



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores

IZTACALA

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

Fitobentos del lago La Luna, en el Nevado de Toluca

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

PRESENTA

Gema Zeltzin García Regalado

Directora de tesis

M. en C. Gloria Garduño Solórzano



Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Edo. Méx.
Octubre 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.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al apoyo en conjunto del proyecto Metodologías activas para la enseñanza en un modelo híbrido para la asignatura de Laboratorio de Investigación Científica III, PAPIME PE209922.

A la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) por la autorización de trabajo de campo en el área de estudio. Al Biol. Rubén López Cano, por su vinculación en el trabajo de campo.

A los diferentes laboratorios de la FESI, entre ellos: Al laboratorio de Investigación Científica III por las facilidades para elaborar este trabajo, al laboratorio de Zoología acuática de la Unidad de Morfología y Función, a cargo de la Dra. Sarma, por las facilidades en el uso de su incubadora para mantener los cultivos realizados. Al laboratorio de Limnología Tropical, de la UIICSE, por la realización de la cuantificación de clorofila. Al laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Unidad de Biotecnología a los doctores Raymundo Montoya Ayala y Mónica Chico Avelino, por la elaboración del mapa de distribución mundial de *Temnogametum*. A los biólogos Daniel Sánchez Ávila y Armando Corona Arzola por la realización de las ilustraciones originales y redibujadas de las especies de *Temnogametum*.

A la M. en C. Gloria Garduño Solórzano, mi tutora, parte fundamental de este trabajo, a quien agradezco profundamente todo su apoyo, perseverancia, conocimiento y experiencias compartidas y sin la cual no habría sido posible esta tesis.

Al comité académico, Dra. Martha Martínez García, M. en C. Gabriela Jiménez Arreola. M. en C. José Manuel González Fernández y Dr. Cristian Alberto Espinosa Rodríguez, por sus comentarios, su apoyo y en especial por todo el conocimiento y pláticas compartidas que fortalecieron mi preparación durante este trabajo.

A mi madre por siempre estar presente y acompañarme durante toda mi formación académica. A dios por darme fortaleza y guiarme en el camino.

A mis amistades que me han acompañado y han formado parte de este recorrido.

ÍNDICE

	Página
Tablas y figuras	4
Resumen	6
Introducción	7
Objetivos general y particulares	11
Materiales y métodos	11
Resultados	16
Caracterización morfológica de <i>T. iztocalense</i>	19
Cobertura algal y biomasa del fitobentos	21
Variables físicas y químicas	21
Análisis estadísticos	22
Catálogo	24
Clave dicotómica	47
Discusión	49
Conclusiones	53
Literatura citada	54

TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Condiciones limnológicas según Alcocer *et al.* (2004); Alcocer, (2009) de lagos de alta montaña permanentes en México, El Sol y La Luna, Nevado de Toluca.

Tabla 2. Fitobentos determinado a partir del material de campo y cultivos del lago La Luna, Nevado de Toluca, (en bold taxa determinados a partir de cultivos).

Tabla 3. Intervalo de medidas morfométricas de una población silvestre de *T. iztacalense* (n= 40) durante la época de estiaje (2022).

Tabla 4. Registro de la cobertura del fitobentos estudiado en las estaciones del litoral del lago La Luna, durante la época de estiaje (abril- 2022).

Tabla 5. Registro de las variables físicas, químicas y nutrimentos de las estaciones litorales del lago La Luna durante la época de estiaje.

Tabla 6. Índice de Shannon-Wiener e índice de Pielou, de las estaciones estudiadas del lago La Luna, Nevado de Toluca.

Tabla 7. Índice de Jaccard de las estaciones estudiadas del lago La Luna, Nevado de Toluca.

Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis entre las mediciones de *T. iztacalense* en las estaciones de estudio.

Fig. 1. Área de estudio: Lago La Luna, Nevado de Toluca, Estado de México; cada punto rojo indica las estaciones de muestreo (E3, E5, E7, E10) (original).

Fig. 2. a) Imagen de los cuadrantes utilizados. b) Plataforma para recolectar el fitobentos según el subcuadrante.

Fig. 3. Distribución porcentual de los taxones en siete *Phylum*.

Fig. 4. Número de taxones por *Phylum* registrados en cada estación de estudio.

Fig. 5. Especies determinadas a partir de cultivos y material de campo. a) *Synechococcus* sp; b) *Merismopedia tenuissima*; c) *Klebsormidium* sp; d) *Desmodesmus flavescens*; e) *Dolichospermum* sp; f) *Netrium* sp; g) *Cymbella* sp; h) *Hantzschia* sp; i) *Sphaerocystis* sp; j) *Euglena* sp. Barra de escala= 10 μ m.

Fig. 6. Detalles de los filamentos de la población silvestre de *T. iztacalense*. a) célula vegetativa con núcleo (1), plastos (2) y pirenoides (3), b) pirenoides organizados en una hilera, c) puente de conjugación escaleriforme, d) inicio de la formación de la zigospora, e) aplanospora, f) zigospora madura con línea de dehiscencia. Barra de escala = 50 μ m.

Fig. 7. Análisis de conglomerados con base en la presencia-ausencia de los taxones estudiados del lago La Luna, Edo. Mex.

Fig. 8. Registro entre largo vs ancho de *T. iztacalense* en cada una de las estaciones estudiadas del lago La Luna, Edo. México.

Fig. 9. a) Célula vegetativa con pirenoides; b) Conjugación escaleriforme, zigospora con línea de dehiscencia en forma sigmoidal (riss line) (2).

Fig. 10. Mapa de la distribución mundial del género *Temnogametum*.

Fig. 11. a) Zigospora en vista lateral; b) Zigosporas cuadrangulares; c) Célula vegetativa con pirenoides en hilera e inicio de reproducción escaleriforme.

Fig. 12. a) Zigospora en vista frontal; b) Célula vegetativa con inicio de conjugación; c) Célula vegetativa con pirenoides en hilera.

Fig. 13. a) Zigospora ovoide con línea de dehiscencia; b) Zigospora al inicio de la conjugación; c) Célula vegetativa con inicio de conjugación lateral; d) Célula vegetativa con pirenoides en hilera y zigospora.

Fig. 14. a) Célula vegetativa con pirenoides en hilera; b) Zigospora al inicio de la conjugación; c) Zigospora con línea de dehiscencia.

Fig. 15. a, b) Zigospora con línea de dehiscencia; c) Célula vegetativa al inicio de conjugación escaleriforme.

Fig. 16. a) Zigospora en vista frontal con línea de dehiscencia; b) zigospora inmadura, c) Zigospora en vista lateral.

Fig. 17. a) Célula vegetativa con inicio de conjugación; b, c) Zigospora en conjugación lateral.

Fig. 18. a) Zigospora con línea de dehiscencia; b) Zigospora en conjugación escaleriforme; c) Zigospora en conjugación lateral.

Fig. 19. a) Célula vegetativa con pirenoides en hilera; b) Filamentos en conjugación escaleriforme.

Fig. 20. a) Célula vegetativa con azigosporas y línea de dehiscencia; b) Azigosporas en gametangios cortos.

Fig. 21. a) Zigospora con línea de dehiscencia; b) Célula vegetativa con inicio de conjugación.

Fig. 22. a) Zigospora con línea de dehiscencia; b) Filamento con zigosporas en serie.

Fig. 23. a) Célula vegetativa con aplanospora y línea de dehiscencia.

Fig. 24. a) Filamentos en reproducción sexual escaleriforme con zigosporas; b) Zigospora con línea de dehiscencia.

Fig. 25. a) Zigospora con línea de dehiscencia; b) Zigospora en vista lateral.

Fig. 26. a) Célula vegetativa con conjugación escaleriforme; b) Zigospora con línea de dehiscencia.

Fig. 27. a) Célula vegetativa con numerosos pirenoides dispersos; b) Célula vegetativa con pirenoides dispersos e inicio de formación de aplanospora; c) Aplanospora; d) Zigospora cuadrangular.

Fig. 28. a) Célula vegetativa con inicio de conjugación lateral; b) Célula vegetativa con aplanospora; c) Zigospora con línea de dehiscencia.

Fig. 29. a) Inicio de reproducción lateral; b) Zigospora en vista lateral; c) vista frontal de la Zigospora en conjugación escaleriforme.

Fig. 30. a) Zigospora en vista lateral; b) Inicio de reproducción lateral; c) Zigospora.

RESUMEN

Los lagos de alta montaña son ecosistemas extremos y sensibles a cambios climáticos; sus condiciones limnológicas, corresponden a sistemas con baja temperatura, y alta radiación ultravioleta. México cuenta con dos lagos permanentes de alta montaña ubicados en el cráter del volcán Nevado de Toluca, conocidos como El Sol y La Luna, el último ultraoligotrófico, con un pH ácido, baja conductividad y poco mineralizado donde crece formando tapetes *Temnogametum iztacalense*. Este género es raro y solo se conocen 20 especies en el mundo, con poca información de las condiciones limnológicas y su distribución. Por lo tanto, el objetivo fue analizar la diversidad del fitobentos en época de estiaje y las condiciones limnológicas acompañantes. El material biológico se recolectó del muestreo (abril 2022) en cuatro estaciones; en cada una de ellas se ocupó un cuadrante de 25x25 cm, con subcuadrantes de 3x3 cm, donde se registraron once variables limnológicas. Se cuantificó la biomasa del fitobentos a través del peso seco. Así mismo, se cultivaron en medio BG11 y extracto de suelo, lixiviados de cada estación. La determinación taxonómica se realizó con base en el concepto morfológico a través de microscopía óptica. La riqueza específica del fitobentos fue de 35 taxones distribuidos en 37% para el *Phylum* Cyanobacteria, seguida de 23% Bacillariophyta, 14% Chlorophyta, 14% Charophyta, 6% Euglenophyta, 3% Crysophyceae y 3% Miozoa; donde el índice Shannon-Wiener osciló ente 0.85 a 1.4 bits/ ind. De ellos, 24 taxones corresponden a nuevos registros para el área de estudio. Los tapetes fueron dominantes con *T. iztacalense*, seguidas de 22 especies constantes y 14 raras. En todas las estaciones la mayor riqueza correspondió a las cianobacterias. Se amplió la descripción de *T. iztacalense*, con respecto a la época de reproducción y la variabilidad fenológica, con base en la prueba Kruskal-Wallis ($p= 0.36$; $>p= 0.05$) no hay diferencias significativas entre largo vs ancho celular. Por su parte, la estación (E5) fue la de mayor porcentaje de cobertura algal y biomasa, con el 90% y 3.1 g. Por tanto, este es el primer informe de la composición del fitobentos a partir de material de campo y cultivo de lagos de alta montaña para el continente americano. Además, reúne un catálogo de las especies de *Temnogametum* conocidas hasta ahora e incluye una clave taxonómica de las mismas.

INTRODUCCIÓN

La distribución mundial de los lagos indica que en su mayoría son templados, en contraste, no más del 10% corresponden a regiones tropicales. En particular los lagos de alta montaña, se localizan en cotas entre 2000 y 4300 m s.n.m; en el continente americano en: Ecuador, México, Colombia y Perú; mientras, en África: Etiopía, Kenia, Uganda, Asia: Indonesia y Guinea (Barba-López *et al.*, 2021). También, en Europa: Austria, en los Alpes y Villa Kühtai (Trumhová *et al.*, 2023).

Los lagos de alta montaña habían sido poco estudiados hasta el siglo XIX (Löffler, 1964); recientemente, numerosas investigaciones los consideran centinelas porque son ecosistemas sensibles a cambios climáticos (Catalan *et al.*, 2006; Cuna *et al.*, 2013; Pastorino & Prearo, 2020). En general, las condiciones limnológicas que prevalecen, corresponden a sistemas oligotróficos, con baja temperatura, poco mineralizados, con alta cantidad de Radiación Ultravioleta (RUV), poca materia orgánica y alta transparencia (Sommaruga, 2001). Por ello, han sido clasificados como ambientes acuáticos extremos donde se desarrollan organismos bentónicos particulares (Löffler, 1983; Ortiz-Álvarez *et al.*, 2018).

En México, los lagos El Sol y La Luna, ubicados en el cráter del volcán Nevado de Toluca, Estado de México, son los únicos ambientes lénticos permanentes de alta montaña en la nación. Aunque el país alberga alta diversidad biológica a nivel mundial, poco se conoce sobre la diversidad de la comunidad del fitobentos de estos ecosistemas extremos (Lewis, 1987; Garduño-Solórzano *et al.*, 2020).

En suelos o lugares húmedos subaéreos de la tundra alpina en los Alpes austriacos, se ha observado la dominancia del fitobentos conformado por tapetes de algas filamentosas mucilaginosas, generalmente Zygnematophyceae, Charophyta (algas verdes), que presentan filamentos no ramificados con una reproducción sexual por conjugación (Trumhová *et al.*, 2023).

Las Zygnematophyceae como: *Spirogyra*, *Mougeotia*, *Zygnema*, *Zygonium* y *Temnogametum* pueden crecer en el bentos formando tapetes macroscópicos, bajo

condiciones de desecación, estrés osmótico, alta RUV y congelación. Sus adaptaciones a fuertes fluctuaciones en la disponibilidad de agua, temperatura y exposición a la luz, les ha concedido diversas adaptaciones, como la producción de carotenoides, compuestos fenólicos y taninos hidrosolubles en el citosol (Newsome & van Breemen, 2012; Aigner *et al.*, 2013).

Se han documentado morfos verdes y púrpuras de *Zygogonium ericetorum* en poblaciones naturales de Austria, donde se producen metabolitos secundarios importantes para la aclimatación bajo cantidades de RUV altas (Aigner *et al.*, 2013; Stancheva *et al.*, 2014). También, en los Alpes austriacos, se ha investigado la dinámica estacional de los tapetes de *Zygnema*, donde la biomasa durante primavera es de crecimiento rápido, alcanzando el máximo crecimiento entre mayo y septiembre. Además, los pre-acinetos se formaron justo antes de la temporada invernal para resistir el frío (Trumhová *et al.*, 2023). Para el continente americano, en los lagos de Ontario, Canadá, fue recolectada *Temnogametum tirupatiense* en ambientes con pH ácidos de 5.0 a 6.6, temperatura de 25° C, entre algunas macrófitas; este material biológico se cultivó en laboratorio para obtener las zigosporas maduras con agua de los ambientes sin agregar nutrimentos (Wei *et al.*, 1989).

En el mundo se han descrito 20 especies de *Temnogametum* (Guiry & Guiry, 2021). Pero no se conoce la dinámica estacional del género, menos en regiones tropicales del continente americano, así como las condiciones ecológicas donde crecen.

Los lagos El Sol y La Luna tienen características limnológicas particulares, así como en las comunidades biológicas que los componen. En estos ecosistemas se han desarrollado investigaciones sobre cuatro áreas del conocimiento: limnología, paleolimnología, ficología e invertebrados acuáticos. La composición química de estos lagos fue descrita en principio por Löffler (1972); después, Ibarra-Morales *et al.* (2015) caracterizaron la variabilidad interanual de los lagos. Mientras, Armienta *et al.* (2000), realizaron análisis químicos, para relacionar las características químicas con el estado de actividad del volcán. La dinámica y régimen de temperatura se ha documentado por Filonov *et al.* (2022) quienes revelan que las fuertes fluctuaciones diurnas en la temperatura del agua son debidas al viento y la compleja hidrodinámica del sistema de cada uno de los lagos del Nevado de Toluca.

Los aspectos paleolimnológicos han sido atendidos por Cuna *et al.* (2013), quienes infirieron los cambios climáticos y ambientales del lago La Luna, comparando con otros lagos de altas montaña. También, García-Jurado *et al.* (2007), describieron una propuesta integral de estos ecosistemas con base en el análisis de las estructuras de las comunidades de plancton, como descripción y predicción de éstas a los cambios ambientales.

Investigaciones referentes a la ficología del lago La Luna refieren Bacillariophyta, Crysophyta y Charophyta. En principio, Caballero-Miranda (1996) indicó nueve especies de diatomeas de los sedimentos donde *Achnantes helvetica*, *A. levanderi*, *Cymbella perpusilla* y *Navicula* (NTA) fueron abundantes con registros de 146 valvas/gds, durante el período de enero 1991. Por su parte, *Eunotia sp.* y *Hantzschia amphioxys* fueron taxones únicos para este lago, con un pH de 4.8, conductividad de $17.5 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$, temperatura menor a $10 \text{ }^\circ\text{C}$, bajos contenidos de Cl, Na, K, Ca y Si y altas cantidades de Mg (10.90 mg/L).

Más tarde, Vilaclara *et al.* (2005) investigaron los sedimentos colectados con una draga Eckman de 27 morfotipos de estatocistos de Crysophyceae, de los cuales 27 se observaron en El Sol y 4 en La Luna, la cual presentó un pH de 4.5-5.6, conductividad de $15\text{-}25 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$, temperatura de $6\text{-}11 \text{ }^\circ\text{C}$, y cantidades altas de HCO_3 (40-200 $\mu\text{eq}/\text{l}$) y Mg (60-320 $\mu\text{eq}/\text{l}$). Una nueva especie fue reconocida por Garduño-Solórzano *et al.* (2020), quienes dan a conocer *Temnogametum iztacalense* (Zygnemataceae), utilizando un enfoque taxonómico integral, la cual crece formando tapetes fitobentónicos de filamentos color púrpura con células vegetativas no ramificadas. También indicaron valores de pH 3.8-5.8, conductividad de $0.8\text{-}9.1 \mu\text{S cm}^{-1}$, baja mineralización y cantidades de fosfato siete veces mayor dentro de las células (890 ppm) con respecto al sedimento (119-166 ppm).

Por su parte, para el lago El Sol, Banderas-Tarabay (1997); ha descrito la distribución vertical de la diversidad fitoplanctónica, siendo las familias representativas: Oedogoniaceae, Desmidiaceae y Zygnemataceae con 18 spp., 17 spp. y 13 spp., respectivamente; está última la más representativa en el bentos. Posteriormente, Alcocer *et al.* (2004) y Alcocer (2009) describen la biomasa fitoplanctónica y variables limnológicas, además, indican que los N- NO_2 y Si- SiO_4 fueron cuatro veces mayores

en El Sol que La Luna; por el contrario, La Luna tuvo mayor N-NO₃ (cuatro veces más) que El Sol. Por último, la concentración máxima de biomasa fitoplanctónica fue registrada en octubre, para El Sol y en La Luna en marzo (Tabla 1).

Tabla 1. Condiciones limnológicas según Alcocer *et al.* (2004); Alcocer, (2009) de lagos de alta montaña permanentes en México, El Sol y La Luna, Nevado de Toluca

Variable	El Sol	La Luna
Disco de Secchi (m)	3-7.4	4-9
Saturación O₂	96	95
Oxígeno disuelto mg L⁻¹	6.8	6.7
pH	5.5	4.7
Conductividad μS cm⁻¹	16	14
Clorofila a mg/m²	1.9 a 8.4	1.1 y 4.8
Biomasa de fitoplancton mg/m²	8,4	4.8

El fitoplancton de ambos lagos también ha sido comparado por Cuna *et al.* (2022) donde cuenta con 92 taxones en El Sol, 63 en La Luna. Los grupos taxonómicos de algas más diversos fueron Bacillariophyceae (El Sol 34.8%, La Luna 42,9%) y Chlorophyceae (El Sol 20,6%, La Luna 19%), donde ambos grupos taxonómicos representan >50% de la riqueza específica de los sistemas de ambos lagos.

El conocimiento de estos ecosistemas aún es restringido, en particular poco se conoce de las comunidades de fitobentos (Stevenson & Pan, 1999). Por lo tanto, es de nuestro interés analizar la distribución y composición ficoflorística asociada con los tapetes de *T. iztacalense*, así como su biomasa para contrastar los cambios entre la comunidad del lago e inferir la relación que tienen con algunos factores biológicos, físicos y químicos, que permitan describir las condiciones ambientales actuales entre el fitobentos.

OBJETIVOS

General

Analizar la diversidad del fitobentos y algunas condiciones limnológicas en el litoral del lago La Luna, Nevado de Toluca.

Particulares

- Determinar la composición y distribución del fitobentos a lo largo del litoral del lago para contrastar los cambios entre ellas.
- Cuantificar la biomasa algal de *Temnogametum iztacalense* a lo largo del litoral del lago La Luna, Nevado de Toluca, para inferir su distribución espacial.
- Generar un catálogo de las especies de *Temnogametum* conocidas en el mundo para referenciar sus caracteres diacríticos e ilustrar los mismos, para construir una clave artificial original.
- Determinar las variables limnológicas de: temperatura, pH, dureza, alcalinidad, oxígeno disuelto, conductividad, profundidad, clorofila a, nitratos y fosfatos; asociadas con la composición del fitobentos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El lago La Luna está localizado en las coordenadas 19° 06' 28" Latitud N y 99° 45' 10" Longitud O a una altitud de 4250 m s.n.m., con una área de 31 083 m², 227 m de largo y 209 m de ancho y una profundidad máxima de 10 m. Es un ambiente con un pH alrededor de 6, temperatura que oscila entre los 9 y 11 °C. El contenido de oxígeno disuelto es de 6.0 - 7.8 mg L⁻¹ y conductividad entre 6.2 - 14 µS cm⁻¹ (Arriaga *et al.*, 1998; Alcocer *et al.*, 2004; Alcocer, 2009; Cuna *et al.*, 2013). Con respecto al estado trófico, es ultraoligotrófico con valores de 1.13 a 4.80 mg/m² de clorofila a, polimíctico cálido continuo (Filonov *et al.* 2021; Cuna *et al.*, 2022). Nuevos registros durante el 2007-2010, indican que la temperatura de la columna de agua oscila durante el día entre 10.5 a 4 °C (Filonov *et al.*, 2022).

A lo largo del litoral, se realizó un muestreo sistemático cada 250 m que cubren los cuatro puntos cardinales, señalados como E3, E5, E7, E10 (Fig. 1).

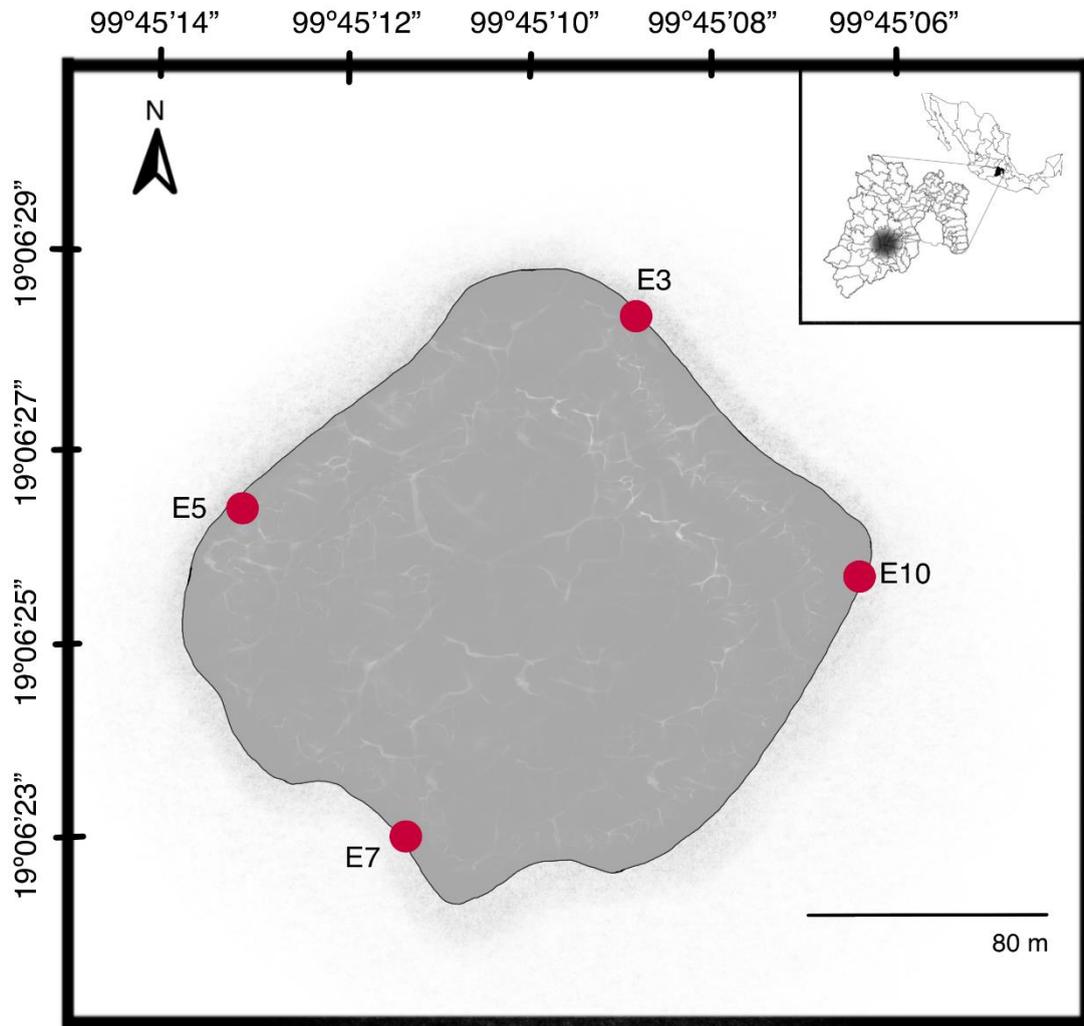


Fig. 1. Área de estudio: Lago La Luna, Nevado de Toluca, Estado de México; cada punto rojo indica las estaciones de muestreo (E3, E5, E7, E10) (original).

Fitobentos. Para estudiar el fitobentos se recolecto en abril del 2022, en cuatro estaciones alrededor del lago (E3, E5, E7, E10). Las coordenadas geográficas se registraron utilizando un móvil marca Apple, modelo iPhone 12. En cada una de ellas se utilizó un cuadrante circular de 24 cm de diámetro y sobre él, un cuadrante de 25 x 25 cm, con subcuadrantes de 3 x 3 cm, y se tomó la muestra correspondiente de la siguiente manera (Fig. 2).

- a) Registro de cobertura del tapete algal, fue considerado a partir del número de octavos que cubrían el área del cuadrante circular.

- b) Se recolectó el tapete algal del subcuadrante y con ayuda de un vernier se registró el grosor del mismo. Así como el color en contacto con el agua y el suelo (Necchi *et al.*, 1995).

Cobertura algal y biomasa. De este último subcuadrante se consideraron dos submuestras (n= 2), para calcular la biomasa por peso seco en el laboratorio con ayuda de una balanza analítica marca Aisnsworth modelo AA-160 (Arredondo & Voltolina, 2007).

Cultivos. A partir del lixiviado del tapete de *T. iztacalense*, se realizaron cultivos con medio BG11 y extracto de suelo (UTEX, 2022). Este material fue mantenido en un cámara de cultivo a 9 °C, con fotoperiodo 12:12, en el laboratorio de Zoología Acuática de la Unidad de Morfología y Función.

Una vez obtenido el material biológico del campo y de cultivo, la determinación taxonómica se realizó siguiendo los criterios de: Randhawa, (1959); Yamagishi, (1963), Gauthier-Lievre, (1965); Chen & Zhou, (1980); Wei *et al.* (1989); Wei & Ying-Kit, (2000) bajo el uso de un microscopio óptico Leica, además se obtuvieron imágenes de las observaciones con la ayuda de una cámara RisingCam modelo C3CMOS 10000KPA de 10 MP.

Variables físicas y químicas. En cada una de las estaciones se registraron once variables en la columna de agua del lago; *in situ*: se midieron la temperatura del agua se utilizó un termómetro marca Brannan, el pH se midió con un potenciómetro marca Cole Parmer, modelo Digi-sense; la transparencia, con el disco de Secchi, y la profundidad con una sondaleza marca Speedtech USA. La concentración de oxígeno disuelto se midió con la técnica de Winkler modificada. La alcalinidad total mediante titulometría con anaranjado de metilo (APHA *et al.*, 2005). La conductividad con un conductímetro marca Hanna modelo HI98312.

Posteriormente, en el laboratorio se realizó la cuantificación de nutrimentos, utilizando un espectrofotómetro marca Hach, modelo DR2800, para los ortofosfatos y nitratos se ocuparon los métodos 8114 y 8153 de molibdo vanadato y de reducción de cadmio respectivamente (APHA *et al.*, 2005). Finalmente, para la cuantificación de clorofila a

se utilizó el método de fluorimetría (Arar & Collins, 1997) a partir de una muestra de 25 mL de agua con un Fluorómetro modelo 10-AU, con apoyo del Laboratorio de Limnología Tropical de la FESI.

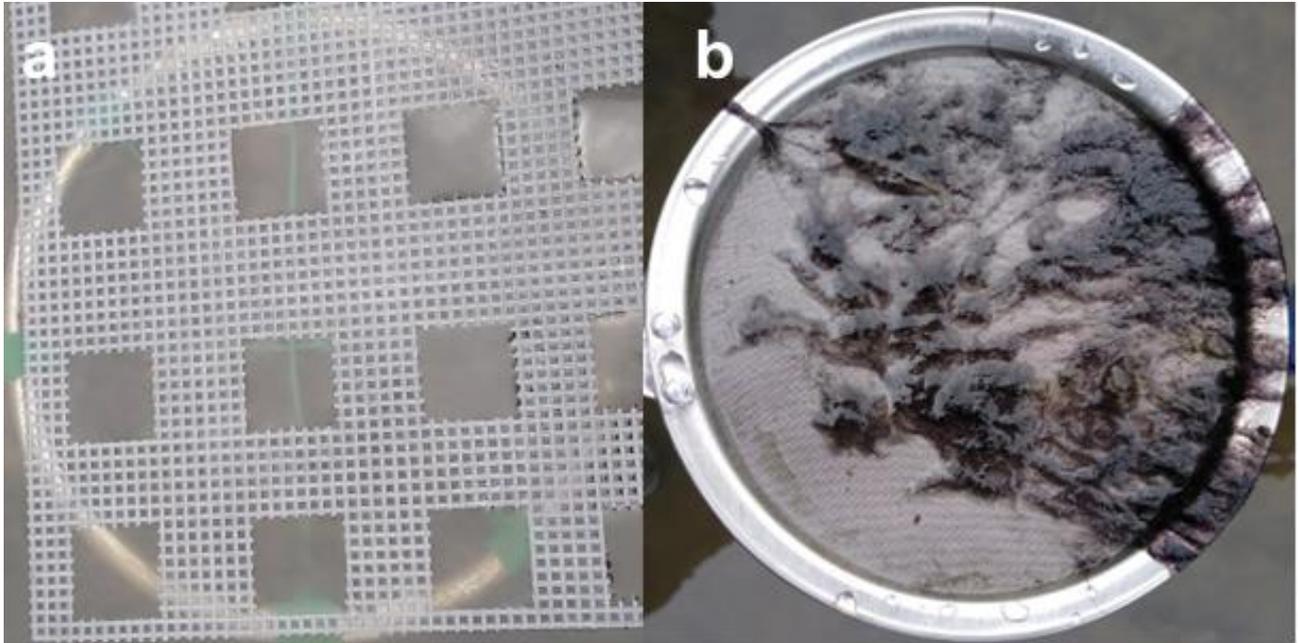


Fig. 2. a) Imagen de los cuadrantes utilizados. **b)** Plataforma para recolectar el fitobentos según el subcuadrante.

Análisis estadísticos. Para cada una de las estaciones se calcularon los índices Shannon-Wiener y Pielou (Krebs, 1999), los cuales permitieron obtener el índice de diversidad y equitatividad.

Con el propósito de identificar patrones en la distribución del fitobentos, se llevó a cabo, un análisis de conglomerados (AC) entre las estaciones estudiadas (Legendre & Legendre, 2012). Por lo cual, se elaboró una matriz que incluyó la presencia-ausencia, de los taxones determinados del área de estudio, se empleó el método de Ward (1963) algoritmo que permite medir la varianza mínima entre grupos, es decir, un agrupamiento jerárquico (Pielou, 1984; Legendre & Legendre, 2012).

De igual forma, considerando las medianas de las medidas largo versus ancho de *T. iztacalense* (n=40) de cada una de las estaciones estudiadas, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis, para lo cual se utilizó el software Past para Windows ver. 4.9 (Hammer *et al.*, 2001).

Paralelamente, con base en la presencia y ausencia de los taxones, se asoció la riqueza específica con cada una de las estaciones con el índice de Jaccard (Magurran, 2004).

Para determinar la categoría de las especies en: dominantes, constantes y raras del fitobentos se elaboró un análisis de Olmstead-Tukey (O-T) según Sokal & Rohlf, (1981). Para lo cual se aplicó el siguiente criterio: 1) Especies con valores de abundancia y de frecuencia por arriba del promedio se consideraron, **dominantes**; 2) Especies con valores por debajo del promedio de la abundancia, pero arriba del promedio de la frecuencia se consideraron, **comunes**, 3) Especies con valores por debajo del promedio de la abundancia pero por arriba del promedio de la frecuencia se consideraron como **frecuentes**, 4) Especies que registraron valores por debajo del promedio de la abundancia como de la frecuencia se categorizaron como, **raras**.

Catálogo. La documentación de las 20 especies de *Temnogametum* conocidas en el mundo; fue apoyada a partir de las referencias indicadas con un asterisco * en la sección de literatura citada. También, se agrega la diagnosis, distribución, referencias y esquemas para cada especie conocida. Así como un mapa de distribución mundial a partir de la georreferenciación de cada una de las especies.

Clave. Con la información obtenida, se generó una matriz de los caracteres y estados de carácter en una hoja en Microsoft Excel® que permitió seleccionar los caracteres diacríticos y confeccionar una clave dicotómica (Vilches *et al.*, 2012).

RESULTADOS

RIQUEZA ESPECÍFICA. A partir del material de campo sumado a los cultivos de cada estación de estudio, el fitobentos estuvo representado por 35 taxones que crecen entre los tapetes de *T. iztacalense*.

Según la clasificación de Guiry & Guiry (2021), se ubican siete *Phylum*, el mayor corresponde a 37% Cyanobacteria, seguida de 23% Bacillariophyta, 14% Chlorophyta, 14% Charophyta, 6% Euglenophyta, 3% Ochrophyta y 3% Miozoa (Fig. 3).

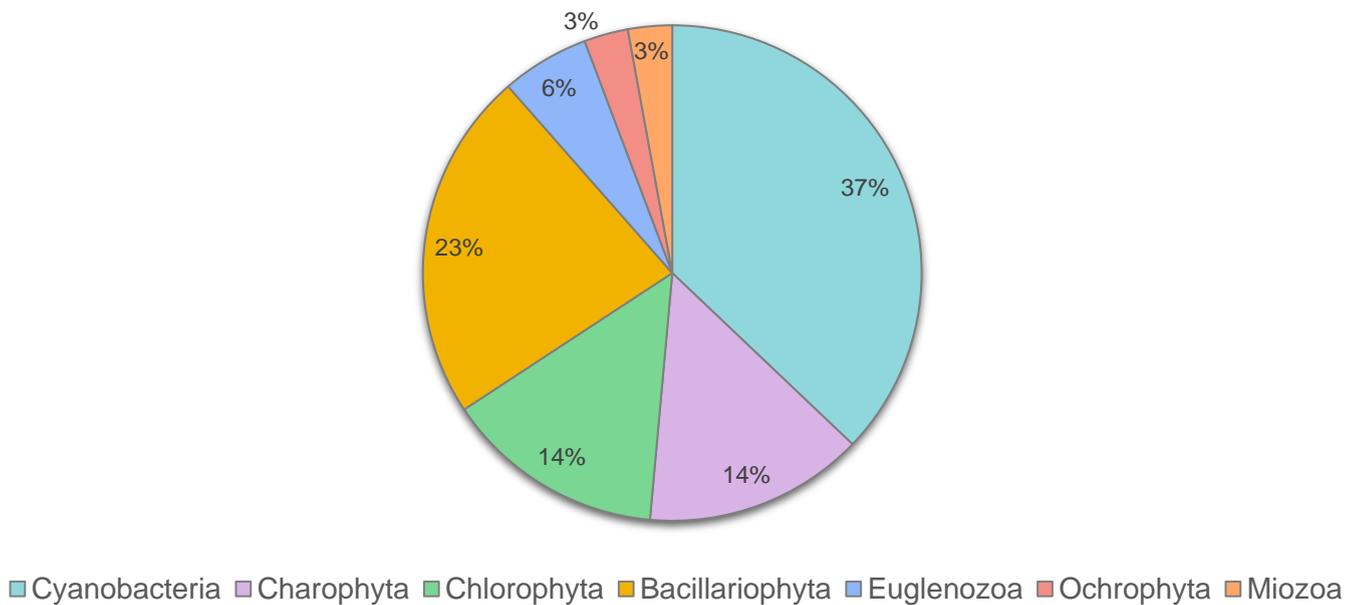


Fig. 3. Distribución porcentual de los taxones en siete *Phylum*.

En la Tabla 2, se indican 35 taxones que fueron determinados a partir de las muestras de campo, los taxones marcados con doble asterisco ** corresponden a los registros obtenidos a través de su cultivo en medio BG11. Del *Phylum* Cyanobacteria, el orden mejor representado fue Chroococcales, con tres representantes de la familia Microcystaceae. Así como, del *Phylum* Chlorophyta del orden Sphaeropleales, tres taxones de Scenedesmaceae, mientras que del *Phylum* Charophyta, orden Zygnematales dos taxones de Zygnemataceae. Por su parte, el *Phylum* Bacillariophyta, registro tres taxones del orden Bacillariales, familia Bacillariaceae.

Los 24 géneros marcados con negritas, corresponden a nuevos registros para el área de estudio. También se indica la presencia de cada taxón por estación estudiada, y la categoría, dominante (D), rara (R) y constante (C) según el criterio de Olmstead-Tukey (O-T), donde *T. iztocalense* la única especie dominante (D), seguida de 22 especies constantes (C) y 14 especies raras (R) (Tabla 2) (Fig. 5).

De los taxones (54.3%) de las especies se encontraron en las cuatro estaciones, 28% en tres de las estaciones, en una o dos de las estaciones con un 8.5%.

Tabla 2. Fitobentos determinado a partir del material de campo y cultivos de lago la Luna, Nevado de Toluca, (en bold taxa determinados a partir de cultivos).

Phylum	Clase	Orden	Familia	Género o Especie	Categoría O-T	E3	E5	E7	E10
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Chroococcales	Chroococcaceae	Chroococcus sp	R	x			x
			Cyanothrichaceae	Johannesbaptistia sp**	R	x			
			Microcystaceae	Eucapsis sp	R	x	x	x	x
				Merismopedia tenuissima	R	x	x		x
			<i>Synechocystis sp</i>	R		x	x	x	
		Geitlerinematales	Geitlerinemataceae	Geitlerinema sp	C	x	x	x	x
		Nodosilineales	Cymatolegaceae	Cyanodictyon sp	C	x	x	x	x
		Nostocales	Aphanizomenonaceae	Dolichospermum sp	C	x	x	x	x
		Leptolyngbyales	Leptolyngbyaceae	Stenomitus frigidus**	C	x	x	x	x
		Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	<i>Oscillatoria sp</i>	C	x	x	x	x
		Phormidium sp**	R	x					
Charophyta	Klebsormiophyceae	Klebsormidiales	Klebsormidiaceae	Klebsormidium sp	C	x	x	x	x
		Desmidiiales	Desmidiaceae	Cosmarium tinctum	C	x	x	x	x
	Zygnematophyceae	Zygnematales	Mesotaeniaceae	Netrium sp	R	x		x	x
			<i>Zygnema sp</i>	R	x	x	x	x	
			<i>Temnogametum iztocalense</i>	D	x	x	x	x	
Chlorophyta	Chlorophyceae	Chlamydomonadales	Sphaerocystidaceae	<i>Sphaerocystis sp**</i>	C	x	x	x	x
		Oedogoniales	Oedogoniaceae	<i>Oedogonium sp</i>	C	x	x	x	x
		Sphaeropleales	Scenedesmaceae	Desmodesmus flavescens	R	x		x	
				Scenedesmus acuminatus**	C	x	x	x	
				Scenedesmus circumfusus**	C	x	x	x	
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Achnanthes	Achnantheaceae	<i>Achnantes sp</i>	R	x	x		x
			Cocconeidaceae	Cocconeis sp**	C		x	x	x
		Bacillariales	Bacillariaceae	Fragilariopsis sp	R	x		x	x
				<i>Hantzschia sp**</i>	C	x	x	x	x
				<i>Nitzschia sp</i>	C	x	x	x	x
		Cymbellales	Cymbellaceae	<i>Cymbella sp</i>	C	x	x	x	x
		Rhopalodiales	Rhopalodiaceae	Epithemia sp**	C	x	x	x	x
Naviculales	Naviculaceae	<i>Navicula sp</i>	C	x	x	x			
Euglenozoa	Euglenophyceae	Euglenales	Euglenaceae	Euglena sp	R	x		x	x
			Phacaceae	Lepocinlis sp**	C	x			x
Ochrophyta	Chrysophyceae	Chrysosphaerales	Chrysosphaeraceae	Chrysosphaera sp	R	x	x	x	x
Miozoa	Dinophyceae	Peridinales	Peridiniaceae	<i>Peridinium willei</i>	R				x

Como se observa en la Fig. 4, la estación con mayor riqueza específica fue E3 con 32 taxones, seguida de la E10 con 29 y la E7 con 28, mientras que la E5 solo presentó 25 taxones. En todas las estaciones el *Phylum* con mayor riqueza específica fue Cyanobacteria con 13 taxones, seguida de Charophyta y Chlorophyta cada uno con 5. A su vez los *Phylum* con menor riqueza específica fueron Euglenozoa con 2 taxones, Ochrophyta y Miozoa cada uno con un representante.

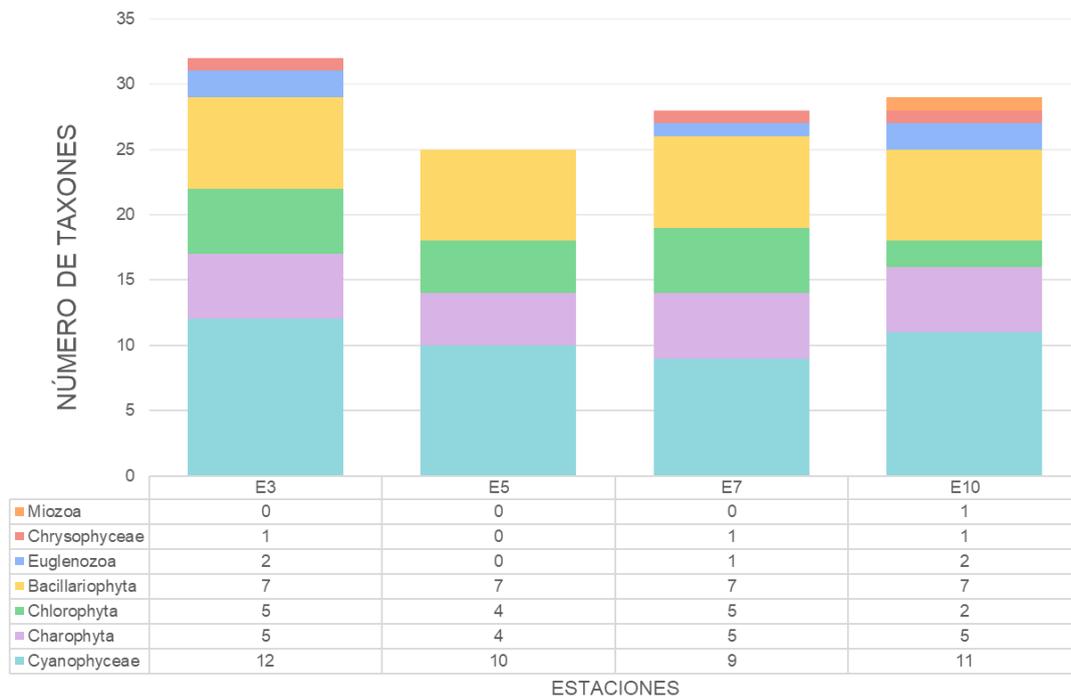


Fig. 4. Número de taxones por *Phylum* registrados en cada estación de estudio.

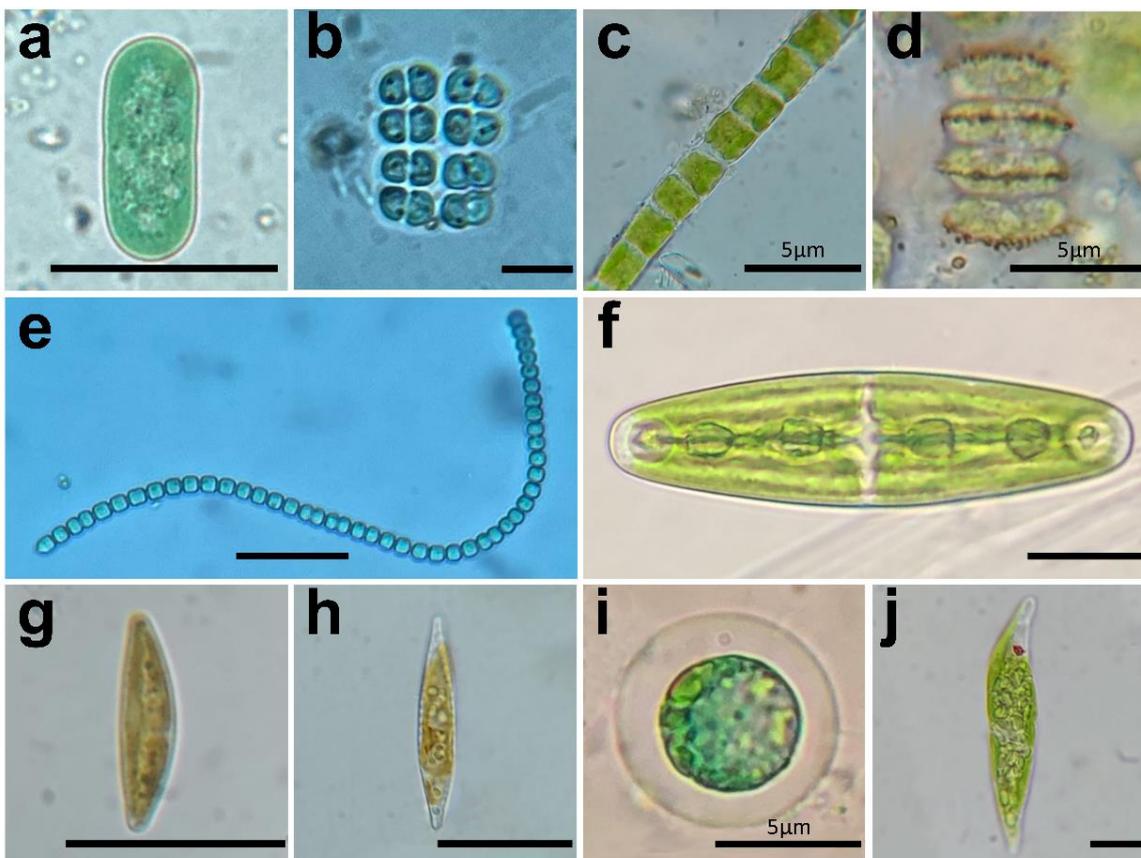


Fig. 5. Especies determinadas a partir de cultivos y material de campo. a) *Synechococcus* sp; b) *Merismopedia tenuissima*; c) *Klebsormidium* sp; d) *Desmodesmus flavescens*; e) *Dolichospermum* sp; f) *Netrium* sp; g) *Cymbella* sp; h) *Hantzschia* sp; i) *Sphaerocystis* sp; j) *Euglena* sp. Barra de escala= 10 µm.

CARACTERIZACION MOROFOLÓGICA DE *T. Iztacalense*. En la Tabla 3, se indican los datos de las muestras analizadas de *T. iztacalense*, en cada una de las estaciones (n=40); en todas se observaron filamentos con el citoplasma de color púrpura e inicios de la reproducción sexual escaleriforme, así como la formación de aplanosporas y células en estado vegetativo (Fig. 6). La población registró los siguientes caracteres en las células vegetativas: ancho de 14-23 μm , largo de 19-282 μm y pirenoides de 4-21.

Tabla 3. Intervalo de medidas morfométricas de una población silvestre de *T. iztacalense* (n=40) durante la época de estiaje (2022)

Estación	Ancho (μm)	Largo (μm)	Número de pirenoides
E3	14 - 20	45 - 260	6 - 14
E5	14 - 23	66 - 282	9 - 21
E7	14 - 20	19 - 271	6 - 19
E10	17 - 23	29 - 261	4 - 20

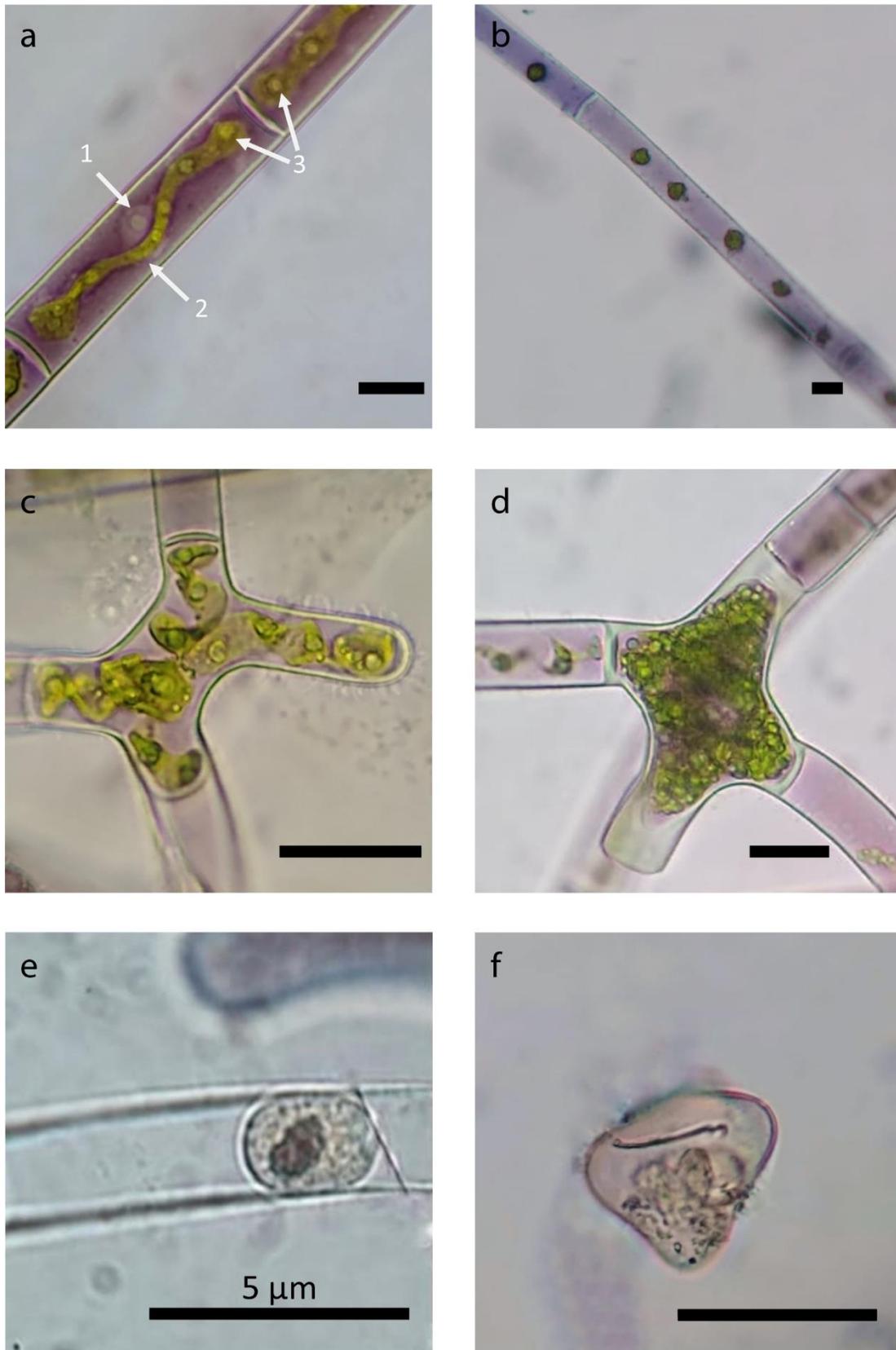


Fig. 6. Detalles de los filamentos de la población silvestre de *T. iztacalense*. **a)** célula vegetativa con núcleo (1), plastos (2) y pirenoides (3), **b)** pirenoides organizados en una hilera, **c)** puente de conjugación escaleriforme, **d)** inicio de la formación de la zigospora, **e)** aplanospora, **f)** zigospora madura con línea de dehiscencia. Barra de escala = 10 µm.

COBERTURA ALGAL Y BIOMASA DEL FITOBENTOS. En la Tabla 4, se observan los registros de la cobertura cuantificada a través de los cuadrantes utilizados, que osciló del 40-90%. La estación con mayor porcentaje de cobertura algal y biomasa fue la E5, con el 90% y 3.1 g, mientras que la E10, con el 70% fue la de menor biomasa con 0.48 g.

Tabla 4. Registro de la cobertura del fitobentos estudiado en las estaciones del litoral del lago La Luna, durante la época de estiaje (abril- 2022)

	E3	E5	E7	E10
Cobertura algal (%)	40	90	50	70
Peso húmedo (g)	4	8	7	1
Peso seco (g)	0.9	3.1	2.1	0.5

VARIABLES FÍSICAS Y QUÍMICAS. En la tabla 5, se indican los registros de once variables cuantificadas en cada una de las estaciones seleccionadas a lo largo del litoral del lago. Donde, la temperatura ambiental osciló de 4 a 8°C; mientras, la temperatura en el agua en general fue de 10°C. El pH del agua, registró valores ácidos; entre 4.1 y 5.8. También, el pH del suelo adyacente al tapete de *Temnogametum* fue ácido entre valores de 3.2-4.7. El ecosistema estudiado presentó baja mineralización, buena concentración de oxígeno disuelto, y bajos valores de conductividad y nitratos, fosfatos y clorofila a.

Tabla 5. Registro de las variables físicas, químicas y nutrimentos de las estaciones litorales del lago La Luna durante la época de estiaje

Variables	E3	E5	E7	E10
Temperatura ambiental (°C)	8	4 - 6	4	8
Temperatura del agua (°C)	8	10	10	10
pH agua	4.1	5.8	4.2	4.5
pH suelo	3.7	4	3.2	4.7
Oxígeno disuelto (mg. L⁻¹)	2.6	2.6	2.6	2.6
Conductividad (µS cm⁻¹)	20	10	10	10
Alcalinidad total CaCO₃ (mg. L⁻¹)	4	6	3	3
Profundidad (m)	0.35	0.25	0.25	0.25
Nitratos (mg. L⁻¹)	1	0.6	2.4	0.0
Fosfatos (mg. L⁻¹)	1.3	1.5	1.4	1.0
Clorofila a (µg L⁻¹)	.052	0.15	.052	0.074

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS. En la Tabla 6 se muestra el índice de Shannon-Wiener para cada estación, en cual oscilo entre 0.8 y 1.4 bits/ind. Es decir, de forma general al tener H' (<2). se corrobora que el lago La Luna es un ecosistema con baja diversidad. A su vez, el índice de Pielou indicó que no hay equitatividad entre las especies de cada estación (tabla 6).

Tabla 6. Índice de Shannon-Wiener e índice de Pielou, de las estaciones estudiadas del lago La Luna, Nevado de Toluca

	E3	E5	E7	E10
Índice de S-W (H') bit/ind.	0.8566903	1.3906289	1.331643	1.0205113
Índice de Pielou	0.1713381	0.2994556	0.2770012	0.2041023

En la Fig. 7, se observan el patrón de distribución de la composición del fitobentos, con base en el AC con un coeficiente de correlación cofenética del 67% y una distancia euclidiana de 2, donde se formaron dos grupos, a partir de las cuatro estaciones estudiadas. El grupo I, constituido por las estaciones E10 y E3, mostró un índice de Jaccard (Tabla 7) con menor similitud (76%), mientras que el grupo II conformado por las estaciones E5 y E7 mostró un índice de 80%.

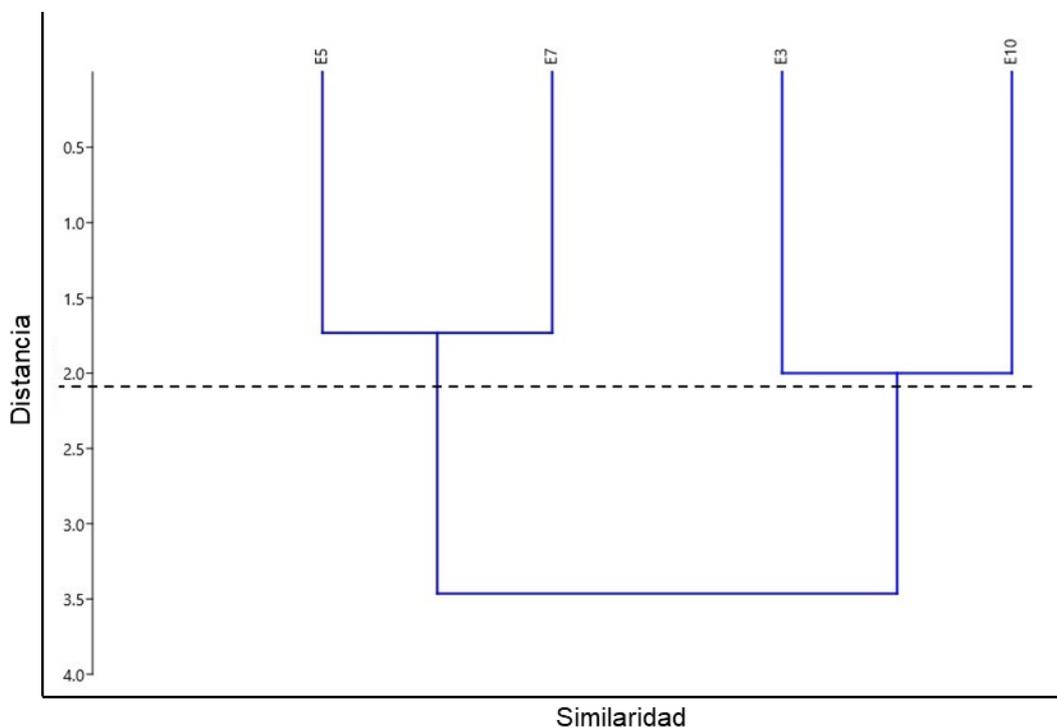


Fig. 7. Análisis de conglomerados con base en la presencia-ausencia de los taxones estudiados del lago La Luna, Edo. Mex.

Tabla 7. Índice de Jaccard de las estaciones estudiadas del lago La Luna, Nevado de Toluca

	E3	E5	E7	E10
E3	1	0.70588235	0.76470588	0.76470588
E5	0.70588235	1	0.8	0.74193548
E7	0.76470588	0.8	1	0.75
E10	0.76470588	0.74193548	0.75	1

Con respecto al registro de las mediciones del largo y ancho celular de *T. iztacalense* (n=40) en cada una de las estaciones se observó que la mediana entre la E3 y E10 son semejantes (142-147 μm); mientras que, las medianas de E5 y E7 fueron (164-131 μm) por lo cual mostraron mayor diferencia entre las estaciones (Fig. 8).

Para comprobar la diferencia significativa entre las estaciones de estudio, se calculó la prueba Kruskal-Wallis ($p= 0.36$; $>p= 0.05$), lo que indicó que no hay diferencias significativas entre las medidas consideradas de *T. iztacalense* (Tabla 8).

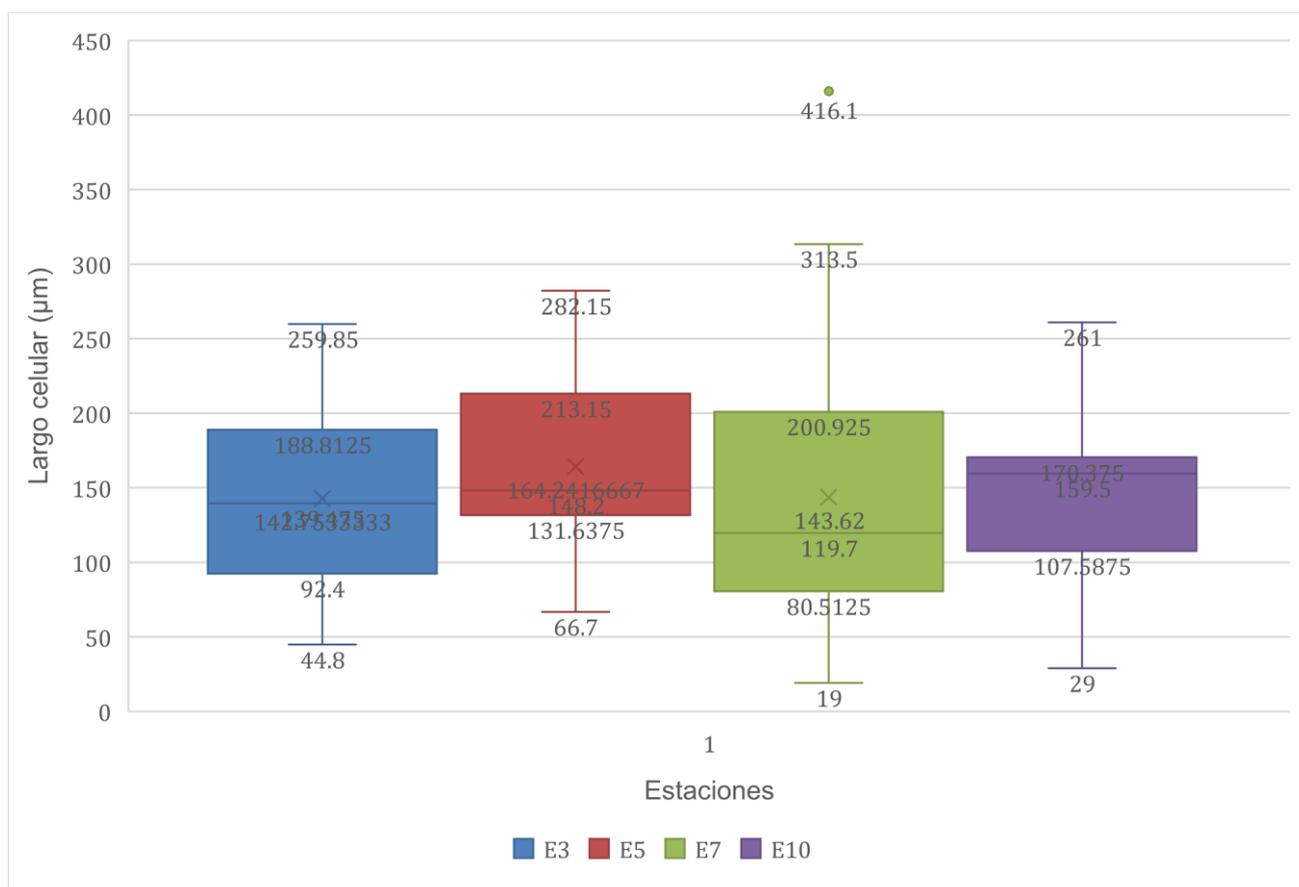


Fig. 8. Registro entre largo vs ancho de *T. iztacalense* en cada una de las estaciones estudiadas del lago La Luna, Edo. México.

Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis entre las mediciones de *T. iztacalense* en las estaciones de estudio.

Prueba de Kruskal-Wallis para medias iguales	
H (chi2):	3.201
Hc (corregido):	3.203
p:	0.3614

CATÁLOGO

El catálogo fue documentado con la bibliografía especializada marcada con asterisco * en las referencias, se realizó la descripción de cada una de las especies citadas en el mundo, así como también se registró la distribución y diagnóstico de las 20 especies de *Temnogametum*.

El género ***Temnogametum*** fue establecido por W. et G. S. West en 1897 para incluir aquellos taxones de Zygnemataceae con células vegetativas y cloroplastos muy similares a los de *Mougeotia*; pero con gametangios claramente diferenciados de las células vegetativas antes de la conjugación.

En *Mougeotia* el contenido de la célula vegetativa se contrae a la mitad de esta dejando detrás de una cierta cantidad de residuos citoplasmáticos. paredes cruzadas que luego se forman separando esta célula mediana (esporangio) de los dos extremos no vivos de la célula. Mientras que, en *Temnogametum*, dos células vegetativas separan los gametangios adyacentes entre sí con una pared celular primaria y permanecen vivas durante la reproducción, los gametangios acumulan alimentos y se vuelven muy densos. Luego se disuelve el muro de separación principal y los dos gametos formados a partir de dos células vegetativas distintas se unen y forman un cigoto.

Las células vegetativas son cilíndricas, con paredes transversales planas, 2-3 veces más largas que anchas, unidas en filamentos no ramificados. En cada célula, se localiza un cloroplasto en forma de placa o cinta, con pirenoides dispuestos en una o varias hileras (Fig. 9a) (Transeau, 1932). En estado vegetativo, *Temnogametum* es

muy parecida a los géneros *Mougeotia* y *Debarya* que ambas pueden tener citosol de color púrpura.

La reproducción sexual se realiza por amebogametos isogamos, conjugación escaleriforme o lateral resultando la formación de dos tipos de zigosporas. Los gametos se forman en células donadoras y receptoras, donde esta última produce nuevas paredes para formar la zigospora.

En la conjugación escaleriforme, el cigoto se encuentra en un canal expandido entre la célula donadora y receptora (Fig. 9b). La pared transversal de la célula vegetativa, está completamente disuelta en este momento. Los cigotos son poligonales en el plano longitudinal del canal, con lados convexos, muy raramente cóncavos. También, pueden reproducirse por conjugación lateral, donde los gametos formados en dos gametangios adyacentes del mismo filamento se unen para formar el cigoto; estos pueden ser elipsoidales.

El color del cigoto puede ser: amarillo, pardo, rosa o incoloro; liso o escrobiculado. Algunas especies, producen azigosporas (Randhawa, 1959; Kadlubowska, 1984).

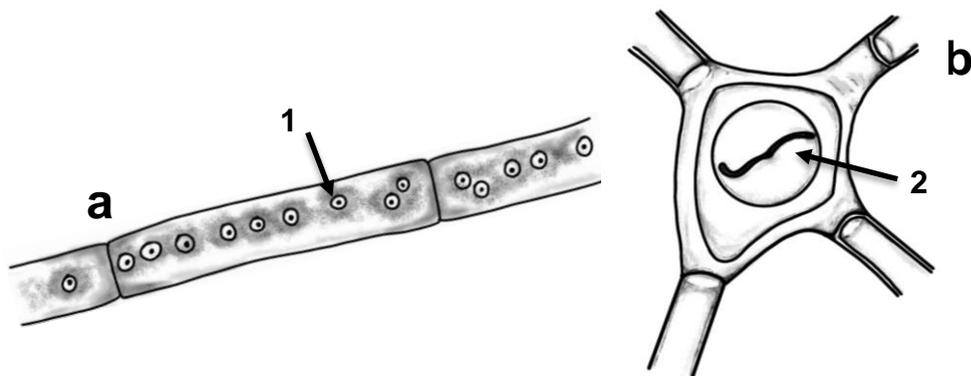


Fig. 9. a) Célula vegetativa con pirenoides (1); **b)** Conjugación escaleriforme, zigospora con línea de dehiscencia en forma sigmoideal (riss line) (2).

En la Fig. 10, se muestra la distribución mundial del género, la cual ha sido citada en regiones tropicales: India, China, África, México (Garduño-Solórzano *et al.*, 2020), Ecuador, Brasil (Kadlubowska, 1984). Mientras, *T. boreale* de Japón para regiones boreales (Yamagishi, 1963).

Distribución del género *Temnogametum* en el Mundo

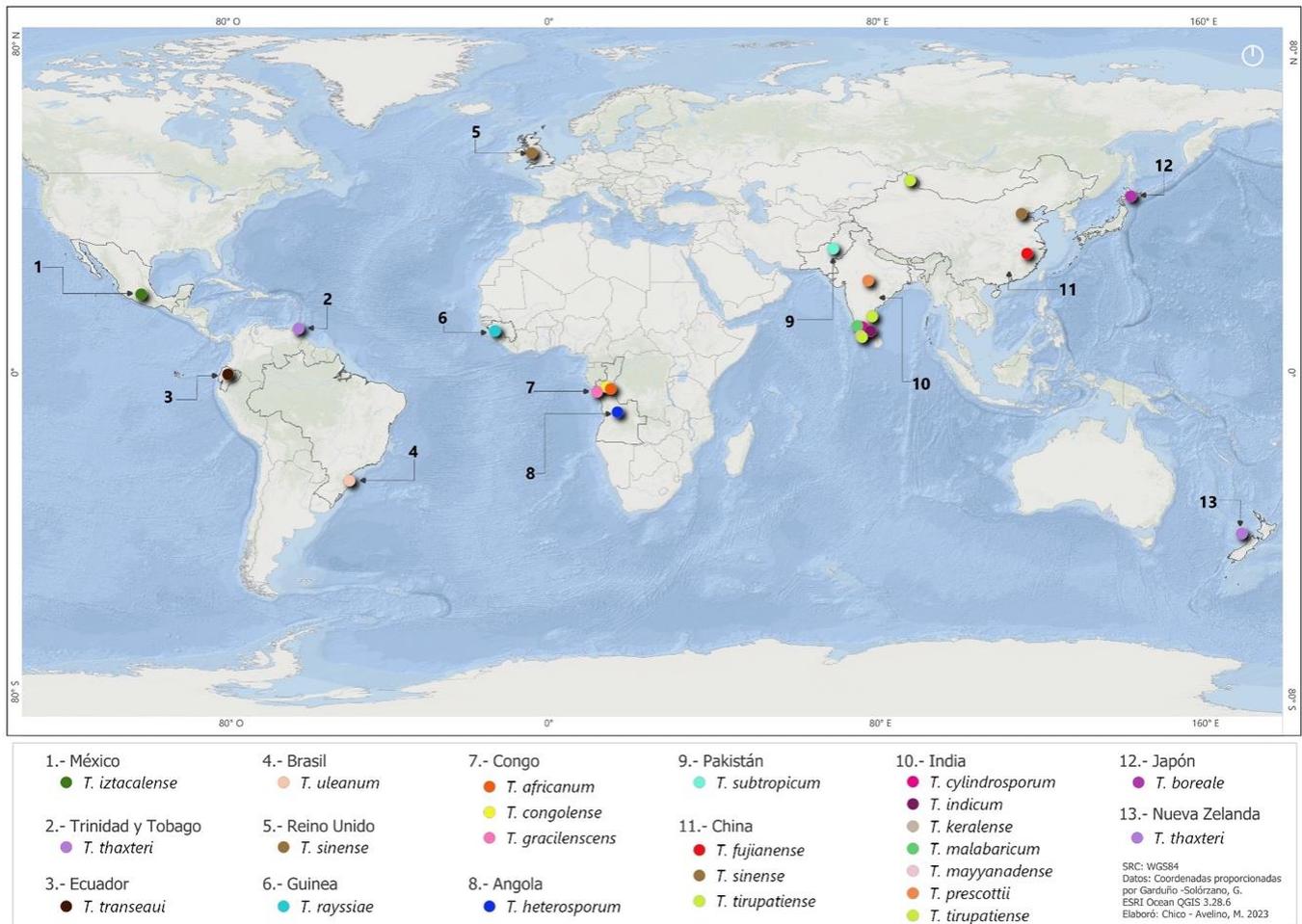


Fig. 10. Mapa de la distribución mundial del género *Temnogametum*.

Temnogametum africanum Gauthier-Lièvre 1965

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 18-25 μm de ancho, 120-260 μm de largo; con plastos que contienen de 6-12 pirenoides en hilera. Citosol color púrpura. Conjugación escaleriforme. Zigosporas cuadrangulares con regiones cóncavas, de perfil ovoide o lenticular de 43-50 X 58-78 X 42-55 μm . Exosporio muy grueso, lamelado, liso y rosa tenue (Fig. 11).

Distribución: África.

Hábitat: Conocido de los páramos cerca de Brazzaville, cerca de Congo. Común en mayo y junio.

Altitud: 320 m s.n.m.

Referencias: Gauthier-Lievre, 1965: 44, Lám. XI, Figs, a-a'', b; Kadlubowska, 1984: 134, Fig. 180.

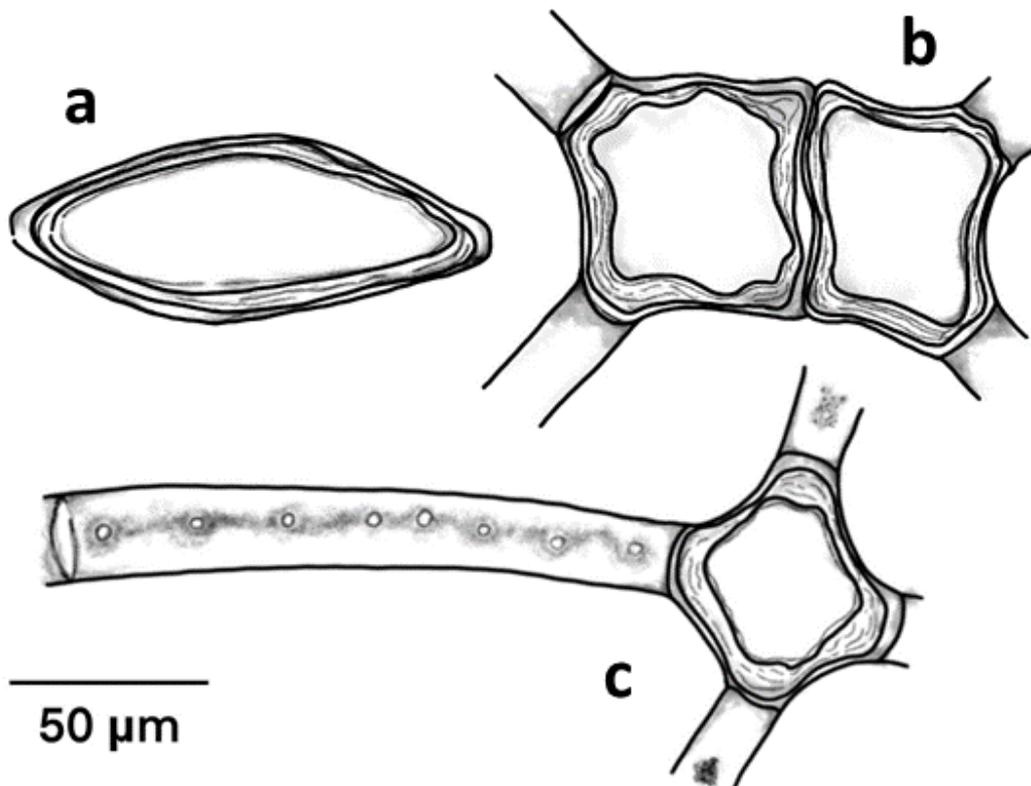


Fig. 11. a) Zigospora en vista lateral; b) Zigosporas cuadrangulares; c) Célula vegetativa con pirenoides en hilera e inicio de reproducción escaleriforme

Temnogametum boreale Yamagishi 1963

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 14-19 μm de ancho, 210-390 μm de largo, con plastos en forma de placa axial, con 10-18 pirenoides en hilera. Conjugación escaleriforme. Gametangios de 40-75 μm de largo. Zigospora se forma en los tubos de conjugación muy agrandados, además, sobresaliendo en ambas células gametangiales, el espacio restante de las células gametangiales se llena con material coloidal refractivo. Zigospora irregularmente cuadrangular con ángulos redondeados y lados cóncavos, 38-48 x 34-48 μm . Exosporio delgado, liso y amarillo, mesosporio grueso, liso y pardo (Fig. 12).

Distribución: Horomui, Japón.

Hábitat: Campos de arroz.

Altitud: 8 m s.n.m.

Referencias: Yamagishi, 1963: 215-218, Figs.1-10.

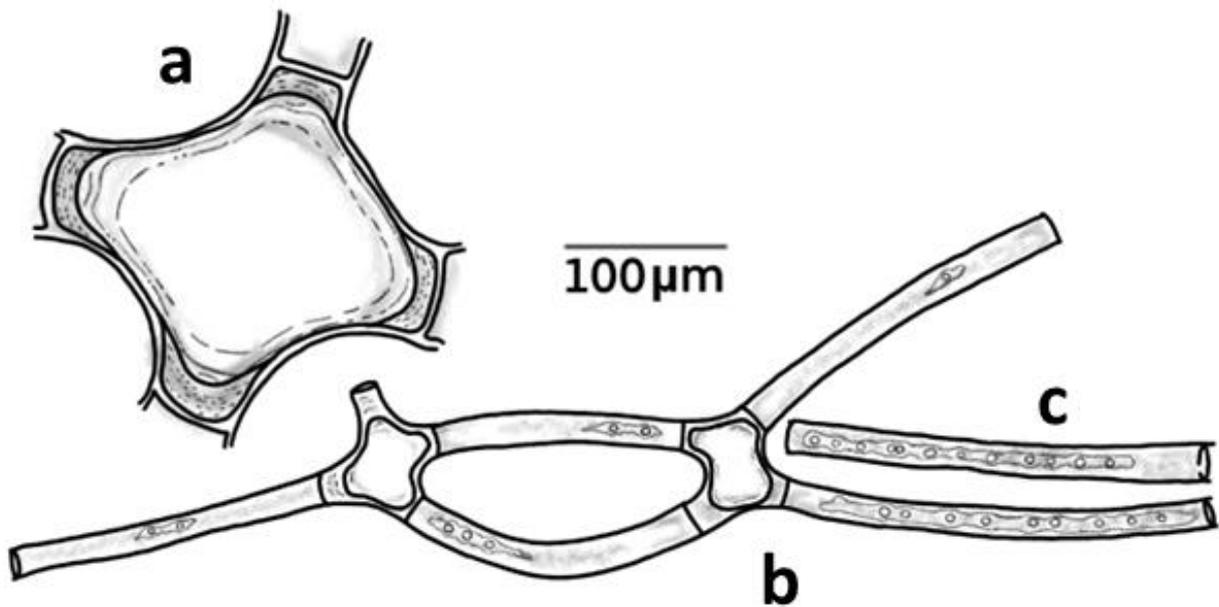


Fig. 12. a) Zigospora en vista frontal; b) Célula vegetativa con inicio de conjugación; c) Célula vegetativa con pirenoides en hilera.

Temnogametum congolense Gauthier-Lièvre 1965

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 12-14 μm de ancho, 270 μm de largo; con plastos que contienen de 6-10 pirenoides en hilera. Conjugación lateral. Zigospora ovoide-elipsoidal, de 30-32 μm de ancho, 58-62 μm de largo, exosporio grueso, liso, de color amarillo-rosado, con línea de dehiscencia sigmoide (Fig. 13).

Distribución: África, Congo medio

Hábitat: Conocido de un estanque cerca de Brazzaville, cerca de Congo medio; bastante común en marzo.

Nota: Esta especie está cerca de *T. uleanum*, de la cual se diferencia por dimensiones más largas y más pirenoides, así como por la ausencia de reproducción escaleriforme.

Referencia: Gauthier-Lievre, 1965: 44, Lám. X, Figs. g-g'; Kadlubowska, 1984: 132, Fig. 177.

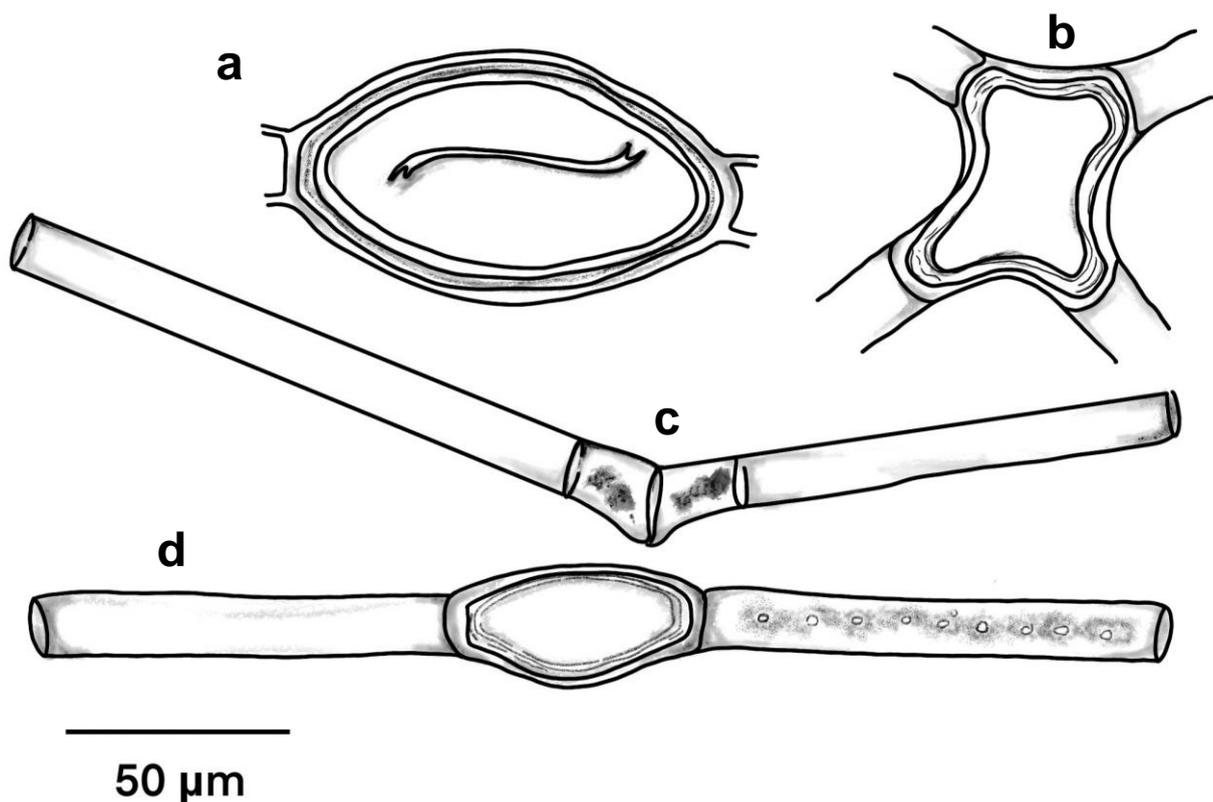


Fig. 13. a) Zigospora ovoide con línea de dehiscencia; b) Zigospora al inicio de la conjugación; c) Célula vegetativa con inicio de conjugación lateral; d) Célula vegetativa con pirenoides en hilera y zigospora.

Temnogametum cylindrosporum Iyengar 1958

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 43-48 μm de ancho, 192-384 μm de largo; con plastos que contienen de 10-18 pirenoides en hilera, gametangios de 43-49 de ancho x 50-66 μm de ancho. Se desconoce la formación de la zigospora. Con azigosporas cuadradas-cilíndricas. Mesosporio grueso, liso y de color naranja dorado-pardo, 43-49 μm ancho y 50-65 μm de largo, con línea de dehiscencia sigmoide (Fig. 14).

Distribución: En corrientes oeste Ghats, Distrito Coimbatore, Madras, India.

Referencias: Randhawa, 1959: 181,184, Fig.113; Kadlubowska, 1984: 137, Fig. 185.

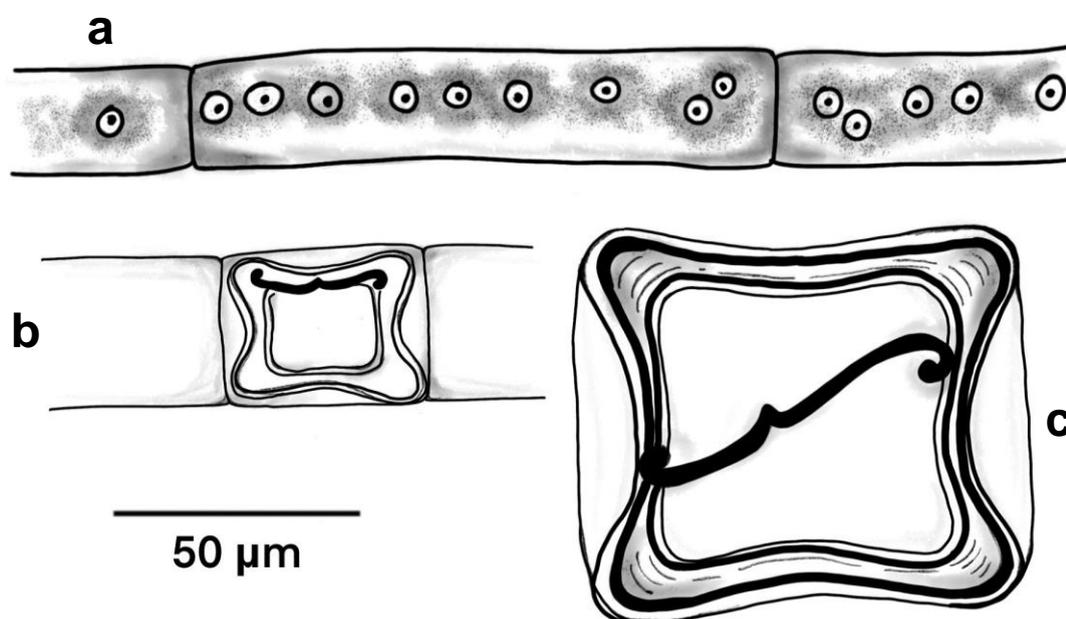


Fig. 14. a) Célula vegetativa con pirenoides en hilera; b) Zigospora al inicio de la conjugación; c) Zigospora con línea de dehiscencia.

Temnogametum fujianense Chen & Zhou 1980

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 10 -14 μm de ancho, 72- 256 μm de largo, con plastos que contienen de 5 - 12 pirenoides en hilera. Citoplasma púrpura, con un cromatóforo único en forma de placa. Conjugación principalmente escaleriforme, raramente lateral. Zigospora cuadrangular de 24-36 μm de largo x 24-38 μm de ancho. Exosporio delgado-hialino, mesosporio grueso y pardo, con línea de dehiscencia sigmoide (Fig. 15).

Distribución: China

Hábitat: Montaña Gushan, Fujian.

Referencias: Chen, 1980: 285-286+ 291-292. Lám. I, Figs. 1-7, Lám. II. Figs. 1-4.

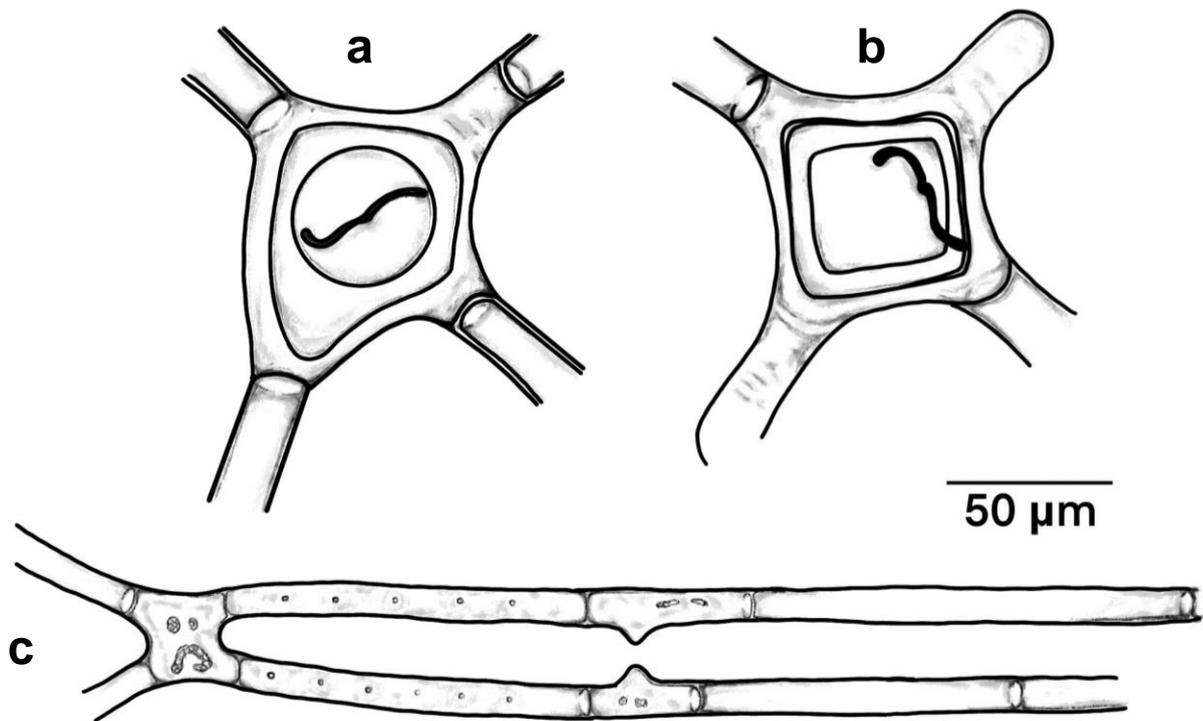


Fig. 15. a, b) Zigospora con línea de dehiscencia; c) Célula vegetativa al inicio de conjugación escaleriforme.

Temnogametum gracilescens Gauthier-Lièvre 1965

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 8-10 μm de ancho, 170 μm de largo; plastos que contienen de 6-16 pirenoides en hilera. Conjugación escaleriforme. Zigospora cuadrangular, fuertemente cóncava, de 28-38 x 35-44 x 23 μm de ancho, ovoide de perfil. Exosporio grueso, estratificado, amarillo o pardo brillante. Mesosporio escrobiculado (con pequeñas depresiones); línea de dehiscencia sigmoide (Fig. 16).

Distribución: África.

Hábitat: Pantanos en el Congo, común en otoño

Referencias: Gauthier-Lievre, 1965: 45, Lám. XI, figs. c-g; Kadlubowska, 1984: 133, Fig. 178.

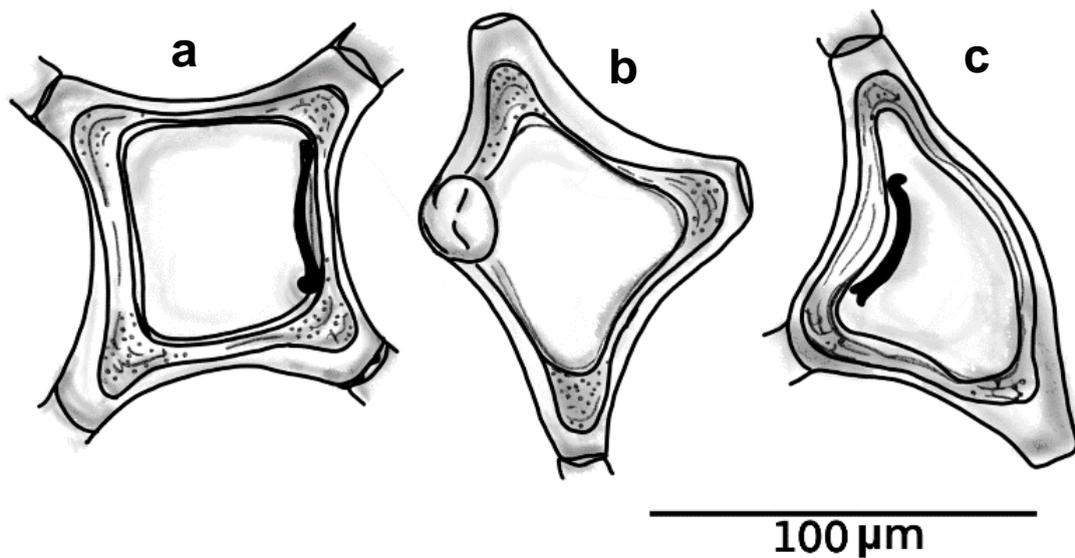


Fig. 16. a) Zigospora en vista frontal con línea de dehiscencia; b) zigospora inmadura, c) Zigospora en vista lateral.

Temnogametum heterosporum W. et G. S. West 1897

Basionimo: Mougeotia heterospora (W. et G. S. West) Czurda 1932

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 13-17 μm de ancho, 90-200 μm de largo; cloroplastos con 1-6 pirenoides en hilera. Gametangios de 22-40 μm de largo. Conjugación escaleriforme y lateral. Zigosporas cuadrangulares fuertemente cóncavas, de 39-60 x 48-60 μm , lisas, rosa-amarillenta. Con línea de dehiscencia sigmoide corta. En conjugación lateral, ovoides y oblicuos, con terminaciones truncadas, de 20-36 x 55-70 μm aproximadamente, pared lisa e incolora (Fig. 17).

Distribución: Morro de Lopollo, Angola, África, Feb., 1860. Welwitsch collection. No. 172 (British Museum).

Hábitat: Pantanos y estanques. Formando masas intrincadas con *Ganotonema tropicum*, *Zygnema spontaneum* y *Stigeoclonium*.

Referencias: West & West, 1897:35-37. Lám. 370. Figs. 5 -9; Transeau, 1932: 489, pl 1. Figs. 9-13; Randhawa, 1959: 180-18, Fig. 111; Gauthier-Lievre, 1965: 45, Lám. X, Figs. f-f'; Kadlubowska, 1984: 129, 133. Fig. 175.

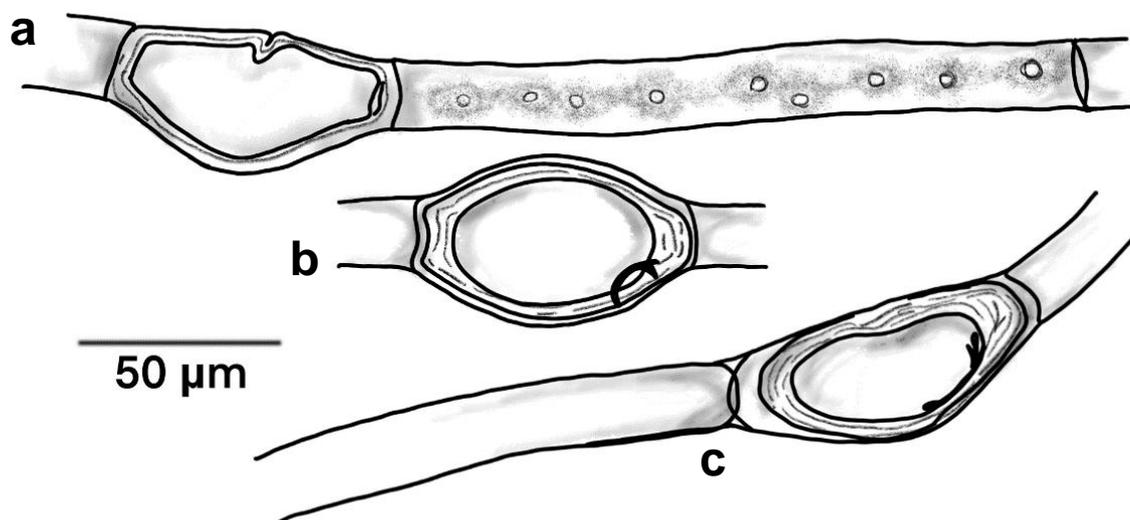


Fig. 17. a) Célula vegetativa con inicio de conjugación; **b, c)** Zigospora en conjugación lateral.

Temnogametum indicum Iyengar 1958

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 19-32 μm de ancho; con plastos que contienen de 8-32 pirenoides en hilera. Citosol color púrpura. Conjugación escaleriforme y lateral. Gametangios de 19-23 x 20-25 μm . Zigospora por conjugación irregularmente cuadrangulares, de 52-56 x 35-45 μm , mesosporio grueso, liso, color naranja dorado. Línea de dehiscencia en forma de sigmoide (Fig. 18).

Distribución: En pequeños canales de selvas, Sur de Madras, India

Referencias: Kadlubowska, 1984: 132, Fig. 176.

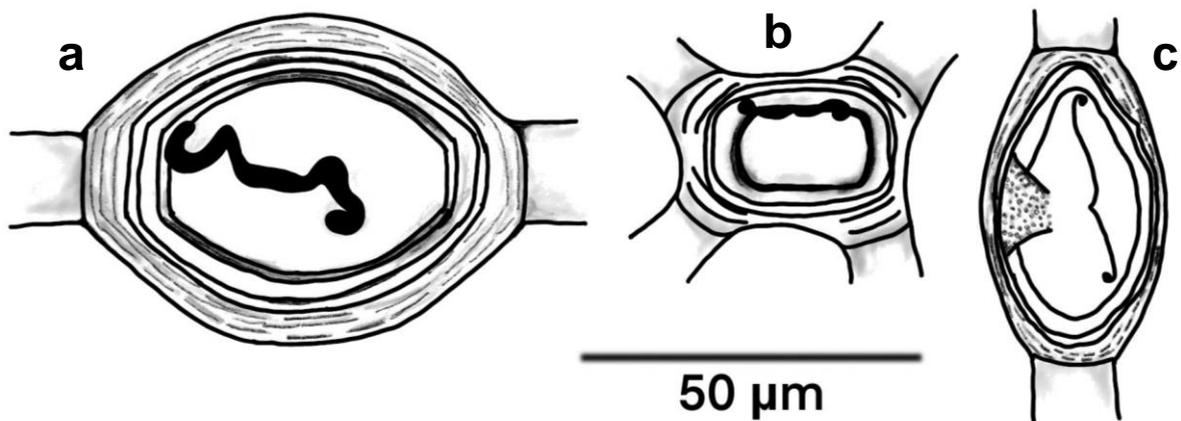


Fig. 18. a) Zigospora con línea de dehiscencia; b) Zigospora en conjugación escaleriforme; c) Zigospora en conjugación lateral.

Temnogametum iztacalense Garduño *et* Martínez 2020

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 12-20 μm de ancho y 71-387 μm de largo; con plastos que contienen de 3-16 pirenoides en una hilera. Citosol color púrpura. Conjugación escaleriforme y lateral. Con gametangios de 13-19 x 17-23 μm . Zigospora oblato-esferoidal, ovoide o triangular, de 30 - 60 μm y de 30 - 57 μm x 12- 20 μm . Exosporio amarillo, mesosporio finamente punteada y parda. Con línea de dehiscencia sigmoideal. Aplanosporas de 10 - 20 x 19 - 40 μm (Fig. 19).

Distribución: México.

Hábitat: Lago tropical de alta montaña (4250 m s.n.m.), La Luna, Nevado de Toluca, Edo. Mex., pH ácido y ultraoligotrófico.

Herbario: IZTA 1886,1895,1902.

Referencias: Garduño-Solórzano *et al.*, 2020: 159-173. Figs. 13-17.

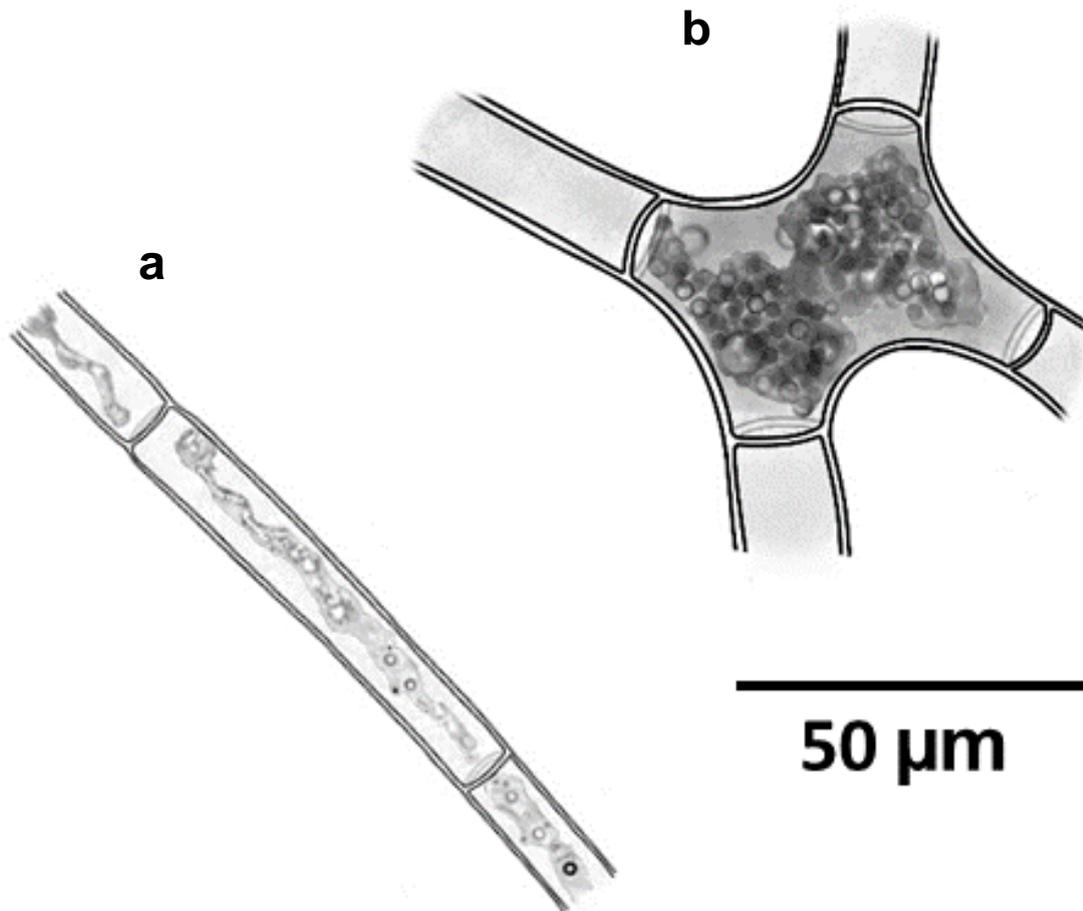


Fig. 19. a) Célula vegetativa con pirenoides en hilera; b) Filamentos en conjugación escaleriforme.

Temnogametum keralense Panikkar et Ampili 1988

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 38-44 μm de ancho, 3-8 veces más largas que ancho, con plastos en forma de placa con pliegues profundos que contienen de 52-195 pirenoides dispersos. Citosol color púrpura. Conjugación ausente. Azigosporas en gametangios cortos separados de las células vegetativas, de 37-44 x 35-53 μm . Cuadradas y cilíndricas, con terminaciones deprimidas y cóncavas, paredes laterales con muchas depresiones. Pueden formarse hasta tres en serie. Exosporio y endosporio delgado, hialino, mesosporio grueso, liso y dorado-marrón. Con línea de dehiscencia sigmoide. Semejante a *T. cylindrospermum* (Fig. 20).

Distribución: Mayyanad, Quilon distrito de Kerala, Kerala Sur de India.

Hábitat: Aguas someras de campos de cultivo de arroz y plantaciones de coco. Crece asociada con *T. mayyanadense*, *Desmidium*, *Spirogyra* y *Zygnema*.

Herbario: colecta 785 (Panikkar & Ampili).

Referencias: Panikkar, 1988: 12: 387-399, Figs. 1-9.

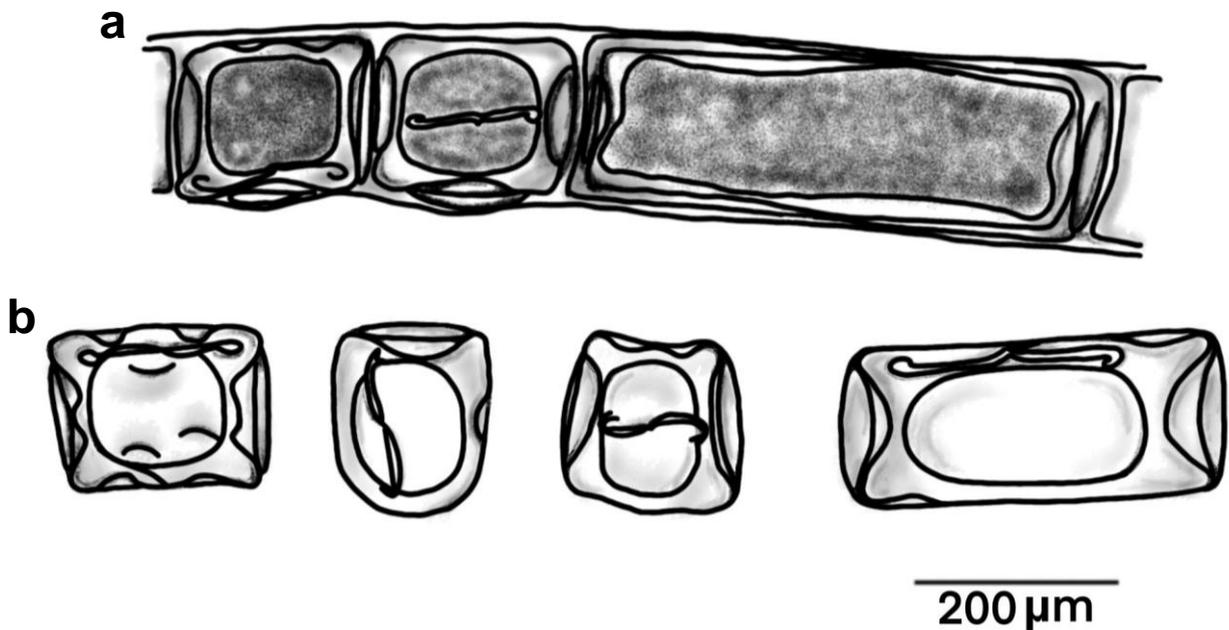


Fig. 20. a) Célula vegetativa con azigosporas y línea de dehiscencia; b) Azigosporas en gametangios cortos.

Temnogametum malabaricum Panikkar et Ampili 1991

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 24-28 μm de ancho y 70-280 μm de largo, con plastos que contienen de 25-45 pirenoides distribuidos en dos hileras. Citosol color púrpura. Conjugación escaleriforme. Gametos 24-30 x 30-70 μm , zigosporas de 24-30 μm de ancho y 40-90 μm de largo; irregularmente cuadradas, con esquinas redondas. Exosporio grueso, mesosporio grueso dorado-marrón, endosporio delgado. Con línea de dehiscencia en forma sigmoide. Azigosporas de 28-35 μm de ancho y 40-90 μm de largo, oblonga cilíndrica (Fig. 21).

Distribución: India

Hábitat: En corrientes Calicut, Kerala State.

Altitud: 5 m s.n.m.

Referencias: Panikkar, 1991: 119, Figs. 1-10.

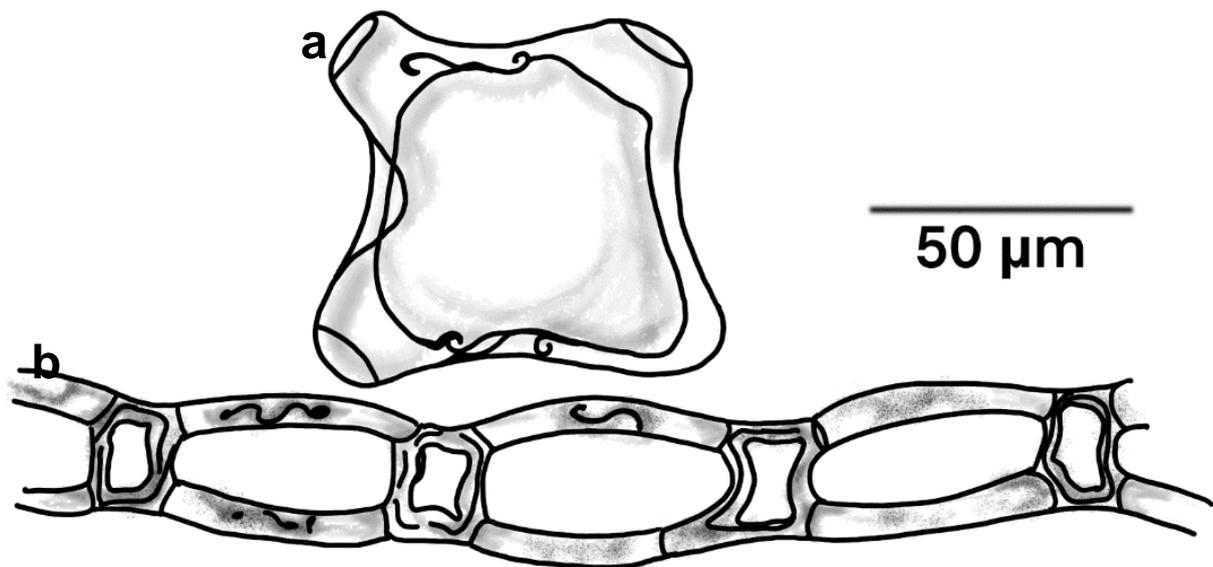


Fig. 21. a) Zigospora con línea de dehiscencia; **b)** Célula vegetativa con inicio de conjugación.

Temnogametum mayyanadense Erady et Rajappan 1959

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 30-38 μm de ancho, 20-600 μm de largo; con plastos que contienen de, 30-86 pirenoides dispersos. Citosol color púrpura. Conjugación escaleriforme. Zigospora irregularmente cuadrangular, de 30-40 x 35-86 μm , mesosporio grueso, liso y naranja-dorado. Con línea de dehiscencia en forma sigmoide. Azigosporas 28-38 ancho x 30-98 largo, cuadradas, cilíndricas u oblongo cilíndricas (Fig. 22).

Distribución: India

Hábitat: Aguas someras en campos de cultivo de arroz en Mayyanad y Quilon.

Altitud: 20 m s.n.m.

Referencias: Randhawa, 1959: 184-185; Kadlubowska, 1984: 135, Fig. 182; Panikkar, 1991: 120, Figs. 1-9.

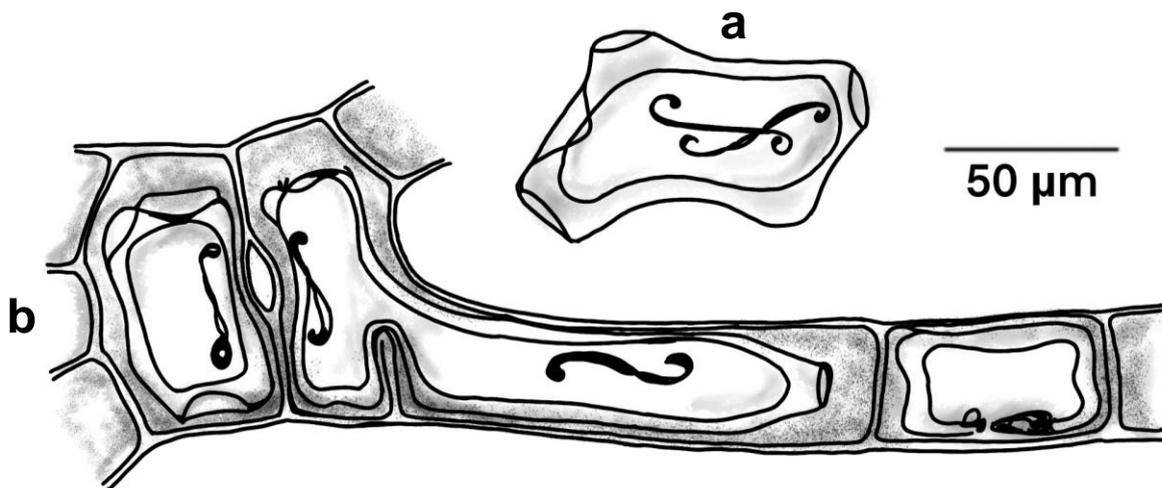


Fig. 22. a) Zigospora con línea de dehiscencia; b) Filamento con zigosporas en serie.

Temnogametum prescottii Patel 1971

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 13-15 μm de ancho, 120-225 μm de largo, plastos que contienen de 6-14 pirenoides. Citosol ligeramente púrpura, Zigospora desconocida. Azigosporas (Aplanosporas) elipsoidales, con polos puntiagudos de 24,5-34 μm de ancho x 41-56 μm de largo. Exosporio delgado, hialino, mesosporio grueso, liso, de color pardo-dorado. Con línea de dehiscencia sigmoide. Crece asociada con: *Zygogonium*, *Zygnema*, *Spirogyra* y *Oedogonium*, color ligeramente púrpura (Fig. 23).

Distribución: India. 22 ° 28' N, 78 ° 26' E., 1067 m s.n.m.

Hábitat: Corriente pequeña camino a Jatashaker, octubre 1967.

Referencias: Patel, 1971:135, Fig. 1-6; Kadlubowska, 1984: 137, Fig. 184.

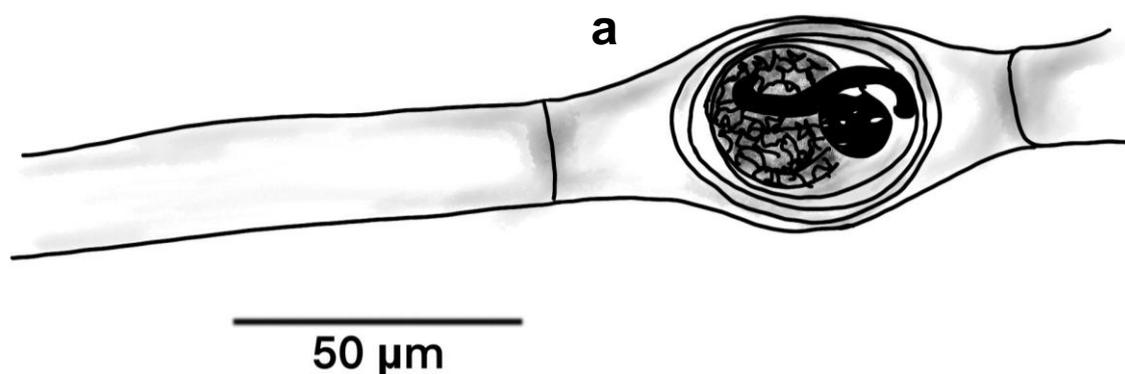


Fig. 23. a) Célula vegetativa con aplanospora y línea de dehiscencia.

Temnogametum rayssiae Bourelly 1961

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 35-40 μm de ancho, 150-200 μm de largo; plastos que contienen de 6-8 pirenoides en doshileras. Conjugación escaleriforme. Zigosporas elipsoidales o reniformes de 47-80 μm de ancho x 30-50 μm de línea. Exosporio finamente punteado. Línea de dehiscencia en forma sigmoide (Fig. 24).

Distribución: África

Hábitat: Pantanos en Guinea.

Referencias: Gauthier-Lievre, 1965: 46, Lam. XI, Figs h-h; Kadlubowska, 1984: 135, Fig. 181.

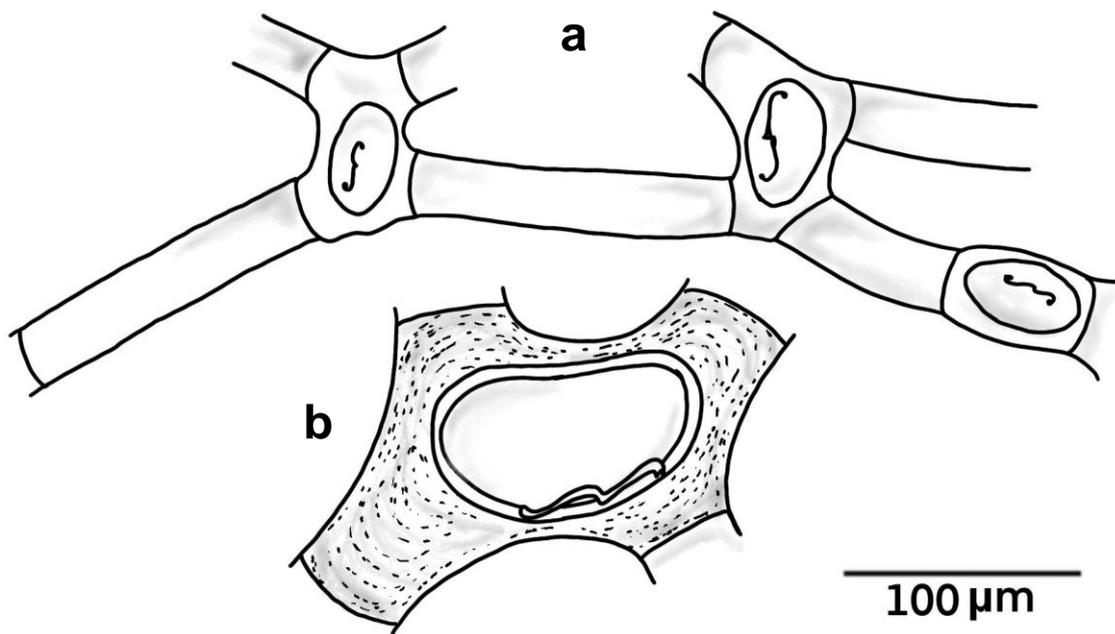


Fig. 24. a) Filamentos en reproducción sexual escaleriforme con zigosporas; b) Zigospora con línea de dehiscencia.

Temnogametum sinense Jao et Hu 1978

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 17-18 μm de ancho, 100-236 μm de largo; plastos que tienen de 5-14 pirenoides en hilera. Conjugación escaleriforme. Zigosporas triangulares a cuadrangulares de 39-46 x 29-32 μm . Exosporio liso, incoloro, mesosporio grueso, finamente punteado, de color marrón rojizo. Con línea de dehiscencia sigmoide (Fig. 25).

Distribución: China.

Hábitat: British Isles, China.

Referencias: Jao & Hu, 1978: 194-204; Kadlubowska, 1984: 133, Figs. 179; Jhon et al., 2011.

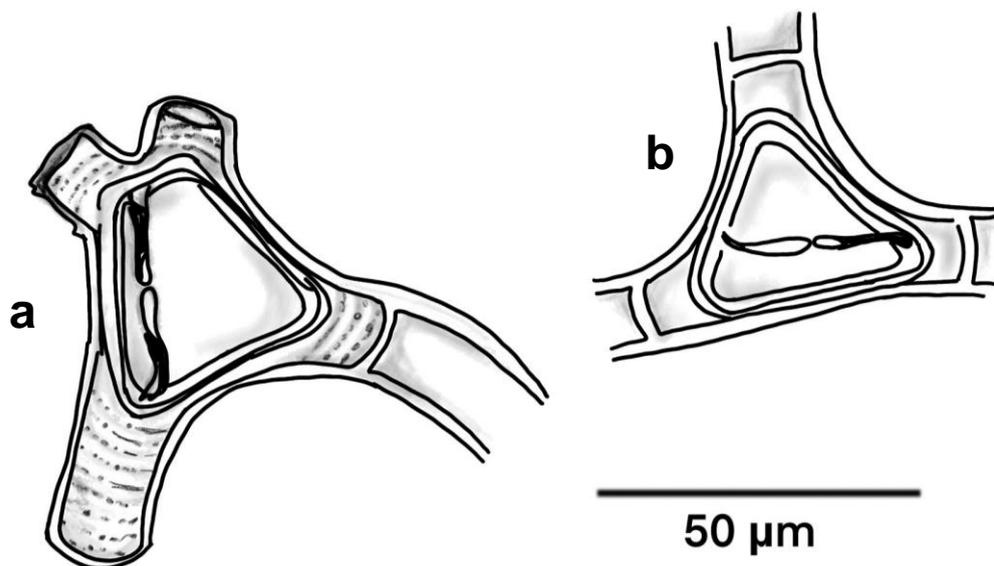


Fig. 25. a) Zigospora con línea de dehiscencia; b) Zigospora en vista lateral.

Temnogametum subtropicum Islam 1972

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 14-22,5 μm de ancho, 103-240 μm de largo; con plastos que contienen de 7-15 pirenoides en hilera. Conjugación escaleriforme y lateral. Zigospora cuadrangular, de 45-53 x 36-53 μm , zigospora lateral elipsoidal de 25-31 x 56-63 μm , Mesosporio grueso, liso, de color amarillento-marrón. Con una o dos líneas de dehiscencia en forma sigmoide (Fig. 26).

Distribución: Dakka (Pakistán) Asia.

Altitud: 4 m s.n.m.

Referencias: Kadlubowska, 1984: 129, Fig. 174; Islam, 1972: 655-663.

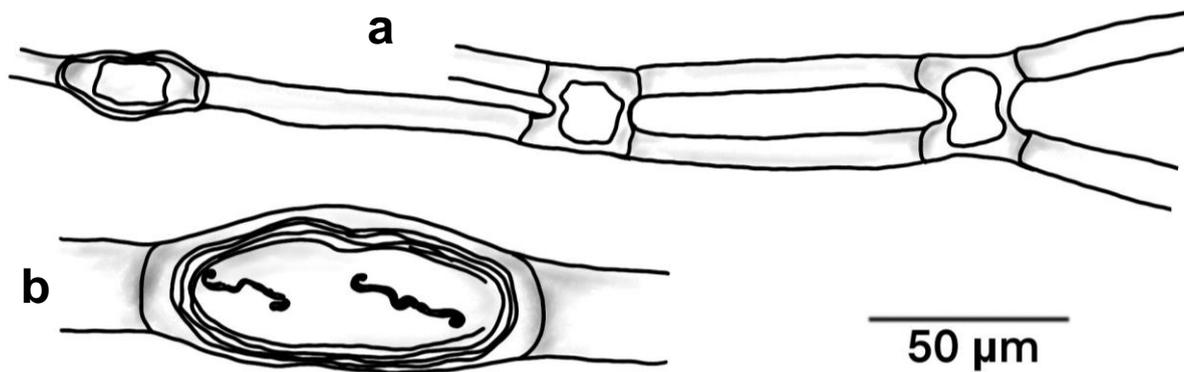


Fig. 26. a) Célula vegetativa con conjugación escaleriforme; **b)** Zigospora con línea de dehiscencia.

Temnogametum thaxteri Transeau 1932

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 39-45 μm de ancho, 220-360 (510) μm de largo. Plastos que contienen de 30-120 pirenoides dispersos. Citosol de color rosa o púrpura. Conjugación escaleriforme. Zigosporas cuadrangulares con las esquinas redondeadas. Gametangios de 36-90 μm largo, cuadrangular, ovoide de 60-75 x 90-120 μm ; ocasionalmente se forman en pares. Pared lisa e incolora. Aplanospora ovoides 60x75 μm con envoltura lisa e incoloro (Fig. 27).

Distribución: Trinidad y Tobago, Nueva Zelanda, Australia.

Hábitat: Charcas de arena en Aripo Savanna, Cumuto Station, Isla de Trinidad.

Referencias: Transeau, 1932: 489, Plate I, Figs. 14-20; Transeau, 1951: 118, Lám. XX, Fig. 7-9; Kadlubowska, 1984: 135. Fig. 183, Phillips, 2002: 228-244.

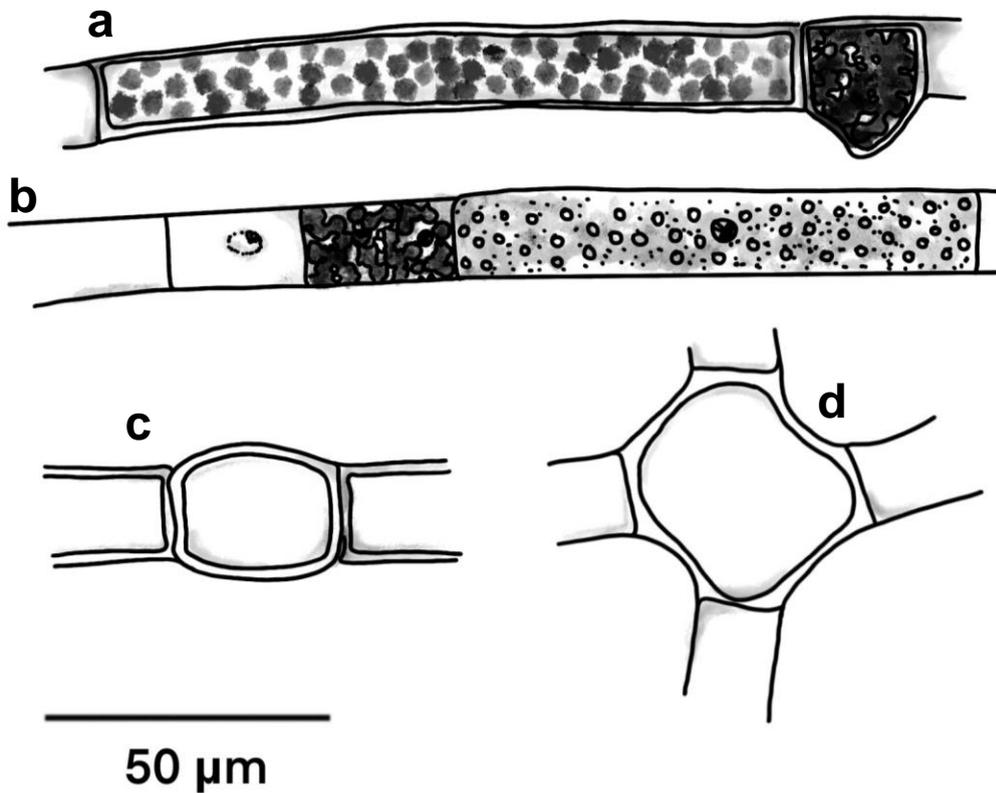


Fig. 27. **a)** Célula vegetativa con numerosos pirenoides dispersos; **b)** Célula vegetativa con pirenoides dispersos e inicio de formación de aplanospora; **c)** Aplanospora; **d)** Zigospora cuadrangular.

Temnogametum tirupatiense Iyengar 1958

Descripción: Filamento con células vegetativas de 10-15 μm de ancho; con plastos que contienen de 6-20 pirenoides en una hilera. Citosol color púrpura. Filamentos torcidos antes de la conjugación. Conjugación escaleriforme y lateral. Gametangio de 11-13 μm x 12-15 μm . Zigospora cuadrangular de 40-45 μm de ancho. Mesosporio grueso, color marrón amarillento, naranja, dorada- parda, Con línea de dehiscencia en forma sigmoide. En conjugación lateral zigospora elipsoidal (Fig. 28).

Espacio entre el esporangio y zigospora lleno de sustancias pécticas. Aplanosporas casi esféricas, observadas en septiembre y octubre.

Distribución: Corrientes Tirupati y Trivandrum, India y Ontario, Canadá.

Hábitat: Campos de cultivo de arroz, cerca de Quilón, y Suroeste de India, lagos ácidos de Ontario.

Referencias: Randhawa, 1959: 184, Fig. 114; Kadlubowska, 1984: 127, Fig. 171; Panikkar & Ampili, 1991: 119; Wei *et al.*, 1989: 3238, Figs. 20-22; Wei & Ying, 2000: 98, Figs. 16-25.

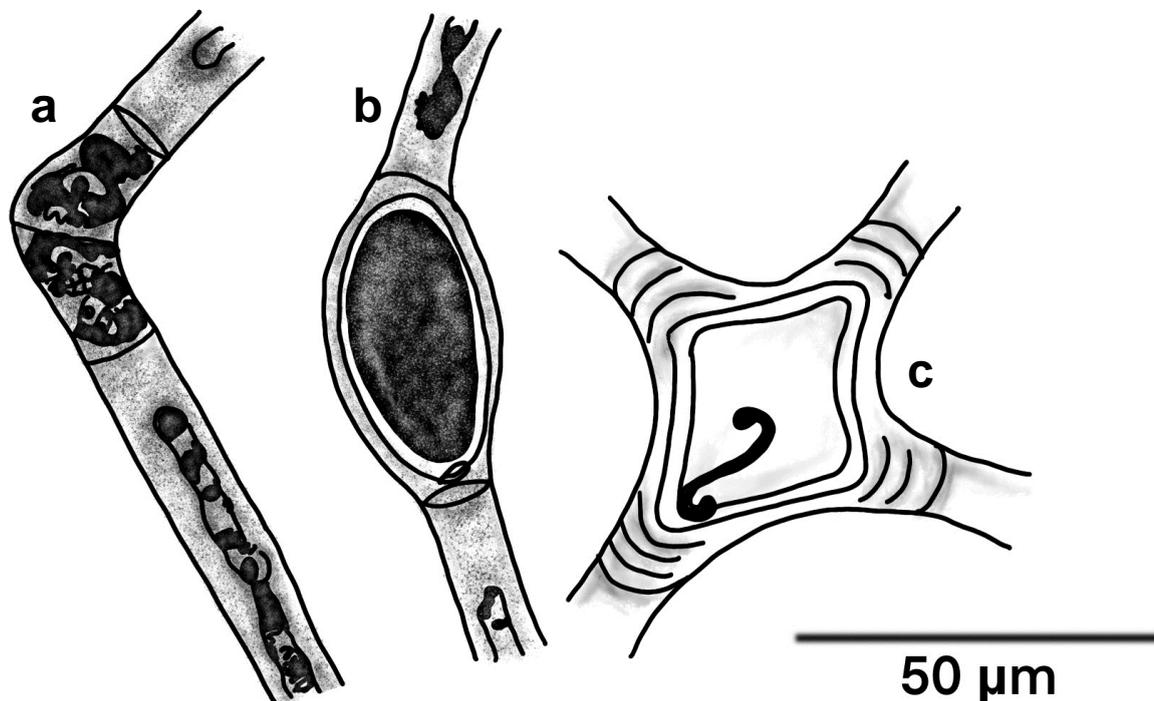


Fig. 28. a) Célula vegetativa con inicio de conjugación lateral; b) Célula vegetativa con aplanospora; c) Zigospora con línea de dehiscencia.

Temnogametum transeui Prescott 1947

Descripción: Filamentos con células vegetativas de 14-20 μm de ancho, 100-400 μm de largo; con plastos que contienen de 2-4 pirenoides en hilera. Conjugación escaleriforme y lateral. Zigosporas en conjugación escaleriforme, cuadrangulares, de 40-45x 45-60 μm , mesosporio liso, naranja-rosa o pardo. Zigosporas laterales elipsoidales de 35-42 x 80-100 μm (Fig. 29).

Distribución: Ecuador

Hábitat: Volcán Cotopaxi. En un pantano de turbera a 5897 m s.n.m.

Referencias: Prescott, 1947: 132, Lám. 1. Figs. 2-8; Randhawa, 1959: 179-180, Fig.110; Kadlubowska, 1984: 129, Fig. 173.

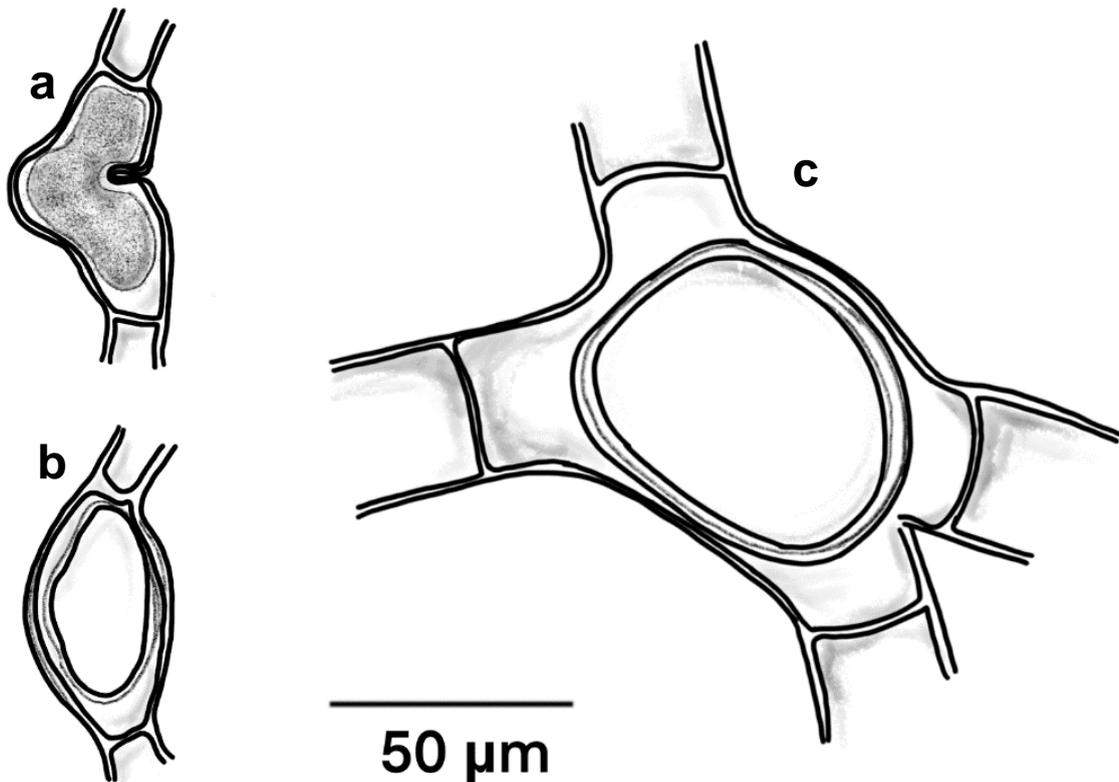


Fig. 29. a) Inicio de reproducción lateral; b) Zigospora en vista lateral; c) vista frontal de la Zigospora en conjugación escaleriforme.

Temnogametum uleanum (Möbius) Wille 1909

Basónimo: Mougeotia uleana Möbius 1895

Descripción: Filamento con células vegetativas de 10-12 μm de ancho, 60-120 μm de largo; con plastos que contienen 4 pirenoides en hilera. Citosol rojo o morado. Conjugación escaleriforme y lateral. Zigosporas escaleriformes cuadradas con ángulos de 25-40 x 30-50 μm , con grosor lateral de 20-40 x 40-60 μm aproximadamente, lisas e incoloras. Zigospora lateral oblicuas-ovoides de 20-40 x 40-60 μm (Fig. 30).

Distribución: Brasil.

Hábitat: Aguas negras, altitud 2500 m s.n.m., cerca de Itajahy, Sureste de Brasil. (08°42'27" sur y longitud oeste 35°31'50", a una altitud de 93 m s.n.m, tropical.

Colectada en marzo, 1894, por E. Ule.

Referencias: Transeau, 1932: 489, Lám. I, Figs. 1-8; Randhawa, 1959: 178-179, Fig. 172; Wille, 1909: 13, Fig 3.

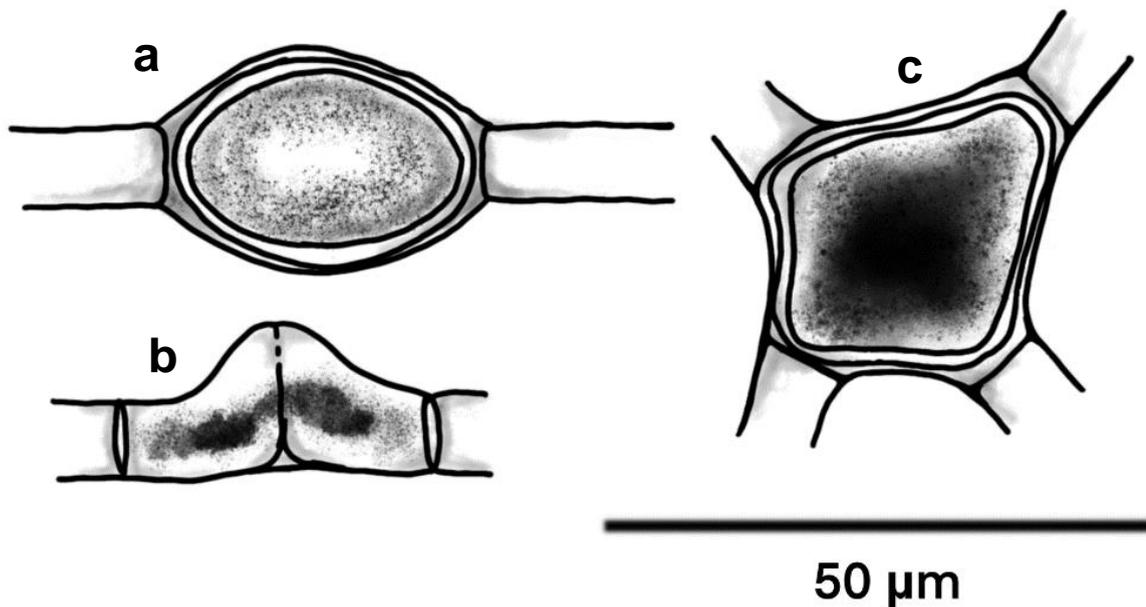


Fig. 30. a) Zigospora en vista lateral; b) Inicio de reproducción lateral; c) Zigospora.

CLAVE DICOTÓMICA. Para generar la clave se utilizaron 16 caracteres morfológicos vegetativos y reproductivos, además se agregaron las condiciones ecológicas señaladas para cada taxon en las referencias consultadas (*).

1a.	Citosol de color púrpura, con azigosporas o zigosporas	2
1b.	Citosol de color verde	10
2a	Con zigosporas, pirenoides arreglados en una hilera dentro del plasto	3
2b	Con azigosporas, pirenoides organizados al azar	8
3a	Cloroplasto axial con 4 pirenoides, descrita para Brasil	<i>T. uleanum</i>
3b	Cloroplasto con 5 a 20 pirenoides	4
4a	Zigospora cuadrangulares	5
4b	Zigospora oblato-esferoidal, ovoide o triangular en vista lateral, mesosporio finamente punteado y pardo, exosporio liso. Crece en lagos de alta montaña tropicales	<i>T. iztacalense</i>
5a	Exosporio lamelado, zigosporas cuadrangulares con regiones concavas; Cél. vegetativas con plasto con 6-12 pirenoides en una hilera, de perfil ovoide	<i>T. africanum</i>
5b	Exosporio liso	6
6a	Reproducción sexual escaleriforme mesosporio marrón-amarillento, naranja, dorada-parda	<i>T. tirupatiense</i>
6b	Reproducción sexual escaleriforme y lateral, mesosporio grueso	7
7a	Exosporio delgado hialino con mesosporio grueso y pardo	<i>T. fujianense</i>
7b	Exosporio grueso, con mesosporio grueso, liso, color naranja-dorado. Riss line presente en zigospora. Plasto con 9-32 pirenoides en una hilera. Hábitat en pequeños canales de selvas, Sur de Madras, India	<i>T. indicum</i>
8a	Azigosporas en serie (1-3), cuadradas o cilíndricas con regiones cóncavas; 38-44µm de ancho, con células vegetativas con 52- 198 pirenoides dispersos, Descrita para el Sur de India	<i>T. keralense</i>
8b	Azigosporas no en serie, de forma cuadradas	9
9a	Mesosporio de color dorado brillante, células vegetativas de 30-38 µm ancho, de 30 a 84 pirenoides dispersos. Crece en aguas someras en campos de cultivo de arroz, junto con <i>Desmidium</i> y <i>Spirogyra</i> . India.	<i>T. mayyanadense</i>
9b	Mesosporio incoloro, células vegetativas de 39-45 µm de ancho, de 30 a 120 pirenoides dispersos	<i>T. thaxteri</i>
10a	Cloroplastos con una hilera de pirenoides	12
10b	Cloroplastos con 2 o más hileras de pirenoides	11
11a	Zigosporas cuadradas, con mesosporio grueso y liso; con azigosporas elipsoidales	<i>T. malabaricum</i>
11b	Zigosporas elipsoidales o reniformes, exosporio punteado; sin azigosporas	<i>T. rayssiae</i>
12a	Cloroplastos con 1-6 de pirenoides	<i>T. heterosporum</i>
12b	Cloroplastos con 7 o más pirenoides	13

13a	Con partenogénesis, producen azigospora	14
13b	Reproducción escaleriforme o lateral, producen zigosporas	15
14a	Azigosporas cilíndricas o cuadradas	<i>T. cylindrosporum</i>
14b	Azigosporas elipsoide con polos puntiagudos	<i>T. prescottii</i>
15a	Con una línea de dehiscencia sigmoide	16
15b	Con dos líneas de dehiscencia sigmoides	<i>T. subtropicum</i>
16a	Solo reproducción lateral, mesosporio de color rosa-pardo	<i>T. congolense</i>
16b	Ambas reproducciones escaleriforme y lateral	17
17a	Cloroplastos con 2-4 pirenoides	<i>T. transeai</i>
17b	Cloroplastos con más de 5 pirenoides	18
18a	Mesosporio incoloro	19
18b	Mesosporio amarillo, crece en zonas boreales de Japón	<i>T. boreale</i>
19a	Exosporio lamelado, mesosporio escrobiculado, pardo y brillante	<i>T. gracilescens</i>
19b	Exosporio delgado y liso, mesosporio finamente punteado, color marrón rojizo	<i>T. sinense</i>

DISCUSIÓN

El fitobentos determinado en el lago La Luna corresponde a poblaciones de baja diversidad biológica con H' 0.85 a 1.39 bits/ind., donde la abundancia de las cianobacterias fue (37%), seguidas de algas verdes con 28% (Charophyta 14% y Chlorophyta 14%), las cuales se desarrollan entre los tapetes de *Temnogametum iztacalense*. Elementos taxonómicos esperados bajo las condiciones extremas como son las fluctuaciones de temperatura diurna, baja temperatura en el agua y alta radiación RUV y pH ácido del área de estudio; factores ambientales que ya han sido observados en suelos de los Alpes franceses, entre una cota de 1300 a 3000 m s.n.m. (Stewart *et al.*, 2021). La dominancia de cianobacterias en el área de estudio se explica porque ellas son organismos procariotas fotosintéticos que se desarrollan con éxito donde la temperatura bajo cero incluso heladas les permiten vivir, observaciones que también se han registrado en los Alpes europeos, así como en humedales del Antártico (Karsten & Holzinger, 2014) donde las algas verdes y cianobacterias son dominantes. A su vez, contrario a lo señalado en ríos andinos colombianos localizados entre 2600 y 2990 m s.n.m. donde las poblaciones algales fueron dominadas por diatomeas con 53%, por ser organismos que se adaptan en ambientes hidrológicamente fluctuantes y por su rápida colonización y adherencia a diferentes sustratos, seguidas de cianobacterias con 29% (Rivera-Rondón & Díaz-Quirós, 2004).

Klebsormidium es un alga verde filamentosa que tolera altas cantidades de RUV en ambientes extremos, arriba de los 3000 m s.n.m., donde constituyen elementos importantes en las costras biológicas de suelos en los Alpes europeos. Estos organismos se han adaptado a través del grosor de la costra, que les permite un autosombreado, generando un efecto paraguas, que sumado a metabolitos parecidos a micosporinas (MAAs) son recursos que les permiten la mitigación de los efectos de la radiación UV (Karsten & Holzinger, 2014). Por lo cual, dentro de los componentes del fitobentos del área de estudio, explica la presencia de *Klebsormidium* sp. y otras Charophyta entre el tapete algal de *Temnogametum iztacalense* analizado, donde entre las múltiples capas del 1 mm de grueso, contribuyen al autosombreado como un efecto fotoprotector pasivo, que sumado a sustancias protectoras como las micosporinas (MAAs), compuestos fenólicos y taninos hidrolizables deben ser parte de los metabolitos que permiten su éxito en un ambiente extremófilo con pH ácido, baja temperatura y alta radiación UV.

Sumado a que, como lo indican Rivera-Rondón & Díaz-Quirós, 2004, cuando las condiciones son más favorables para algún grupo, hay un desplazamiento rápido entre todos los grupos con la tendencia a que se desarrollen comunidades dominadas (*T. iztacalense*) y codominadas en este caso por cianofíceas.

Por otra parte, los euglenoideos son protistas fotosintéticos registrados por primera vez en el lago La Luna; poblaciones que tienen especies representativas y afines a ambientes acidófilos como el caso de *Euglena mutabilis*, *E. gracilis* y *E. viridis* quienes han sido citadas en corrientes acidófilas creciendo a pH entre 3.0 y 5.0 (Hargreaves & Whitton, 1976). Factores limnológicos que coinciden con las condiciones de los tapetes de *T. iztacalense* y su ficoflora registrada.

Para las Bacillariophyta (diatomeas) se confirma que las poblaciones más abundantes fueron: *A. helvetica*, *Encyonema perpusillum* y *Navicula* sp. tal y como fue mencionado por Caballero-Mirada (1996) para los sedimentos estudiados del mismo lago. Pero no tenemos registros de *Frustulia romboides*, *Pinnularia* cf. *viridis* y *Surirella* cf. *linearis*, taxones citados para el plancton del lago La Luna por Cuna *et al.* (2022).

Cobertura algal y biomasa. Cobertura algal y biomasa. Los resultados de la cobertura y la biomasa de *T. iztacalense* quedaron registrados en cuatro estaciones de muestreo, donde E5 mostró mayor cobertura y mayor peso seco con 90% y 3 g, respectivamente, esto asociado al mayor índice H' 1.39 bits/ind. y Pielou 0.29; mientras, la E3 fue la estación con menor cobertura 40%, asociado a H' 0.85 bits/ind. y Pielou de 0.17; lo que sigue el efecto de autosombreado y grosor del tapete ayuda a contar con mayor diversidad de las comunidades que conforman el fitobentos acompañante de *T. iztacalense*.

Así como, la E10, fue la de menor peso seco, pero con cobertura del 70%, resultados que varían por la presencia del sustrato y crecimiento de “pasto” en el área de cada cuadrante. Dinámica diferente a la investigada por Abati *et al.* (2016) en el análisis comparativo en 18 ríos de los Alpes donde la cobertura de macrófitas asociada a briofitas y fitobentos de ríos- agua arriba y abajo-, osciló entre 3 y 62%, donde la mayor riqueza específica y cobertura de macrófitas se presentó donde había mayor regulación de flujo, es decir en río “aguas debajo” de la cuenca, comparado con la baja cobertura y poca diversidad en zonas río arriba, entre briofitas y microalgas reconocidas.

Las medidas morfométricas de la población silvestre de *T. iztacalense* durante abril del 2022, señalan que la relación ancho y largo amplía ligeramente el intervalo de ellas, así como el registro de estadios de reproducción sexual y asexual. Es decir, el largo fue registrado de 31 a 280 μm vs 71 a 387 μm . El número de pirenoides observados fue de 4 a 21 vs 3 a 16. La reproducción sexual, se registra por primera vez en abril, ya que esta misma población previamente estudiada por Garduño-Solórzano *et al.* (2020) informaron de estos datos para septiembre (2014, 2018), octubre (2015, 2016) y enero (2019).

Condiciones limnológicas. Los análisis físicos, químicos y nutrimentos del área de estudio registrados para abril 2022, indicaron que el lago es ligeramente más ácido de 4.1 a 5.8, en contraste, con lo señalado por Alcocer *et al.* (2004) y Cuna *et al.* (2014) con valores de pH de 6.0.

Con respecto a la temperatura del agua, durante abril 2022 se registraron valores de entre 8 a 10 °C, ambiente que corresponde a un hábitat frío cuya temperatura diurna oscila entre valores de cero a 12 °C, misma que ha sido registrada por Filonov *et al.* (2022).

La mineralización fue 3 a 6 CaCO_3 mg/L, lo cual corresponde a valores bajos tal y como indicó Alcocer, (2009) para este lago, con valores de 2.3 mg/L de bicarbonatos y cero de carbonatos.

Los datos de conductividad registrados de 10 a 20 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, muestran diferencia a 14 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ registrados por Alcocer *et al.* (2004) y Cuna *et al.* (2022). Sin embargo, aún indican que son aguas con bajo contenido de sales y minerales. Por su parte, la cantidad de OD fue de 2.6 mg/L, este valor es menor 6 mg/L registrado por Alcocer (2009), esto se puede explicar, debido a la altitud del área y las condiciones meteorológicas del día de muestreo, ya que durante el día se presentó mucho viento gélido, lluvia y granizo (observaciones del autor), sumadas a las observaciones de Filonov *et al.* (2022) quienes revelan las fluctuaciones diurnas en la temperatura del agua debido al viento en el área de estudio.

Los nitratos fueron desde 0 a 1 mg. L⁻¹, intervalo igualmente bajo (0.28 mg. L⁻¹) al señalado por Cuna *et al.* (2022). Por su parte, los fosfatos, se obtuvieron ligeramente más altos, con valores de 1 mg. L⁻¹ *versus* .04 μmol. L⁻¹ citados por Cuna *et al.* (2022). Con respecto a la cantidad de clorofila *a* los datos de 0.092 μg L⁻¹, confirman que se trata de un lago ultraoligotrófico, semejantes condiciones limnológicas indicadas por Filonov *et al.* (2022) con valores que oscilan de 0.13 - 0.89 μg L⁻¹.

En este estudio se registró por primera vez el pH del sustrato adyacente al tapete algal de *T. iztacalense*, el cual fue de 4.1 a 5.8, comparado con la información de Wei *et al.* (1989) donde indicó que *T. tirupatiense* crece en pH de 5.0, 5.6 y 6.6 en los lagos Heney, Ruth Roy, Plastic y Chub de la región de los Grandes lagos de Ontario, Canadá.

En la Fig. 27, se observa el patrón de distribución de la composición del fitobentos, con base en el AC con un coeficiente de correlación cofenética del 67% y una distancia euclidiana de 1.9, donde se formaron dos grupos, a partir de las cuatro estaciones estudiadas. El grupo I, constituido por las estaciones E10 y E3, mostró un índice de Jaccard con mayor similaridad (76%), mayor riqueza específica (22-30), que corresponde al registro de cobertura algal, entre el 70-40%, así como la biomasa entre 0.5-0.9 g (Tabla 2), y la menor relación ancho-largo (Tabla 2), sumado a menores concentraciones de: fosfatos y clorofila *a* (1-1.3 mg L⁻¹, 0.074-0.052 μg L⁻¹) (Tabla 4), respectivamente.

En contraste, el grupo II, constituido por las estaciones E7 y E5, se clasificó por una menor riqueza específica (21-20) y el valor más alto del índice de Jaccard con similaridad del 80%, que corresponde al registro de cobertura algal, entre el 50-90%, así como la biomasa entre 2.1-3.1 g (Tabla 1), y mayor longitud celular de la población del tapete algal de *T. iztacalense* (Tabla 2), sumado a mayores concentraciones de: fosfatos, nitratos y clorofila *a* (1.5 mg L⁻¹; 2.4 mg L⁻¹, 0.15 μg L⁻¹) (Tabla 4), respectivamente.

CONCLUSIONES

Este trabajo representa el primer aporte del fitobentos que ha sido investigado a través del material de campo y cultivo en medio BG11; donde se ratifica que, en ambientes extremos, con gran altitud, transparencia, pH ácido, baja mineralización, ultraoligotrófico y altas cantidades de luz RUV, como es el lago La Luna, los taxones más favorecidos corresponden a las cianobacterias y algas verdes Zygnematales. Donde *T. iztacalense*, representa una especie dominante que produce grandes extensiones de un tapete de color púrpura, para protegerse del daño de la RUV y minimizar los daños provocados por esta condición permanente del hábitat. Además de la presencia de 22 especies constantes y 14 especies raras.

Debido a las condiciones limnológicas extremas, algunas de las especies podrían considerarse como indicadores biológicos; por ejemplo, *T. iztacalense*, *Klebsormidium sp*, *Synechococcus sp*, *Pseudanabaena minima*, entre otras.

Se documentó la información ficológica de un taxón raro, como es el género *Temnogametum*, donde se incluyen los esquemas correspondientes de cada especie y se aporta una clave dicotómica para futuras determinaciones de este tipo de organismos que deben estar pendientes por evidenciar.

La composición y abundancia del fitobentos entre las cuatro estaciones es semejante. En particular la E3, presentó la mayor riqueza específica con poca cobertura (40%); en contraste con la E5 con menor riqueza específica con mayor cobertura (90%).

A partir de este trabajo, algunos de componentes de la ficoflora son taxones que deben seguirse estudiando, sumado a marcadores moleculares que permitan la limitación específica de los organismos crípticos que seguramente se desarrollan en ese ambiente extremo del país. O bien observar las estructuras necesarias, como son la formación de reproductores que permitan la delimitación taxonómica de cada caso, por ejemplo, en *Dolichospermum*, *Zygnema*, *Klebsormidium sp*. Para las Bacillariophyta se requiere el trabajo de Microscopía Electrónica de Barrido para confirmar las especies correspondientes.

LITERATURA CITADA

- Abati, S., Minciardi, M.R., Ciadamidaro, S., Fattorini, S. & Ceschin, S. (2016). Response of macrophyte communities to flow regulation in mountain streams. *Environmental Monitoring Assessment* 188: 414-426.
- Aigner, S., Remias, D., Karsten, U., & Holzinger, A. (2013). Unusual phenolic compounds contribute to ecophysiological performance in the purple-colored green alga *Zygonium ericetorum* (Zygnematophyceae, Streptophyta) from a high-alpine habitat. *Journal of Phycology*. 49 (4): 648–660.
- Alcocer, J., Oseguera, L.A., Escobar, E., Peralta, L., & Lugo, A. (2004). Phytoplankton biomass and water chemistry in two high mountain tropical lakes in Central Mexico. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 36: 342–346.
- Alcocer, J. (2009). Limnología. En: P. Luna, A. Montero & R. Junco (Eds.). *Las Aguas Celestiales, Nevado de Toluca* (pp. 10-12). INAH.
- APHA, AWWA, WEF. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th ed. Washington, D.C., USA.
- Arar, E. J. & Collins G.B. (1997). Method 445. 0. *In vitro* Determination of chlorophyll a and pheophytin a in marine and freshwater algae by fluorescence. National Exposure Research Laboratory Office of Research and Development. 9-11.
- Armienta, M. A., de la Cruz-Reina, S., & Macias, J. L. (2000). Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichón and Nevado de Toluca volcanoes. *Journal Volcanol. Geotherm Research*. 97: 105–125.
- Arriaga, L., Aguilar, V., Alcocer, J., Jiménez, R., Muñoz E., & Vázquez E. (1998). *Regiones hidrológicas prioritarias: fichas técnicas y mapa (escala 1:4,000,000)*. CONABIO. 142.
- Arredondo, B. O. & Voltolina, D. (2017). Determinación de peso seco y contenido orgánico e inorgánico. *Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal*. México: Conacyt.
- Banderas-Tarabay, A. G. (1997). Phycoflora of the tropical high mountain lake El Sol, Central Mexico, and some biogeographical relationships. *Hydrobiologia*. 354: 17–40.
- Barba-López, M.R., Filonov, A., Alcocer, J., Ladah, L. Tereshchenko, I., (2021). Complex interactions between meteorological parameters and the thermal regime of two tropical, high altitude crater lakes (Nevado de Toluca, Mexico). *Science of the total Environment*. 771 (1): 145310.
- Caballero-Miranda, M. (1996). The diatom flora of two acid lakes in central Mexico. *Diatom Research*. 11: 227-240.
- Casallas, J. & Gunkel, G. (2001). Algunos aspectos limnológicos de un Lago altoandino, el Lago San Pablo, Ecuador. *Limnetica*. 20: 29-46.
- Catalan, J., Camarero, L., Felip, M., Pla, S., Ventura, M., Buchaca, T., Bartumeus, F., Mendoza, G. D., & Miró, A., Casamayor, E. O. (2006). High mountain lakes: Extreme habitats and witnesses of environmental changes. *Limnetica*. 25: 551–584.
- *Chen, Z. & Zhou, Z. (1980). Studies on the Zygnemataceae I. *Oceanologia et Limnologia Sínica*. 11 (3): 285-286+291-292.
- Cuna, E., Zawisza, E., Caballero, M., Ruiz-Fernández, A. C., Lozano-García, M. S. & Alcocer, J. (2013). Environmental impact of the Little Ice Age cooling in Central Mexico: The record from a tropical alpine lake. *Journal of Paleolimnology*. 51: 1-14.
- Cuna, E., Alcocer, J., Gaytán, M., & Caballero, M. (2022). Phytoplankton Biodiversity in Two Tropical, High Mountain Lakes in Central Mexico. *Diversity*. 14 (1): 42.
- Filonov, A., Barba-López M., Ladah, L., Tereshchenko, I., Palacios-Hernández, E., Alcocer, J. & Ávalos-Cueva, D. (2022). The dynamics and temperature regime of the crater lakes in the Nevado de Toluca volcano, México, *Limnologica*. 92: 125938.

- García-Jurado, F., Guerrero, F., Galotti, A., Parra, G., Cruz L., Vicente, I., Rueda, F., Amores, V., Lucena, J., Rodríguez, V., León, P., Ostos, E., Bautista, B., Blanco, J., Zabala, L., Gilbert, J. & Jiménez, F. (2007). El Plancton de las lagunas de Sierra Nevada: necesidad de estudios transdisciplinarios. *Revista electrónica de medioambiente*. 4: 1-10.
- *Garduño-Solórzano, G., Martínez-García, M., Scotta Hentschke, G., Lopes, G., Castelo Branco, R., Oliveira Vasconcelos, V. M., Campos, J. E., López-Cano, R. & Quintanar-Zúñiga, R. E., (2020). The phylogenetic placement of *Temnogametum* (Zygnemataceae) and the description of *Temnogametum iztacalense* sp. nov., from a tropical high mountain lake in Mexico. *European Journal Phycology*. 56 (2): 159-173.
- *Gauthier-Lièvre, L. (1965). Zygnémacées africaines. *Nova Hedwigia*. Beih. 20: 1-210.
- Guiry, M.D. & Guiry, G. M. (2021). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <https://www.algaebase.org>; searched on 11 September 2023.
- Hargreaves, J. W. & Whitton, B. A. (1976). Effect of pH on growth of acid stream algae, *British Phycological Journal*. 11 (3): 215-223.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 4-9.
- Ibarra-Morales, D., Alcocer, J., Oseguera, L. & Merino-Ibarra, M. (2015). Dinámica limnológica estacional e interanual de dos lagos tropicales de alta montaña en el centro de México. *Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas Universitarias en Latinoamérica*. 135.
- *Islam, A. K. M. N. (1972). New and rare species of some green algae from Bangladesh. *Nova Hedwigia*. 23: 655-663.
- *Jao, C.C. & Hu, H., (1978). Studies on the Zygnemataceae I. *Oceanologia et Limnologia Sílica*. 9 (2): 194-204.
- *Jhon, D. M., Whitton, B. A. & Brook, A. J. (2011). *The freshwater algal flora of the British Isles. An identification guide to freshwater and terrestrial algae*. 2da. Ed., Cambridge.
- *Kadlubowska, J. Z. (1984). Conjugatophyceae I Zygnemales = Chlorophyta VIII. En: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. & Mollenhauer, D. (Eds). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. 16: 532.
- Karsten, U. & Holzinger, A. (2014). Green algae in alpine biological soil crust communities: acclimation strategies against ultraviolet radiation and dehydration. *Biodiversity and Conservation*. 23: 1845-1858.
- Krebs, C. J. (1999). *Metodología Ecológica*. 2da. Ed., Benjamin Cummings, Menlo Park. 620.
- Legendre, P. & Legendre, L., (2012). *Numerical Ecology*. Ed. Elsevier.
- Lewis, W. M., Jr. (1987). Tropical limnology. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 18: 159-184.
- Löffler, H. (1964). The limnology of tropical high-mountain lakes. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*. 15: 176-193.
- Löffler, H., (1972). Contribution to the limnology of high mountain lakes in Central America. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie*. 57 (3): 397-408.
- Löffler, H., (1983). Aspects of the history and evolution of alpine lakes in Austria. *Hydrobiologia*. 100: 143-152.
- Magurran, A. (2004). *Ecological diversity and its measurements*. Princeton University Press. New Jersey.
- Necchi, Jr. O., Branco, L. H. Z. & Branco, C. C. Z. (1995). Comparison of three techniques for estimating periphyton abundance in bedrock streams. *Archiv Für Hydrobiologie*. 134: 393-402.

- Newsome, A. & van Breemen, R. (2012). Characterization of the purple vacuolar pigment of *Zygonium ericatorum* alga. *Planta Médica*. 78 (11): 1.
- Ortiz-Álvarez, R., Triadó-Margarit, X., Camareno, L., Casamayor, E.O. & Catalan, J. (2018). High planktonic diversity in mountain lakes contains similar contributions of autotrophic, heterotrophic and parasitic eukaryotic life forms. *Scientific Reports*. 1: 8.
- *Panikkar, M. V. N., & Ampili, P. (1988). *Temnogametum keralense*, a new species from South India. *Journal Economic and Taxonomic Botany*. 12 (2): 397-400.
- *Panikkar, M. V. N., & Ampili, P. (1991). Species of *Temnogametum* W. & G. S. West from Kerala, South India. *Geobios new reports*. 10: 117-120.
- Pastorino, P. & Prearo, M. (2020). High-Mountain Lakes, Indicators of Change: Ecological characterization and environmental Global pressures. *Diversity*. 12: 260.
- *Patel, R. J. (1971). *Temnogametum prescottii*, a new species from India. *Phykos* 9 (2):132-136.
- *Phillips, J. A. (2002). Algae. En: R. J. F. Henderson (Ed). *Names and distribution of Queensland plants, algae and lichens* (pp. 228-244). Queensland Herbarium
- Pielou, E. C. (1984). *The interpretation of ecological data: a primer on classification and ordination*. John Wiley and Sons. 263 pp.
- *Prescott, G.W. (1947). New Zygnemataceae from Ecuador, *Ohio Journal Science*. 47: 132.
- *Randhawa, M. S. (1959). *Zygnemataceae*. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi. Indian Council of Agricultural Research. 478
- Rivera-Roldán, C. A. & Díaz-Quirós, C. (2004). Grandes taxones de fitobentos y su relación con la hidrología, física y química de pequeños ríos andinos. *Universitas Scientiarum*, 9: 75-86.
- Sommaruga, R. (2001). The role of solar UV radiation in the ecology of alpine lakes. *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*. 62 (1-2): 35-42.
- Sokal, R. & F. J. Rohlf. 1981. *Biometry*. Freeman. 2nd Ed. San Francisco, California. 259 pp.
- Stancheva, R., Hall, J. D., Herburger, K., Lewis, L. A., McCourt, R. M., Sheath, R. G., & Holzinger, A. (2014). Phylogenetic position of *Zygonium ericatorum* (Zygnematophyceae, Charophyta) from a high alpine habitat and ultrastructural characterization of unusual aplanospores. *Journal of Phycology*. 50 (5): 790-803.
- Stevenson, R. J. & Pan, Y. (1999). Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms. En: E. F. Stoermer & J. P. Smol (Eds.). *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences* (pp. 11-40). Cambridge: Cambridge University Press.
- Stewart, A., Delphine Rioux, Frédéric Boyer, Ludovic Gielly & Pompanon, F., (2021). Altitudinal Zonation of Green Algae Biodiversity in the French Alps. *Frontiers in Plant Science*. 12: 679428.
- *Transeau, E. N. (1932). The genus *Temnogametum*. *Ohio Journal of Science*. 32: 487-490.
- *Transeau, E. N. (1951). *The Zygnemataceae* (Fresh-water conjugate algae) with keys for the identification of genera and species, and seven hundred eighty-nine illustrations. Graduate School Monographs Contribution in Botany, No. 1. Ohio State University Press. 789 pp.
- Trumhová, K. & Klimešová, V. & Pichrtová, M. (2023). Seasonal Dynamics of *Zygnema* (Zygnematophyceae) Mats from the Austrian Alps. *Microbiology of Aquatic Systems*. 86 (6): 763-776.
- UTEX. (2022). *Culture Collection of Algae*. Recuperado 2022, de <https://utex.org/>
- Vilaclara, G., Cuna, E. & Zeeb, B., (2005). Subfossil chrysophyte cyst morphotypes from two tropical, high-mountain lakes in Nevado de Toluca volcano, Central Mexico. *Nova Hedwigia*. 128: 309-335.

- Vilches, A. M., Legarralde T. I. & Berasain, G. (2012). *Elaboración y uso de claves dicotómicas en las clases de biología*. Actas III Jornadas de Enseñanza e Investigación Educativa en el campo de las Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de la Plata, Argentina.
- Ward, J. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of American Statistical*. 58: 263-244.
- *Wei, Y. X., Yung-Kit, Y., Jackson, M. B. & Sawa, T. (1989). Some Zygnemataceae (Chlorophyta) of Ontario, Canada including descriptions of two new species. *Canadian Journal of Botany*. 67: 3238-3239.
- *Wei, Y. X. & Ying-Kit, Y. (2000). Reproduction of five species of Zygnemataceae (Chlorophyta) in Ontario lakes, Canada. *Algological Studies*. 98: 91–108.
- *West, W. & West, G. S. (1897). Welwitsch's African freshwater algae. *Journal of Botany, British and Foreign*. 35: 37.
- *Wille, N. (1909). Conjugatae und Chlorophyceae. En: Engler, A. & Prantl, K. (Eds.). *Die natürlichen Pflanzenfamilien Nachträge zum I. Teil, Abteilung 2 über die Jahre*. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann 13.
- *Yamagishi, T. (1963). New species of the Zygnemataceae collected in Japan. *Botany Magazine Tokyo*. 76: 215–218.

