault 1888	120	145	245	12	20	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
22		22	<i>Nostoc humifusum</i> Carmichael ex Bornet et Flahault 1888	51	27	120	5	24	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0
23		23	<i>Nostoc gelatinosum</i> Schousboe ex Bornet et Flahault 1888	177	273	740	15	42	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
24		24	<i>Nostoc ellipsosporum</i> [Desmazières] Rabenhorst ex Bornet et Flahault 1888	358	654	1163	18	32	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
25	B	1	<i>Nostoc cycadeae</i> Watanabe et Kiyohara 1963	-	-	-	-	-	2	4	3	-	-	1	1	1	1	1	0	1	0	1
26		2	<i>Nostoc symbioticum</i> Wettstein 1915	625	383	353	6	6	2	4	6	-	-	1	1	1	1	1	0	1	0	1
27		3	<i>Nostoc lichenoides</i> Vaucher ex Řeháková et Johansen 2007	93	164	293	18	32	2	4	5	-	-	1	1	1	1	1	0	1	1	1
28	C	1	<i>Nostoc epilithicum</i> Ercegovic 1925	121	167	-	14	-	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
29		2	<i>Nostoc foliaceum</i> Mougeot in Bristol 1920	130	179	446	14	34	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
30		3	<i>Nostoc fonticola</i> Brabez 1941	174	359	1366	21	79	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0
31		4	<i>Nostoc glomeratum</i> Kützing ex Bornet et Flahault 1888	162	-	137	-	8	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
32		5	<i>Nostoc halophilum</i> Hansgirg 1885	131	64	566	5	43	0	3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
33		6	<i>Nostoc insulare</i> Borzi 1907	350	354	-	10	-	0	3	1	1	1	0	1	1	1	1	0	-	1	0
34		7	<i>Nostoc molle</i> Agardh ex Bornet et Flahault 1888	17	40	-	24	-	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
35		8	<i>Nostoc ramosum</i> Ercegovic 1925	44	125	350	28	80	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
36		9	<i>Nostoc thermophilum</i> Vouk 1916	66	-	-	-	-	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	-	-	-
37	D	1	<i>Nostoc alatosporum</i> Sant'Anna et al. 2007	156	-	1280	-	82	0	3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
38		2	<i>Nostoc album</i> Gardner 1927	-	304	-	-	-	0	3	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
39		3	<i>Nostoc amplissimum</i> Setchell 1899	37	64	87	17	24	0	3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
40		4	<i>Nostoc antarcticum</i> W et West 1911	21	276	-	131	-	0	3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
41		5	<i>Nostoc aureum</i> Kützing ex Bornet et Flahault 1888	35	55	-	16	-	0	0	0	-	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1
42		6	<i>Nostoc bicalyptatum</i> Skuja 1937	54	1010	1033	187	191	0	3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
43		7	<i>Nostoc barnetii</i> Gain 1991	44	131	137	30	31	0	3	0	-	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1
44		8	<i>Nostoc barzioides</i> Skinner et Entwisle 2001	95	68	-	7	-	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1
45		9	<i>Nostoc brittonii</i> Gardner 1927	76	70	-	9	-	0	3	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0
46		10	<i>Nostoc citrosporium</i> Prasad et Mehrotra 1976	210	210	1181	10	56	0	3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
47		11	<i>Nostoc commutatum</i> Kützing ex Prescott 1962	44	88	-	20	-	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0
48		12	<i>Nostoc conglomeratum</i> Hirose 1972	125	289	-	23	-	0	2	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
49		13	<i>Nostoc copiosum</i> Kogan et Jazkulieva 1972	101	280	1006	28	100	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
50		14	<i>Nostoc crassissporum</i> Geitler 1933	415	520	1284	13	31	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
51		15	<i>Nostoc desertorum</i> Řeháková et Johansen 2007	842	345	-	4	-	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
52		16	<i>Nostoc disciforme</i> Fritsch 1912	21	211	53	100	25	0	3	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
53		17	<i>Nostoc elgonense</i> Naumann 1925	91	148	168	16	18	0	3	0	-	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
54		18	<i>Nostoc ellipsoideum</i> Gardner 1927	12	18	81	15	68	0	2	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
55		19	<i>Nostoc fuscescens</i> Fritsch 1912	55	289	-	53	-	0	3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
56		20	<i>Nostoc hatei</i> Dixit 1936	120	107	-	9	-	0	2	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1
57		21	<i>Nostoc imperfectum</i> Schwabe et El-Ayouti 1966	186	-	196	-	11	0	-	0	0	-	0	1	1	1	1	0	1	0	1
58		22	<i>Nostoc indistinguishendum</i> Řeháková et Johansen 2007	99	108	246	11	25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
59		23	<i>Nostoc interbryum</i> Sant'Anna et al. 2007	62	92	155	15	25	0	2	0	-	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
60		24	<i>Nostoc intestinale</i> An 1992	110	248	382	23	35	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
61		25	<i>Nostoc koratense</i> An 1990	111	129	-	12	-	2	3	5	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
62		26	<i>Nostoc letestui</i> Frémy 1930	217	991	-	46	-	0	2	0	-	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
63		27	<i>Nostoc lacularis</i>																			

**S. 2 Caracterización filogenómica.** A partir del número de acceso en el NCBI fueron documentadas 41 secuencias ARNr16S de los taxa adscritos a 16 géneros “similares a *Nostoc*” publicadas durante el periodo de 2007-2021 en el GenBank, donde se incluye la información de los tipos (Tabla S4); para analizar los patrones de parentesco filogenómicos entre ellos (Wenzel 2002; Harayama & Kasai, 2006).

**Tabla S4.** Lista de los números de acceso en el NCBI para consultar las secuencias de: (a) *Nostoc*, (b) *Mojavia*, (c) *Desmonostoc*, (d) *Halotia*, (e) *Aliinostoc*, (f) *Komarekiella*, (g) *Compactonostoc*, (h) *Desikacharya*, (i) *Minunostoc*, (j) *Parakomarekiella*, (k) *Purpurenostoc*, (l) *Violetonostoc*, (m) *Pseudoaliinostoc*, (n) *Amazonocrinis*, (o) *Atlanticothrix* y (p) *Dendronalium*. Las secuencias consultadas están adscritas a cepas con nombre científico de referencia, indicando las autoridades y el año de publicación. Los nombres científicos escritos en azul, corresponde al tipo correspondiente.

n	g	#	NCBIan	Cepa	Nombre científico	Descriptor	Año
1	a	1	AY577536	EV1-KK1	<i>Nostoc commune</i>	Vaucher ex Řeháková et Johansen	2007
2	2	AY577537	CM1-VF14	<i>Nostoc desertorum</i>	Řeháková et Johansen	2007	
3	3	AY577538	CM1-VF10	<i>Nostoc indistinguishum</i>	Řeháková et Johansen	2007	
4	4	AY577535	CNP-AK1	<i>Nostoc lichenoides</i>	Řeháková et Johansen	2007	
5	5	AY218833	UTEX 584	<i>Nostoc commune</i> [reference material]		Fiore et al. 2005	
6	6	MK300544	ARC8	<i>Nostoc neudorfense</i>	Singh, Snokhousová et Elster	2020	
7	7	MH427659	ETH.2.4 M.5	<i>Nostoc oromo</i>	Mesfin et Johansen	2020	
8	8	MW652793	CHAB5714	<i>Nostoc favosum</i>	Cai et Li	2021	
9	9	MW649141	CHAB5756	<i>Nostoc mirabile</i>	Cai et Li	2021	
10	b	1	AY577534	JT2-VF2	<i>Mojavia pulchra</i>	Řeháková et Johansen	2007
11	c	1	AJ630451	NIVACYA_817	<i>Desmonostoc muscorum</i>	(Agardh ex Bornet et Flahaukt) Hrouzek et Ventura	2013
12	2	KU161662	HA4340-LM1	<i>Desmonostoc geniculatum</i>	Miscoe Pietrasiak et Johansen	2016	
13	3	KF417429	HA4717-LM4	<i>Desmonostoc vinosum</i>	Miscoe et Johansen	2016	
14	4	MH291268	CHAB5868	<i>Desmonostoc danxianense</i>	Cai et Li	2018	
15	5	MH497066	AR6_PS	<i>Desmonostoc magnisporum</i>	Saraf Singh et al.	2018	
16	6	KT166436	MCC 2741	<i>Desmonostoc punensis</i>	(Singh) Saraf Singh et al.	2018	
17	7	KX787933	CCM-UFV059	<i>Desmonostoc salinum</i>	de Alvarenga et al.	2018	
18	8	MF642332	SA14	<i>Desmonostoc persicum</i>	Kabirnatay et al.	2020	
19	d	1	KJ843310	CENA390	<i>Halotia branconii</i>	Genuário et al.	2015
20	2	KJ483313	CENA420	<i>Halotia longispora</i>	Genuário et al.	2015	
21	3	KJ843311	CENA391	<i>Halotia wernerae</i>	Genuário et al.	2015	
22	e	1	KY403996	MCC_3177	<i>Aliinostoc morphoplasticum</i>	Bagchi et al.	2017
23	2	MK506792	SA24	<i>Aliinostoc catenatum</i>	Kabirnatay et al.	2020	
24	3	MK503792	SA218	<i>Aliinostoc magnakitifex</i>	Kabirnatay et al.	2020	
25	f	1	KX638483	CCIBT 3307	<i>Komarekiella atlantica</i>	Hentschke Johansen et Sant'Anna	2017
26	g	1	MH598844	CHAB 5781	<i>Compactonostoc shennongjiaensis</i>	Cai et Li	2019
27	h	1	MH036167	BHU1-PS	<i>Desikacharya nostocoides</i>	Saraf Singh et al.	2019
28	2	MH036168	BHU2-PS	<i>Desikacharya soli</i>	Saraf Singh et al.	2019	
29	3	KX252675	9C-PS	<i>Desikacharya thermotolerans</i>	(Suradkar et al) Saraf Singh et al.	2019	
30	4	MK354274	SA10	<i>Desikacharya constricta</i>	Kabirnatay et al.	2020	
31	i	1	MH918062	CHAB 5843	<i>Minunostoc cylindricum</i>	Cai et Li	2019
32	j	1	MT044190	COI0088998	<i>Parakomarekiella sesnadensis</i>	F.Soares Vramos et A.Portugal	2020
33	k	1	MN381942	CHAB5880	<i>Purpurenostoc tibeticum</i>	(Cai et Li) Cai et Li	2020
34	l	1	MN400069	CHAB5840	<i>Violetonostoc minutum</i>	Cai et Li	2020
35	m	1	MK503793	SA30	<i>Pseudoaliinostoc constrictum</i>	(Kabirnatay et al.) Lee Ki et Lee	2021
36	2	MT000689	ACKU 594	<i>Pseudoaliinostoc sejongensis</i>	Bang Ki et Lee	2021	
37	3	MH497065	ZH1(3)_PS	<i>Pseudoaliinostoc soli</i>	(Saraf Singh et al.) Lee Ki et Lee	2021	
38	4	MH497064	LI_PS	<i>Pseudoaliinostoc tiwarii</i>	(Saraf Singh et al.) Lee Ki et Lee	2021	
39	n	1	MW326972	CENA67	<i>Amazonocrinis nigriterrae</i>	Oliveira et al.	2021
40	o	1	MW326977	CENA590	<i>Atlanticothrix silvestris</i>	Oliveira et al.	2021
41	p	1	NR_172569	CENA369	<i>Dendronalium phyllospericum</i>	Oliveira et al.	2021



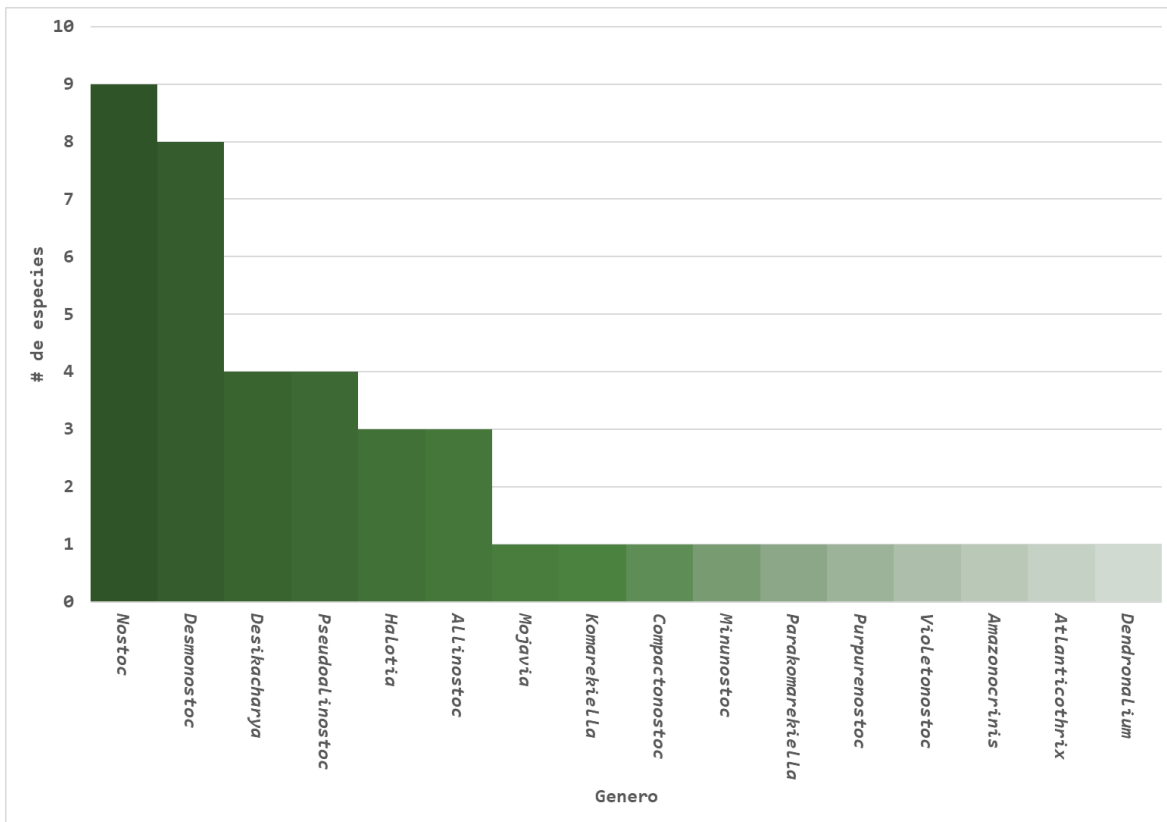


**Tabla S 6.** Código de colores para cada uno de los tipos correspondientes al complejo *Nostoc*-like, ocupados en los árboles editados utilizados para el reloj molecular.

ID #	NCBIan	Cepa	Nombre científico	Descriptor	Año
a1	AY577536	EV1-KK1	<i>Nostoc commune</i>	Vaucher ex Řeháková et Johansen	2007
b1	AY577534	JT2-VF2	<i>Mojavia pulchra</i>	Řeháková et Johansen	2007
c1	AJ630451	NIVACYA_817	<i>Desmonostoc muscorum</i>	(Agardh ex Bornet et Flahaukt) Hrouzek et Ventura	2013
d1	KJ843310	CENA390	<i>Halotia branconii</i>	Genuário et al.	2015
e1	KY403996	MCC_3177	<i>Alinostoc morphoplasticum</i>	Bagchi et al.	2017
f1	KX638483	CCIBT 3307	<i>Komarekiella atlantica</i>	Hentschke Johansen et Sant'Anna	2017
g1	MH598844	CHAB 5781	<i>Compactonostoc shennongjiaensis</i>	Cai et Li	2019
h1	MH036167	BHU1-PS	<i>Desikacharya nostocoides</i>	Saraf Singh et al.	2019
i1	MH918062	CHAB 5843	<i>Minunostoc cylindricum</i>	Cai et Li	2019
j1	MT044190	COI00088998	<i>Parakomarekiella sesnadensis</i>	F.Soaes Vramos et A.Portugal	2020
k1	MN381942	CHAB5880	<i>Purpureonostoc tibeticum</i>	(Cai et Li) Cai et Li	2020
l1	MN400069	CHAB5840	<i>Violetonostoc minutum</i>	Cai et Li	2020
m1	MH497065	ZH1(3)_PS	<i>Pseudoalinostoc soli</i>	(Saraf Singh et al.) Lee Ki et Lee	2021
n1	MW326972	CENA67	<i>Amazonocrinis nigriterrae</i>	Oliveira et al.	2021
o1	MW326977	CENA590	<i>Atlanticothrix silvestris</i>	Oliveira et al.	2021
p1	NR_172569	CENA369	<i>Dendronalium phyllospericum</i>	Oliveira et al.	2021

**S. 3 Análisis de evidencia total.** Para este análisis fueron considerados 121 taxones: 40 registros fueron descritos por sus caracteres morfométricos continuos y discretos (Tabla S2), además de su secuencia a ARNr 16S (Tabla S4); 80 registros únicamente por sus 19 caracteres homólogos (Tabla S3); y un registro únicamente por su secuencia a ARNr 16S (AY218833/UTEX 584 / *Nostoc commune*; Fiore *et al.*, 2005).

Por demás, se calculó el Índice de Diversidad de Shannon-Weaver ( $H'$ ) (Ortiz-Burgos, 2016) entre las especies que componen la *Nostoc*-like taxa (Tabla S4); considerándose a los géneros como la riqueza, y el número de especies como su abundancia. Este modelo (Fig. S1) busca aproximarse matemáticamente a él orden en la clasificación estadística de un conjunto de géneros; también se calculó (Apéndice B) para la familia *Nostocaceae* (Hauer & Komárek, 2022) y *Pinaceae* (Bánki *et al.*, 2022).

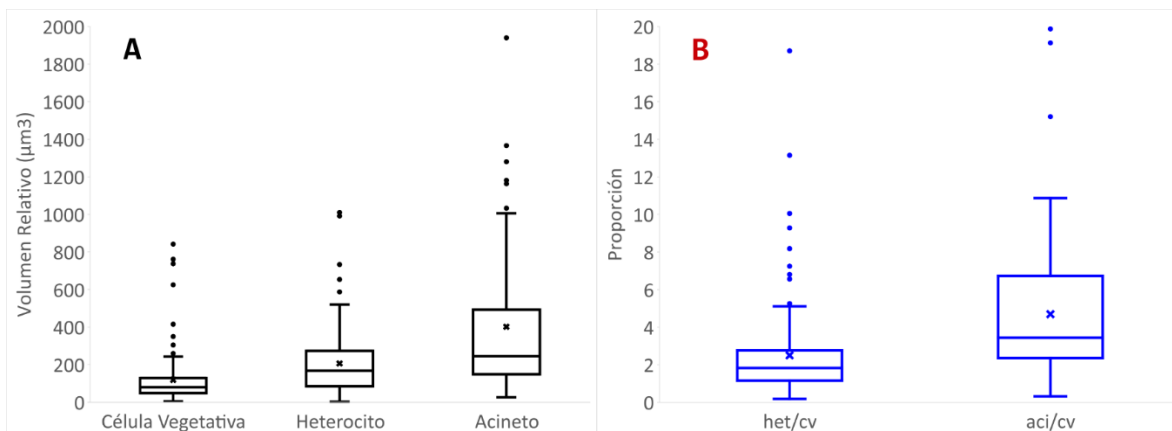


**Figura S1.** Histograma del número de especies en los géneros que conforman la *Nostoc*-like taxa (Tabla S4).  $N = 41$ ,  $H' = 2.39$

Ya que, al procesarse el total de la evidencia, a través de TNT (Goloboff *et al.*, 2016) entre dos hipótesis filogenéticas distintas (Wenzel, 2002): (1ro) un análisis que considera a *Compactonostoc shennongjiaensis* como taxa ancestral (Fig. S9), por ser esta especie a partir de la cual se describen las distancias de evolución molecular más largas entre nuestras historias evolutivas (Figs. S6, S7 y S8); y (2do) una hipótesis evolutiva que considera a *Dendronalium phyllospherycum* como taxa ancestral (Fig. S10), por ser esta especie aquella cual tiene una secuencia más conservada en tres hipótesis de evolución molecular que escalan su distancia total en un espacio geométrico con un *centro* (Figs. S6, S7 y S8). Las clasificaciones (Figs. S9 y S10) resultan en patrones de ordenación de distribución afín (Figs. S11 y S12) a la representada por la *Nostoc*-like taxa (Fig. S1).

**S. 4 Morfometría de las cianobacterias nostocoides.** La distribución de los caracteres continuos (0-4) de los datos contenidos en las tablas S2 y S3 se organizó en la Fig. S2; en A se indican los volúmenes relativos (0-2), mientras que B corresponde a las proporciones de los volúmenes (3 y 4).

En la Fig. S2A se observa que las células vegetativas de las especies de *Nostoc* promedian un volumen relativo de  $113.36 \mu\text{m}^3$ , la mediana de los datos es de  $80 \mu\text{m}^3$ , el intervalo entre cuartiles va de  $49$  a  $129 \mu\text{m}^3$ , pero la varianza esperada de los datos va de  $5$  a  $243 \mu\text{m}^3$ , además existen casos atípicos (10: *Nostoc caeruleum*, *Nostoc kihlmanii*, *Nostoc insulare*, *Nostoc ellipsosporum*, *Nostoc crassisporum*, *Nostoc microscopicum*, *Nostoc symbioticum*, *Mojavia pulchra*, *Nostoc willey* y *Nostoc desertorum*) que alcanzan los  $642 \mu\text{m}^3$ ; los heterocitos, un volumen promedio de  $206.66 \mu\text{m}^3$ , la mediana de los datos es de  $167.5 \mu\text{m}^3$ , el intervalo entre cuartiles va de  $84.25$  a  $276.75 \mu\text{m}^3$ , pero la varianza esperada de los datos va de  $3$  a  $520 \mu\text{m}^3$ , aparte de que existen casos atípicos (5: *Nostoc microscopicum*, *Nostoc ellipsosporum*, *Nostoc zetterstedtii*, *Nostoc letestui* y *Nostoc bicalyptratum*) que alcanzan los  $1010 \mu\text{m}^3$ ; mientras que los acinetos, un volumen promedio de  $401.780 \mu\text{m}^3$ , la mediana de los datos es de  $245 \mu\text{m}^3$ , el intervalo entre cuartiles va de  $149$  a  $193 \mu\text{m}^3$ , pero la varianza esperada de los datos va de  $26$  a  $1006 \mu\text{m}^3$ , y existen casos atípicos (7: *Nostoc bicalyptratum*, *Nostoc ellipsosporum*, *Nostoc citrosporum*, *Nostoc alatosporum*, *Nostoc crassisporum*, *Nostoc fonticola* y *Nostoc willei*) que alcanzan los  $1940 \mu\text{m}^3$ . En la Fig. S2B se observa que los heterocitos promedian tener 2.50 veces el volumen de la célula vegetativa, la mediana es el 1.83, el intervalo entre cuartiles va de 1.15 a 2.77, pero la varianza esperada de los datos va del 0.19 al 5.10, además de que existen casos atípicos (9: *Nostoc fuscescens*, *Nostoc minutum*, *Nostoc sphaerosporum*, *Nostoc wichmannii*, *Nostoc cavernícola*, *Nostoc zetterstedtii*, *Nostoc disciforme*, *Nostoc antarcticum* y *Nostoc bicalyptratum*) que alcanzan 18.70; mientras que los acinetos promedian ser 4.69 veces el volumen de la célula vegetativa, la mediana es el 3.43, en el intervalo entre cuartiles va de 2.35 a 6.72, pero la varianza esperada de los datos va del 0.31 al 10.88, y que existen casos atípicos (3: *Nostoc minutissimum*, *Nostoc bicalyptratum* y *Nostoc repandum*) que alcanzan 19.87.

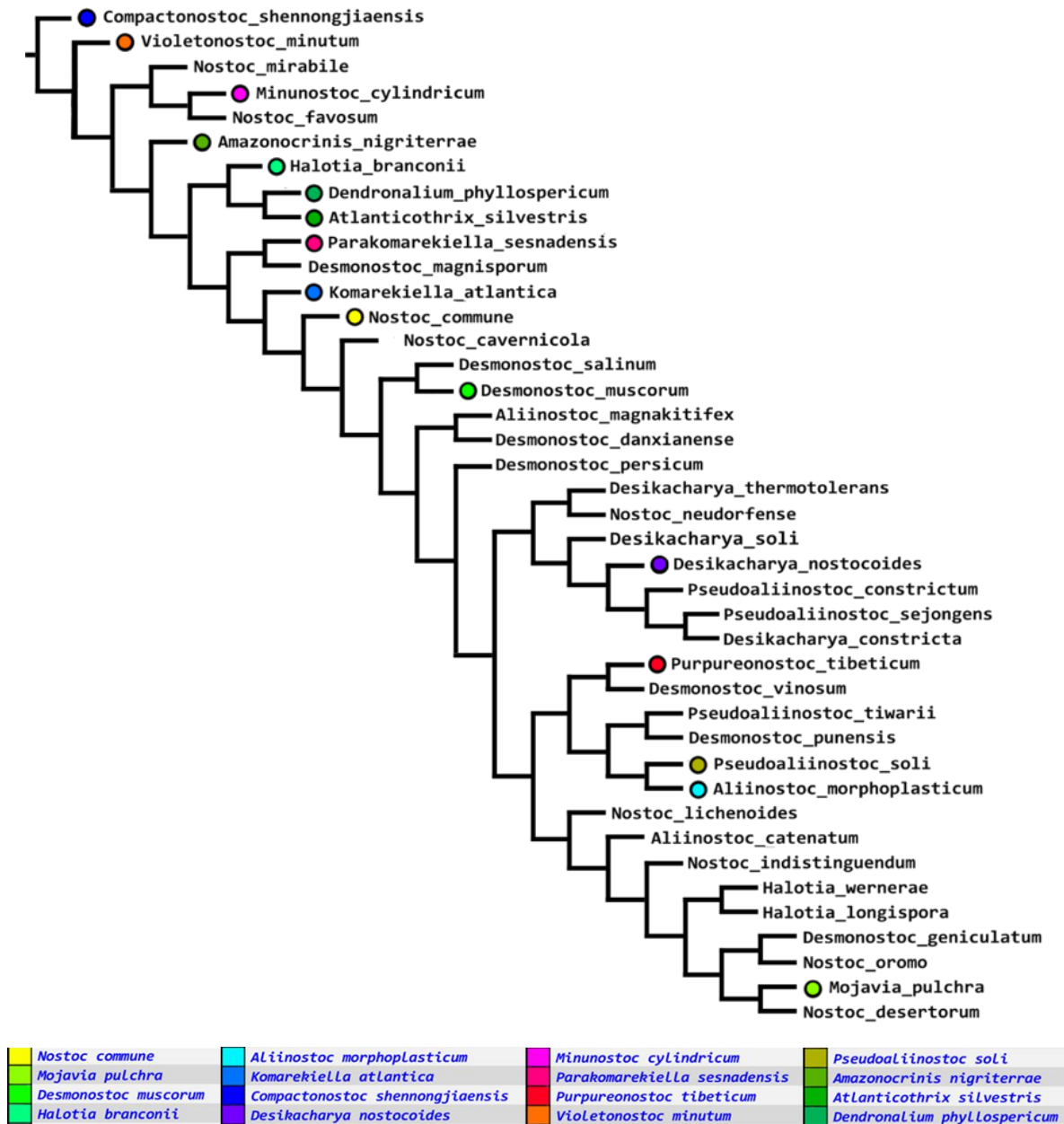


**Figura S2.** Gráficos de Caja y bigotes de el volumen relativo de las Células Vegetativas, los Heterocitos y los Acinetos (A) y sus proporciones (B) entre las especies de *Nostoc* enlistadas en las tablas S2 y S3.

Este análisis cuantitativo de los aspectos morfométricos de las células de *Nostoc* ayuda a ilustrar como, aun cuando los heterocitos y acinetos tienden a ser más grandes que las células vegetativas, esta no es una regla que se comparta entre las especies (Fig. S2B); mientras que representa algo novedoso para la ciencia, ya que anteriormente solo se ha observado la distribución de las medidas del largo y el ancho de las células vegetativas, heterocitos y acinetos (Potts, 2002; Rajaniemi *et al.*, 2005). Sin embargo, es importante destacar la naturaleza especulativa de este análisis al recordarse que se basa en la aproximación de un volumen 'relativo' que podría, o no, corresponder a las medidas exactas de las células en las especies mencionadas.

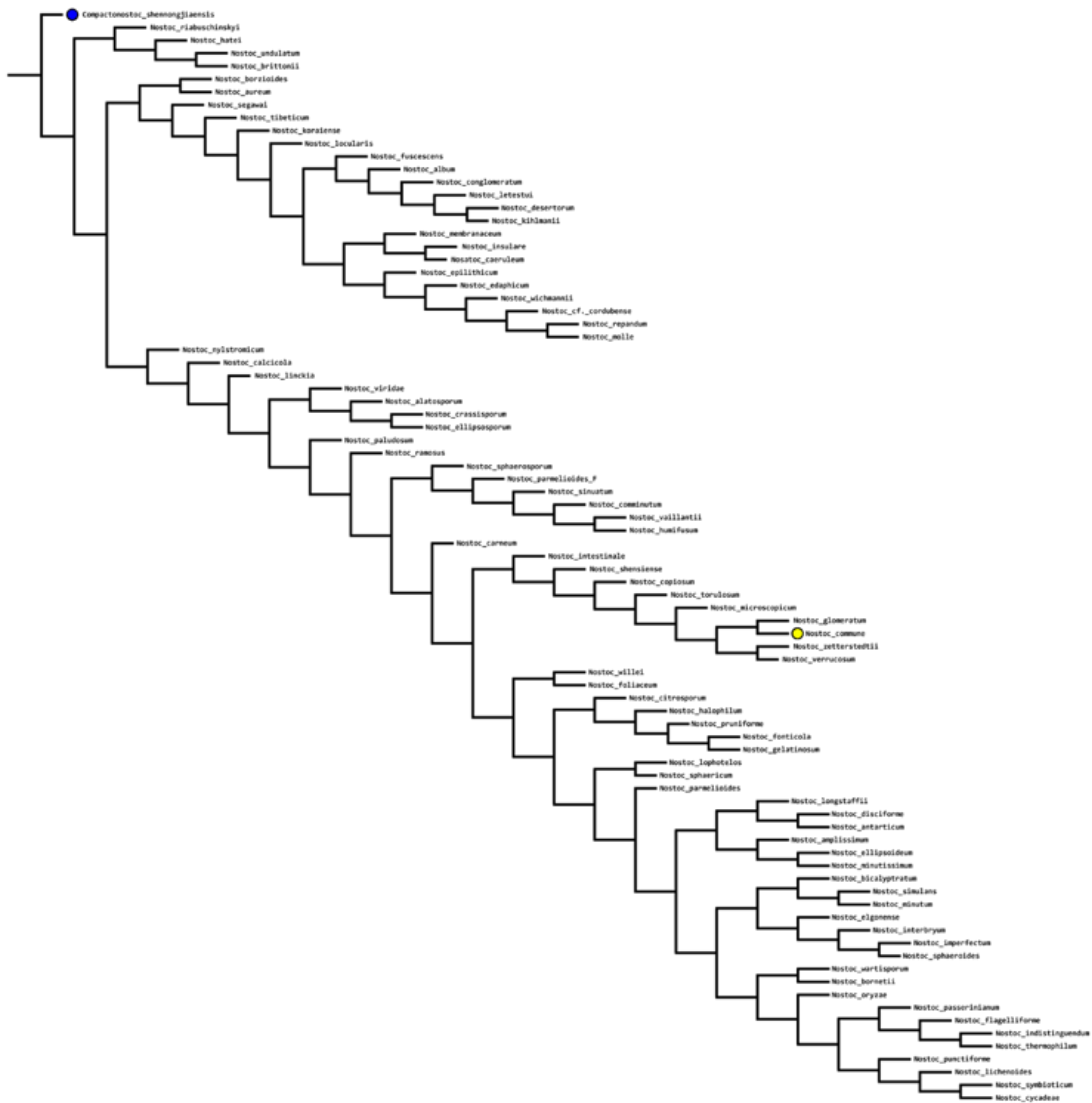
Por otro lado, debido a que los caracteres discretos (5-18) no pueden ser analizados uno por uno de manera gráfica, se optó por calcularse su clasificación, en conjunto con los caracteres continuos, a través de un algoritmo de Máxima Parsimonia (Kaufman & Rousseeuw, 2005). Este tipo de análisis son usados tradicionalmente para clasificar grupos en base a el parentesco demostrado por sus secuencias de ADN (Mishra *et al.*, 2021).

De esta manera: en la Fig. S3 se observa la clasificación de las especies que abarcan 16 géneros del complejo *Nostoc*-like (Tabla S2); después, en la Fig. S4 la de las especies citadas para Europa y otras regiones (Tabla S3); por último, en la Fig. S5 la del total de las especies que se enlistan en la Tabla S2 y S3.



**Figura S3.** Análisis de Máxima Parsimonia (Goloboff, *et al.* 2008) de la Matriz de caracteres morfométricos de la *Nostoc*-like taxa (Tabla S2). El dendrograma tiene una longitud de 63.479 cambios entre los caracteres y sus estados partiendo de *Compactonostoc shennongjiaensis*, un Índice de Consistencia de 0.701 y un Índice de Retención de 0.423.

A grandes rasgos, así es posible observar cómo las especies de 16 géneros del complejo *Nostoc*-like (Tabla S4) no forman unidades morfométricas consistentes con lo esperado si se analizan genéticamente (Mishra *et al.*, 2021); ya que las especies de todos los géneros se distribuyen heterogéneamente entre los grupos (Fig. S3).

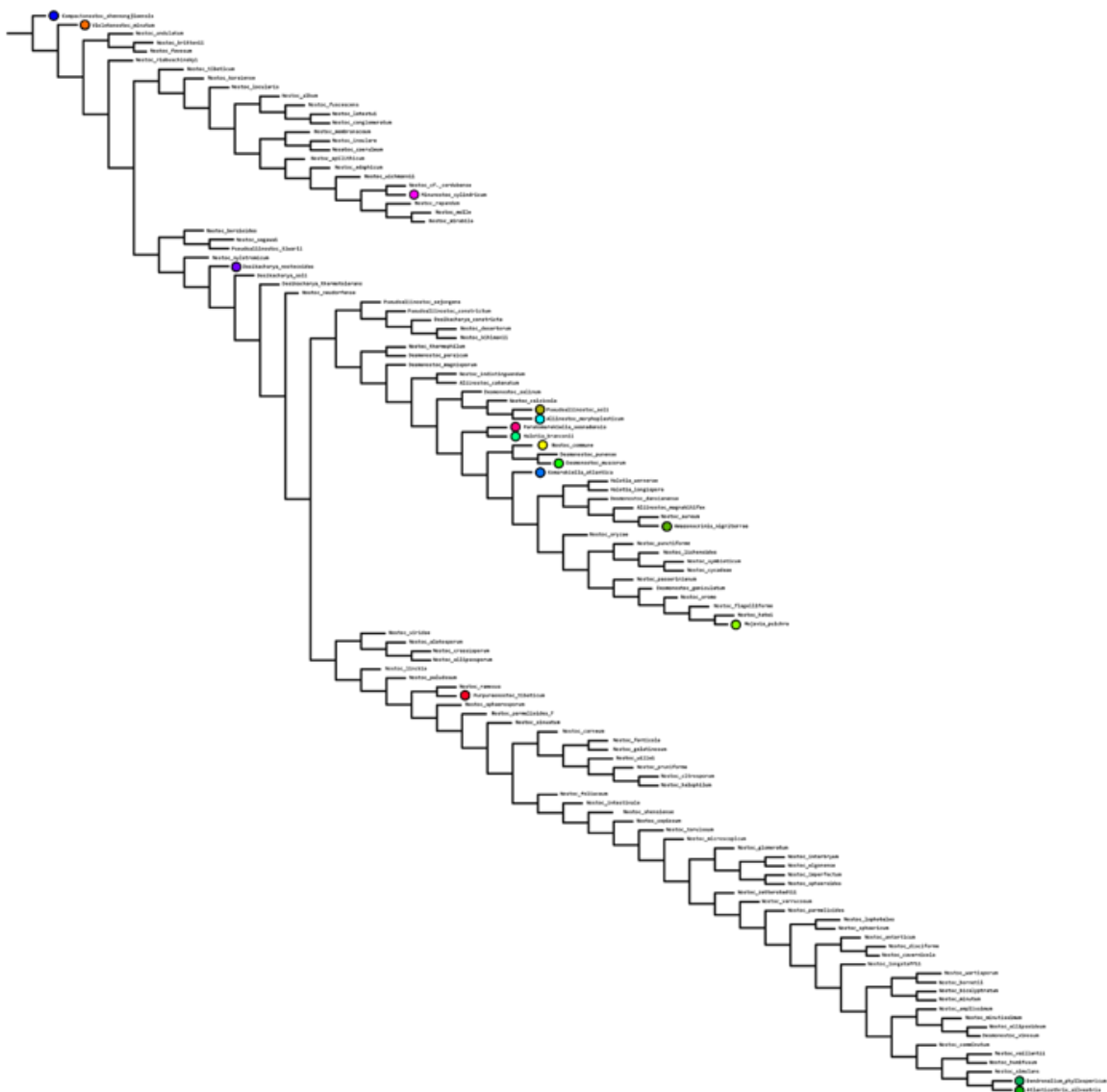


<span style="background-color: yellow;"> </span> <i>Nostoc commune</i>	<span style="background-color: cyan;"> </span> <i>Aliinostoc morphoplasticum</i>	<span style="background-color: magenta;"> </span> <i>Minunostoc cylindricum</i>	<span style="background-color: olive;"> </span> <i>Pseudoaliinostoc soli</i>
<span style="background-color: lime;"> </span> <i>Mojavia pulchra</i>	<span style="background-color: blue;"> </span> <i>Komarekiella atlantica</i>	<span style="background-color: pink;"> </span> <i>Parakomarekiella sesnadenis</i>	<span style="background-color: green;"> </span> <i>Amazonocrinis nigriterrae</i>
<span style="background-color: lightgreen;"> </span> <i>Desmonostoc muscorum</i>	<span style="background-color: darkblue;"> </span> <i>Compactonostoc shennongjiaensis</i>	<span style="background-color: red;"> </span> <i>Purpureonostoc tibeticum</i>	<span style="background-color: darkgreen;"> </span> <i>Atlanticothrix silvestris</i>
<span style="background-color: lightyellow;"> </span> <i>Halotia branconii</i>	<span style="background-color: purple;"> </span> <i>Desikacharya nostocoides</i>	<span style="background-color: orange;"> </span> <i>Violetonostoc minutum</i>	<span style="background-color: forestgreen;"> </span> <i>Dendronalium phyllospericum</i>

**Figura S4.** Análisis de Máxima Parsimonia de la Matriz de caracteres morfométricos de las especies de *Nostoc* (Tabla S3) en la Flora de agua dulce de Europa Central (Komárek, 2013). El dendrograma tiene una longitud de 138.083 cambios entre los caracteres y sus estados partiendo de *Compactonostoc shennongjiaensis*, un Índice de Consistencia de 0.246 y un Índice de Retención de 0.379.

No obstante, el cálculo del Índice de Consistencia y el Índice de Retención nos permite realizar la prueba de 'homología' de Patterson (1982), ya que 'la similitud morfológica difícilmente prueba una hipótesis de homología, pero justifica la evaluación de su consistencia interna'.





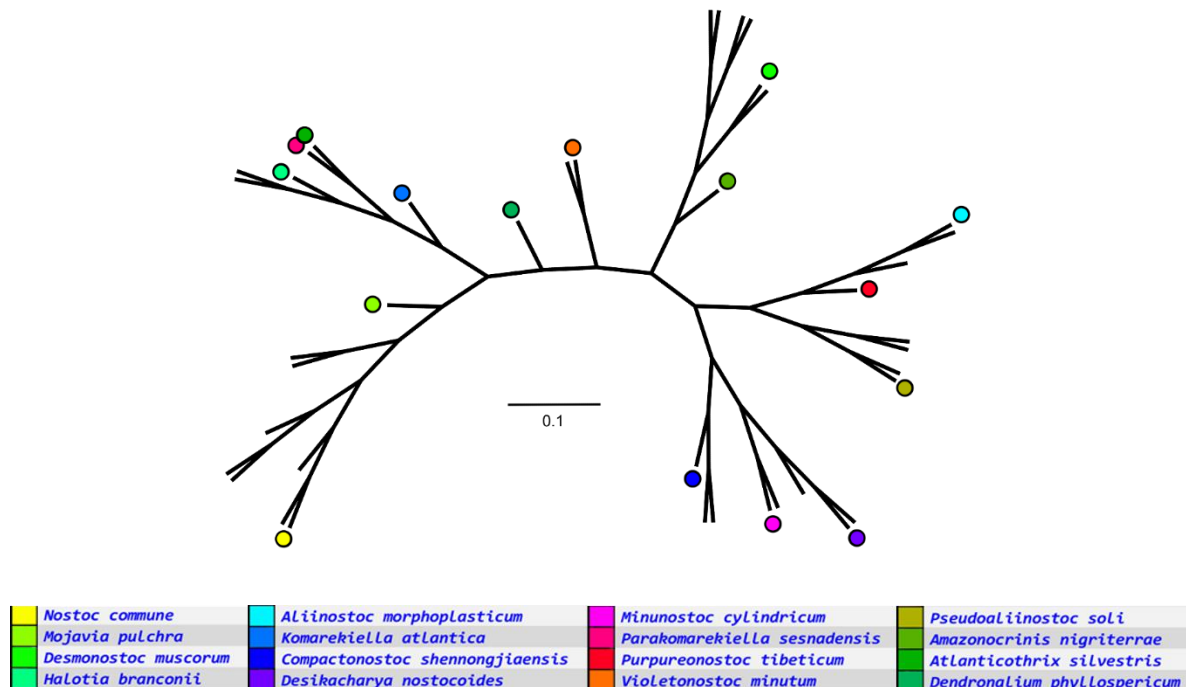
<span style="background-color: yellow;"> </span> <i>Nostoc commune</i>	<span style="background-color: cyan;"> </span> <i>Alinostoc morphoplasticum</i>	<span style="background-color: magenta;"> </span> <i>Minunostoc cylindricum</i>	<span style="background-color: olive;"> </span> <i>Pseudoalinostoc soli</i>
<span style="background-color: green;"> </span> <i>Mojavia pulchra</i>	<span style="background-color: blue;"> </span> <i>Komarekiella atlantica</i>	<span style="background-color: red;"> </span> <i>Parakomarekiella sesnadensis</i>	<span style="background-color: darkgreen;"> </span> <i>Amazonocrinis nigriterrae</i>
<span style="background-color: lightgreen;"> </span> <i>Desmonostoc muscorum</i>	<span style="background-color: purple;"> </span> <i>Compactonostoc shennongjiaensis</i>	<span style="background-color: orange;"> </span> <i>Purpureonostoc tibeticum</i>	<span style="background-color: limegreen;"> </span> <i>Atlanticothrix silvestris</i>
<span style="background-color: yellowgreen;"> </span> <i>Halotia branconii</i>	<span style="background-color: darkblue;"> </span> <i>Desikacharya nostocoides</i>	<span style="background-color: darkorange;"> </span> <i>Violetonostoc minutum</i>	<span style="background-color: forestgreen;"> </span> <i>Dendronalium phyllospericum</i>

**Figura S5.** Análisis de Máxima Parsimonia de la Matriz de caracteres morfométricos de la *Nostoc*-like taxa y las especies de *Nostoc* en la flora de agua dulce de Europa central (Tabla S2 + Tabla S3) tratando a los caracteres continuos como tal. El árbol tiene una longitud de 176.594 cambios entre los caracteres y sus estados partiendo de *Compactonostoc shennongjiaensis*, un Índice de Consistencia de 0.247 y un Índice de Retención de 0.552.

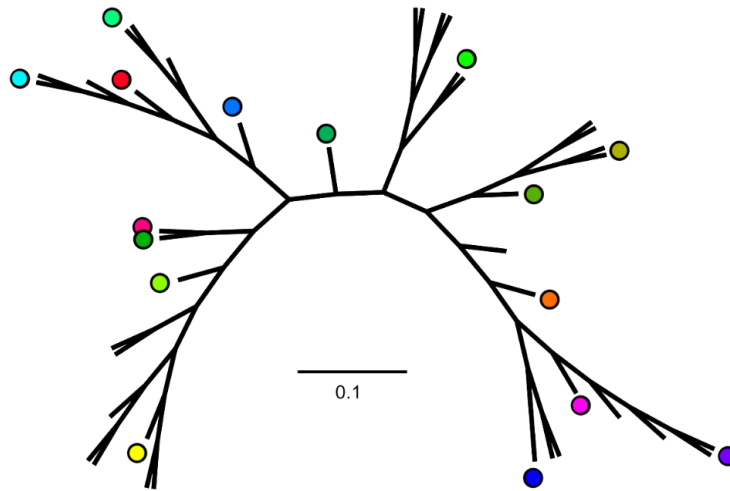
De esta manera, las señales filogenéticas demuestran que la ‘homología’ entre las *Nostoc*-like especies puede deberse a que se trata de: un caso de ‘paralelismo’ (Fig. S3); uno de ‘homoeosis’ (Fig. S4); o uno de ‘homonomia’ (Fig S5).

Cabe resaltar que, debido a su escasa complejidad morfológica los distintos taxones bacterianos han sido ignorados para el desarrollo de hipótesis basadas en sus patrones morfométricos (Stackebrandt, 2006); aun cuando, debido a su naturaleza cianobacteriana, las especies de *Nostoc* pueden prestarse para este tipo de estudios (Potts, 1997). El análisis de la parsimonia morfométrica entre una homología de cianobacterias puede llegar a complementar y/o contrastar hipótesis filogenéticas (Naef, 1972; Goethe, 2009). Además, el monitoreo sistemático en el ciclo de vida de las cepas de especies de *Nostoc* podría resultar en hipótesis filogenéticas consistentes con la *teoría de la recapitulación* de Heackel (Mateo *et al.*, 2011; Heackel, 2018).

**S. 5 Filogenética entre las cianobacterias nostocoides.** En las Figs. S6, S7 y S8 - (Máxima Posibilidad), (Maxima Parsimonia), y (Unión de Vecinos), se observaron distancias totales de 2.222, 1.103 y 1.316 cambios de base, respectivamente. Las cuales, posteriormente a ser escaladas, se aproximaron a  $\pm 0.313$ ,  $\pm 0.272$  y  $\pm 0.282$  cambios por sitio.

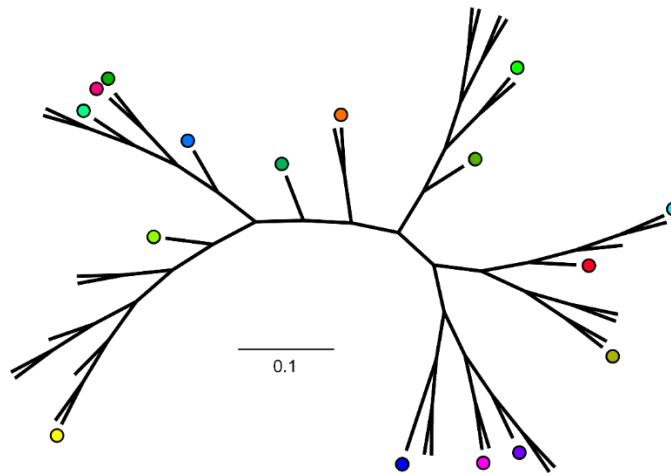


**Figura S6.** Máxima Posibilidad, calculada por el método de Tamura & Nei (1993), entre las secuencias ARNr 16S de la *Nostoc*-like taxa (Tabla S2). La historia evolutiva tiene una distancia de 2.222 cambios de bases,  $\pm 0.313$  cambios por sitio ( $\approx 1.565$  Ga).



<span style="color: yellow;">■</span> <i>Nostoc commune</i>	<span style="color: cyan;">■</span> <i>Aliinostoc morphoplasticum</i>	<span style="color: magenta;">■</span> <i>Minunostoc cylindricum</i>	<span style="color: olive;">■</span> <i>Pseudoaliinostoc soli</i>
<span style="color: limegreen;">■</span> <i>Mojavia pulchra</i>	<span style="color: blue;">■</span> <i>Komarekiella atlantica</i>	<span style="color: pink;">■</span> <i>Parakomarekiella sesnadenis</i>	<span style="color: green;">■</span> <i>Amazonocrinis nigriterrae</i>
<span style="color: lightgreen;">■</span> <i>Desmonostoc muscorum</i>	<span style="color: purple;">■</span> <i>Compactonostoc shennongjiaensis</i>	<span style="color: red;">■</span> <i>Purpureonostoc tibeticum</i>	<span style="color: darkgreen;">■</span> <i>Atlanticothrix silvestris</i>
<span style="color: teal;">■</span> <i>Halotia branconii</i>	<span style="color: darkblue;">■</span> <i>Desikacharya nostocoides</i>	<span style="color: orange;">■</span> <i>Violetonostoc minutum</i>	<span style="color: forestgreen;">■</span> <i>Dendronalium phyllospericum</i>

**Figura S7.** Consenso estricto (Nelsen) de la Máxima Parsimonia (2 árboles), calculado según los protocolos de TNT (Goloboff *et al.*, 2008), entre las secuencias ARNr 16S de la Nostoc-like taxa (Tabla S2). La historia evolutiva tiene una distancia de 1.103 cambios de bases,  $\pm$  0.272 cambios por sitio ( $\approx$  1.361 Ga).



<span style="color: yellow;">■</span> <i>Nostoc commune</i>	<span style="color: cyan;">■</span> <i>Aliinostoc morphoplasticum</i>	<span style="color: magenta;">■</span> <i>Minunostoc cylindricum</i>	<span style="color: olive;">■</span> <i>Pseudoaliinostoc soli</i>
<span style="color: limegreen;">■</span> <i>Mojavia pulchra</i>	<span style="color: blue;">■</span> <i>Komarekiella atlantica</i>	<span style="color: pink;">■</span> <i>Parakomarekiella sesnadenis</i>	<span style="color: green;">■</span> <i>Amazonocrinis nigriterrae</i>
<span style="color: lightgreen;">■</span> <i>Desmonostoc muscorum</i>	<span style="color: purple;">■</span> <i>Compactonostoc shennongjiaensis</i>	<span style="color: red;">■</span> <i>Purpureonostoc tibeticum</i>	<span style="color: darkgreen;">■</span> <i>Atlanticothrix silvestris</i>
<span style="color: teal;">■</span> <i>Halotia branconii</i>	<span style="color: darkblue;">■</span> <i>Desikacharya nostocoides</i>	<span style="color: orange;">■</span> <i>Violetonostoc minutum</i>	<span style="color: forestgreen;">■</span> <i>Dendronalium phyllospericum</i>

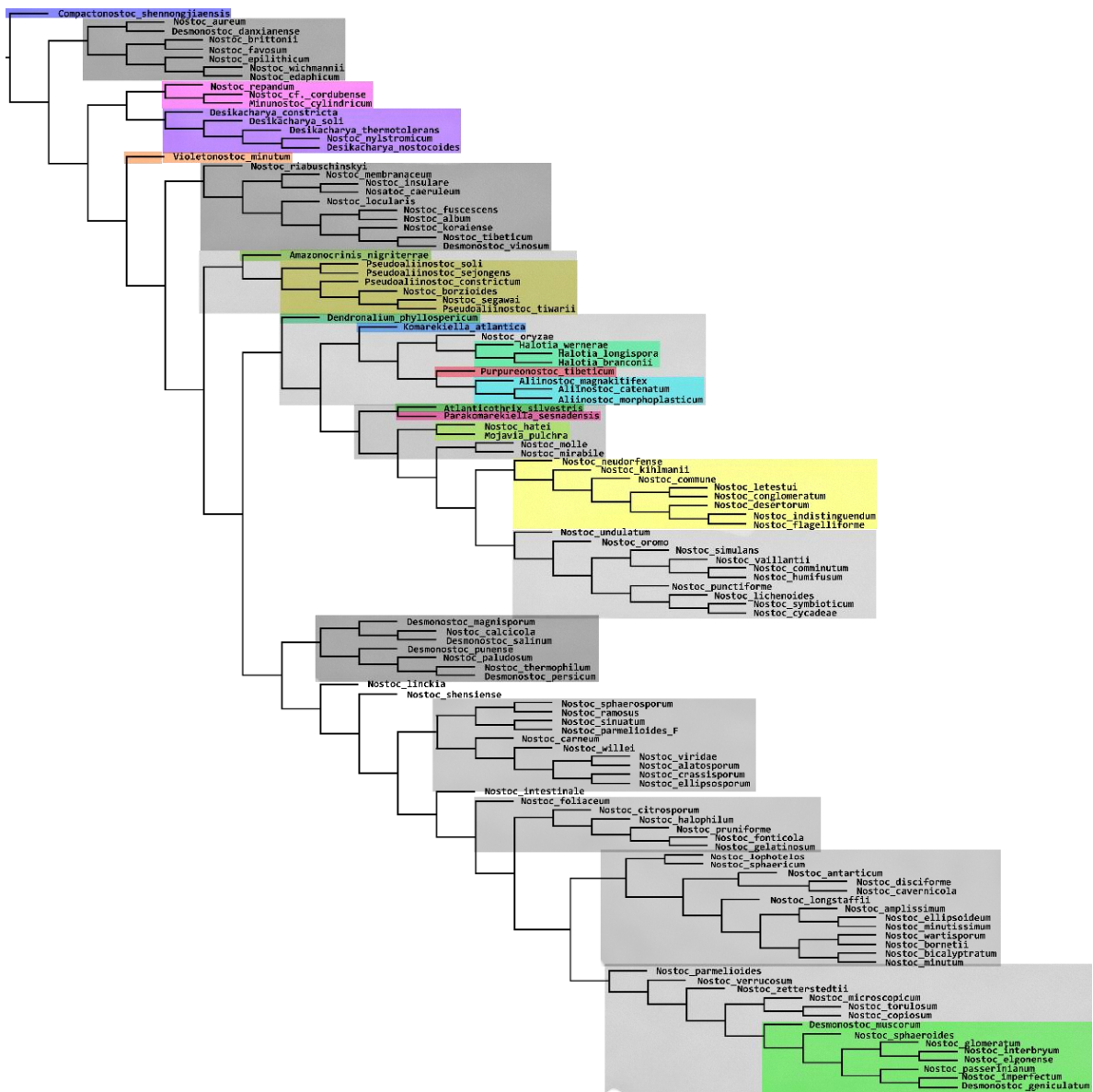
**Figura S8.** Unión de vecinos, calculado según los algoritmos de PAUP (Swofford, 2003), entre las secuencias ARNr 16S de la Nostoc-like taxa (Tabla S2). La historia evolutiva tiene una distancia de 1.316 cambios de bases,  $\pm$  0.282 cambios por sitio ( $\approx$  1.409 Ga).

Tomando en cuenta que se estima un radio de substitución por sitio del 0.05, cada 250 Ma, en la secuencia a ARNr 16S de las bacterias (Ochman *et al.*, 1999), a través de un *reloj molecular extremadamente relajado* (un fósil), se calcula que la divergencia entre las secuencias a ARNr 16S de las *Nostoc-like* especies (Tabla S4) ocurrió en el Mesoproterozoico ( $\approx 1,445$  Ma). Esto es al menos 898 Ma antes que los *Myxococcoides* encontrados en la Formación Tamengo (Bolivia) fueran depositados (Gaucher *et al.*, 2003). Sin embargo, existe evidencia de filamentos a manera de cuentas desde el paleoarqueano ( $\approx 3,465$  Ma) (*Archaeotichion septatum*; Schopf, 1993).

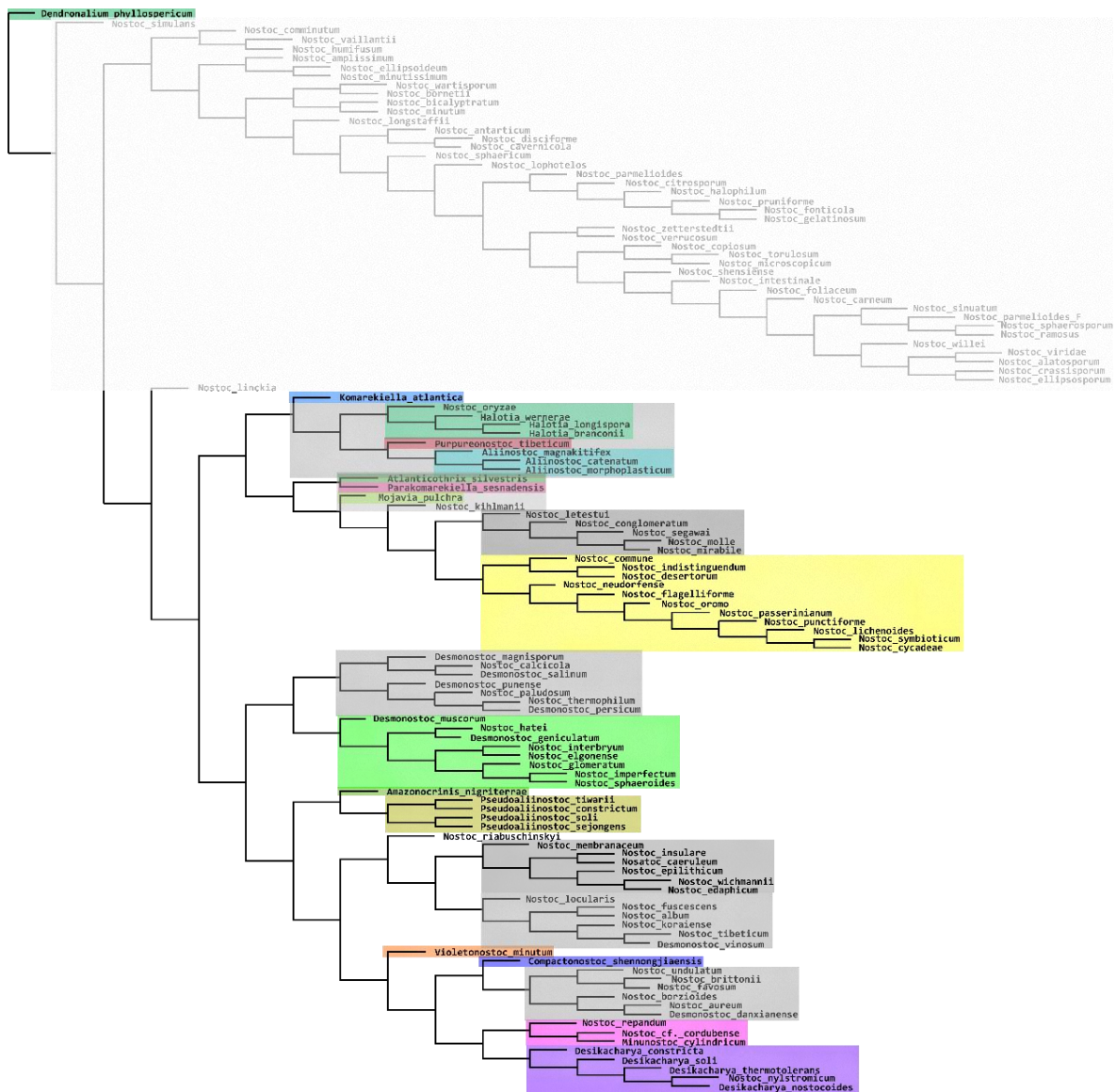
**S. 6 Taxonomía del complejo *Nostoc-like*.** En la Figs. S9 y S10 (Máxima Parsimonia) se observaron distancias morfométricas de 209.774 y 204.674 cambios en los estados de carácter, y distancias moleculares de 1.096 cambios por base (ambos). Es decir,  $\approx 29.630$  cambios de carácter más que la clasificación morfométrica que cuenta el mismo número de especies (Fig. S5), además de  $\pm 0.451$  cambios por base menos que las historias evolutivas utilizadas para el cálculo del reloj molecular (Figs. S6, S7 y S8).

Anteriormente, Řeháková *et al.* (2007) reportaron un Análisis de Evidencia Total que difiere del aquí reportado tanto en su arreglo de caracteres (solo discretos) como en las especies descritas por el mismo, ya que ellos incluyen especies distintas a una morfología nostocoides; además de ignorar los taxones descritos posteriormente (Mishra *et al.*, 2021) que no habían sido comparados por el total de su evidencia. Con todo, la topología de las clasificaciones aquí reportadas (Figs. 9 y 10) afirma la posición de *Mojavia pulchra* y *Nostoc lichenoides*, pero difieren en la naturaleza monofilética de las *Desmonostoc*,

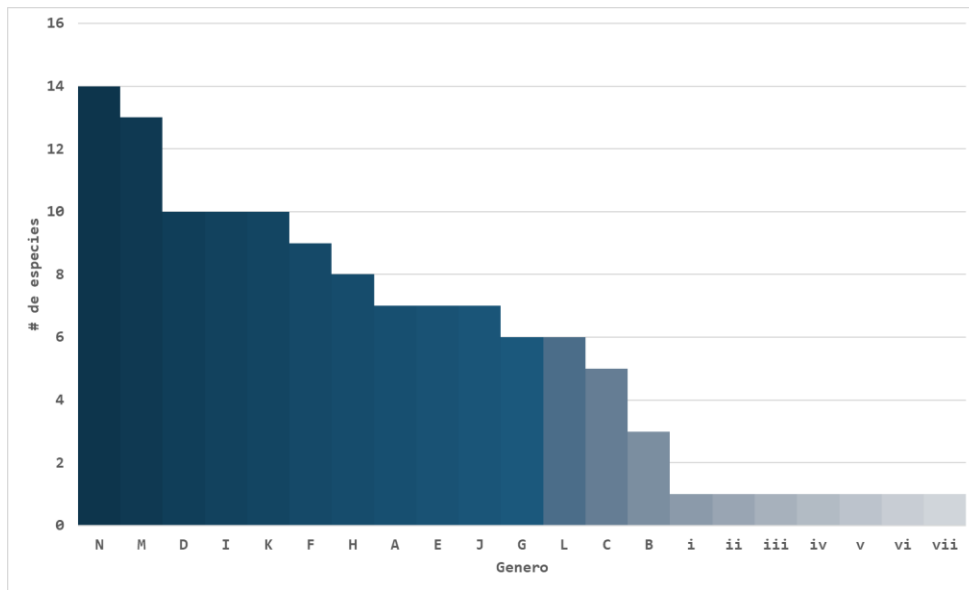
Por otro lado, el cálculo del Índice de Shannon-Weaver ayuda a atisbar la incertidumbre en la cual se recae en una clasificación de las cianobacterias nostocoides. Obsérvese como entre las especies y los géneros que conforman la *Nostoc-like* taxa existe una incertidumbre del 2.39 (Fig. S1), la cual corresponde a la cuantificada por nuestras clasificaciones (Figs. S11 y S12) y difiere a la calculada para la familia *Nostocaceae* (Apéndice BI) y *Pinaceae* (Apéndice BII). Confirmando así que probablemente la homología entre las especies se trate de una *similitud por convergencia* (homonomia) o una *similitud por un multiple paralelismo* (homoeosis) (Patterson, 1982).



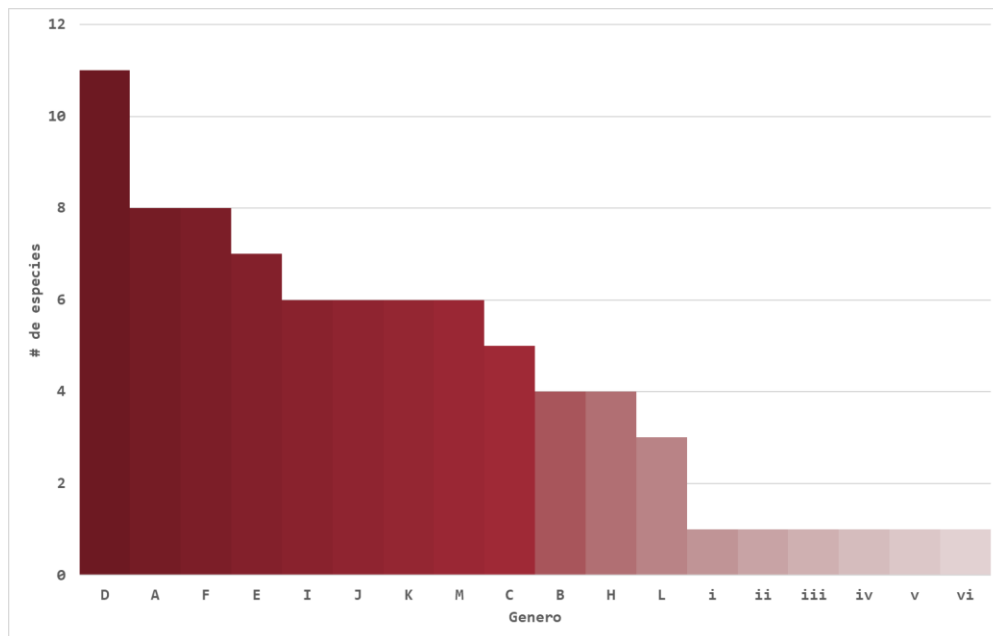
**Figura S9.** Análisis de evidencia total de las cianobacterias nostocoides (Tabla S4 + Tabla S2 ∩ Tabla S3). El árbol tiene una longitud morfométrica de 209.774 cambios entre los caracteres y sus estados, un Índice de Consistencia de 0.225 y un Índice de Retención de 0.373; la secuencia de ARN 16S una distancia de 1.096 cambios por base. La distancia total partiendo de *Compactonostoc shennongjiensis* es de 1471.774 cambios. Las agrupaciones coloreadas representan los 16 géneros que conforman la *Nostoc-like* taxa (Tabla S4), las agrupaciones grises consideran algunas especies que incluyen valores en su secuencia y las agrupaciones oscuras aquellas que solo se soportan morfométricamente.



**Figura S10.** Análisis de evidencia total de las cianobacterias nostocoides (Tabla S4 + Tabla S2  $\cap$  Tabla S3). El árbol tiene una longitud morfométrica de 204.674 cambios entre los caracteres y sus estados, un Índice de Consistencia de 0.236 y un Índice de Retención de 0.390; y la secuencia de ARN 16S una distancia de 1.096 cambios por base. La distancia total partiendo de *Dendronium phyllosporicum* es de 1472.674 cambios. Las agrupaciones coloreadas representan los 16 géneros que conforman la *Nostoc*-like taxa (Tabla S4), las agrupaciones grises consideran algunas especies que incluyen valores en su secuencia, las agrupaciones oscuras aquellas que solo se soportan morfométricamente, y la agrupación blanca a aquellas especies que son excluidas de la homología.



**Figura S11.** Histograma de frecuencias que ilustra la diversidad taxonómica esperada considerando la abundancia específica entre la estimación de 21 clados; ilustrados en el Análisis de evidencia total que parte de *Compactonostoc shennongjiaensis* (Fig. S9).  $N = 122$ ,  $H' = 2.52$ .



**Figura S12.** Histograma de frecuencias que ilustra la diversidad taxonómica esperada considerando la abundancia específica entre la estimación de 18 clados; ilustrados en el Análisis de evidencia total que parte de *Dendronalium phyllospherycum* (Fig. S10), ignorando las especies que son excluidas de la homología.  $N = 80$ ,  $H' = 2.65$ .



## APENDICE A

Glosario de los caracteres homólogos entre las especies de la *Nostoc*-like taxa, con base en los criterios de Novelo (2011) y Komárek (2013)

**Acineto:** Célula formada directamente por el engrosamiento de la envoltura en una célula vegetativa y la acumulación de sustancias de reserva. Puede tener una vaina mucilaginosa y están destinados a la resistencia, propagación y conservación de las especies.

**Aerotopo:** Conjunto de vesículas intracelulares constituidas de proteínas permeables a los gases que permiten la flotación del individuo dentro de la columna de agua.

**Apoheterocítico:** Los acinetos comienzan a desarrollarse más o menos en el medio entre dos heterocitos distantes y estos surgen sucesivamente en largas filas. En varias especies todas las células vegetativas en el tricoma cambian a acinetos.

**Artrospora:** Un tipo de células resistentes que usualmente son morfológicamente reconocibles, normalmente más grandes que las células vegetativas y normalmente de forma irregular. Difieren de los acinetos al poseer una morfología más variable y menos distintiva.

**Célula Vegetativa:** Células típicas en los tricomas, que se dividen por fisión binaria perpendicular u oblicua.

**Consistencia:** Coherencia entre las partículas de una masa o los elementos de un conjunto.

**Filamento:** Tricoma en conjunto a su vaina.

**Habito:** Hábitat donde el espécimen fue encontrado creciendo.

**Heterocito:** Células especiales que surgen de células vegetativas en distintos lugares de algunas cianobacterias filamentosas. Usualmente de pared gruesa y contienen un sistema enzimático que permite la fijación de nitrógeno.

**Heterocitos intercalares:** Cuando los heterocitos se desarrollan a lo largo del tricoma.

**Heterocitos terminales:** Cuando los heterocitos se desarrollan en los límites del tricoma.

**Individuos:** Organización multicelular que pueden llegar a exhibir los individuos de *Nostoc*.

**Paraheterocítico:** Los acinetos se desarrollan usualmente en solitario o sucesivamente en filas; estos surgen desde una o varias células vegetativas fusionadas y usualmente son más largas que las células vegetativas.

**Periderma:** Margen firme y periférico del mucilago en el talo del género *Nostoc*.

**Relación decimal:** expresión matemática que es capaz de describir cuando un heterocito y/o un acineto es volumétricamente más pequeño o grande que la célula vegetativa.

**Simbiosis:** Corresponde a la interacción entre individuos donde usualmente estos se benefician.

**Talo:** Cuerpo vegetativo no diferenciado en un eje caulinar folioso y en raíces.

**Textura:** Tacto de la colonia de *Nostoc* en su inspección macroscópica.

**Tricoma:** Conjunto de células organizadas en una fila. Pueden ser únicas o varias en un filamento.

**Vaina:** Capa de mucilago superficial en los tricomas de las especies de *Nostoc*.

**Volumen relativo:** Refiere a la ecuación utilizada para aproximarse a los volúmenes celulares reales que no pudieron ser medidos de una manera más óptima. Así, considerándose un poliedro de seis caras, ocho vértices y doce aristas, se procedió a calcular el volumen en base a la ecuación:

$$\text{Volumen } (\mu\text{m}^3) = \text{largo } (\mu\text{m}) \times \text{ancho } (\mu\text{m}) \times \text{altura } (\mu\text{m})$$

Tradicionalmente las descripciones taxonómicas se realizan considerándose una imagen observada en microscopía óptica (plana), así que la altura se aproximó considerándose igual a el promedio entre el largo y el ancho de la célula:

$$\text{altura } (\mu\text{m}) = \frac{\text{largo } (\mu\text{m}) + \text{ancho } (\mu\text{m})}{2}$$

Se calcularon distintos volúmenes con los extremos y la media de los valores descritos para el largo y el ancho; obteniéndose así un volumen inferior ( $V_i$ ), un volumen medio ( $V_m$ ) y un volumen superior ( $V_s$ ) por especie. Además, se calculó el

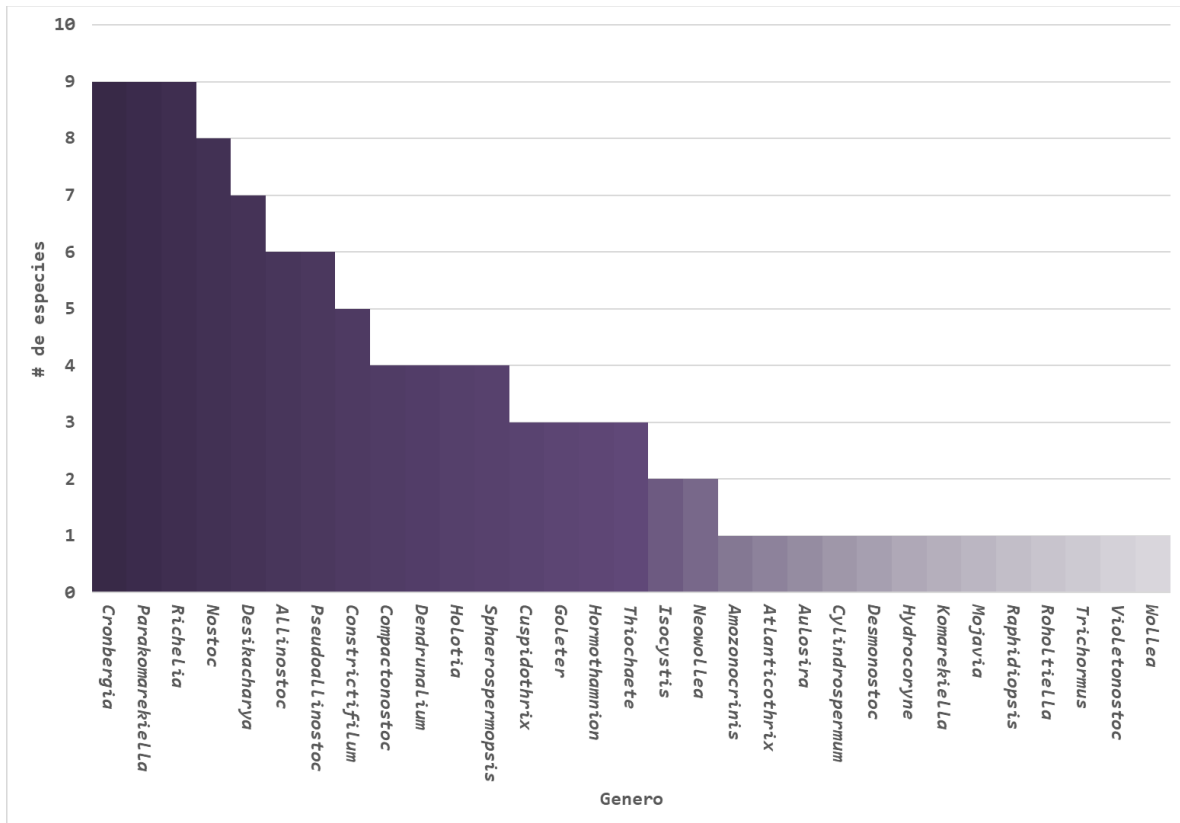
promedio para el largo, ancho y altura, calculándose así un cuarto valor de volumen (VM). Con esto, el volumen relativo (aquel contenido en tablas) se calculó siguiendo la ecuación:

$$\text{Volumen relativo } (\mu\text{m}^3) = \frac{3V_M + V_i + V_m + V_s}{6}$$

## APENDICE B

### Diversidad taxonómica entre la *Nostoc*-like taxa

- I. Histograma de frecuencias que ilustra la diversidad taxonómica de 35 géneros anotados como *Nostocaceae* Eichler 1886 en CyanoDB 2.0 (Hauer & Komárek, 2022). N = 159, H' = 3.99. El grafico excluye a *Anabaena* por motivos estéticos.



- II. Histograma de frecuencias que ilustra la diversidad taxonómica de 11 géneros anotados como *Pinaceae* en Catalogue of Life Checklist (Bánki *et al.*, 2022). N = 231,  $H' = 1.251$ .

