



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

EL GÉNERO *Chlamydomonas* EHRENBERG, 1833  
(CHLOROPHYCEAE: CHLAMYDOMONADACEAE): UN  
ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INDUCEN  
CAMBIOS EN SU CICLO DE VIDA

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

PRESENTA

DIANA GUADALUPE ORTEGA OLGUIN

DIRECTOR DE TESINA:

DR. CRISTIAN ALBERTO ESPINOSA RODRIGUEZ

LOS REYES IZTACALA, TLALNEPANTLA, EDO. MÉX., 2022.





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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**

Al Doctor Cristian Alberto Espinosa Rodriguez, por confiar en mí y por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo, por el tiempo, el apoyo y la gran paciencia que siempre tuvo conmigo. También le agradezco por ayudarme a salir de mi zona de confort y poder atreverme a nuevos proyectos, no importa lo pequeños que fueran.

A mis asesores, por cada uno de sus comentarios y sugerencias para que este trabajo se desarrollara de la mejor manera.

A David, porque durante estos 10 años siempre he tenido tu apoyo y tus palabras de ánimo aún en la distancia, porque en los momentos difíciles siempre sabes qué decir y porque tu amistad es una de las más sinceras que he tenido. ¡Gracias manito!

A Ana Karen, Diana y Kareni, porque además de su amistad me compartieron parte de ustedes en cada plática, en las risas y hasta en los momentos tristes. Las aventuras en cada práctica, siempre las recordaré con mucho cariño.

A Jenni y Ale, porque desde que las conocí, han estado conmigo y me han apoyado, han creído en mí y siempre he encontrado una amistad muy bonita en ustedes. Gracias por todas las veces que me han escuchado y por siempre recordarme que sí puedo.

A las tortuguitas de las que estuve a cargo en el vivario, sobre todo a la grandota Maldiva y la pequeñita Melón, demostraron siempre ser muy valientes y aferradas a la vida. A mis serpientes, porque antes les tenía mucho miedo, pero gracias al vivario, pude conocerlas mejor y aprendí a quererlas mucho. Prometo llevar lo que aprendí a muchas personas, para que dejen de verlas como “malas” al igual que a los insectos, arácnidos y muchos “bichos” más. Gracias por enseñarme a apreciar la vida de una forma tan especial.

## **Dedicatorias**

*Al ser más lindo que pude haber conocido. Porque sé que estás presente en cada uno de mis días y porque eres quien me impulsa a seguir adelante. Gracias por haberme dado tu cariño y enseñanzas. Un abrazo hasta el cielo, Abuelita.*

*A mi mamá, porque nunca me faltó un desayuno para ir a la escuela, por todas las cosas que hiciste para mantenerme segura y por las canciones que nos aprendimos y que siempre recuerdo con amor. Perdón por llevarte tantos insectos a casa, pero gracias por recibirlos, siempre. A mi papá, por haberme enseñado a reír aún en los momentos tristes, por ser mi ejemplo de fortaleza y por siempre acompañarme a tomar el transporte, sin importar si llovía o hacía frío. Gracias a los dos por amarme tanto, por ser mis amigos, y porque siempre encontraron la manera de darnos todo lo que mis hermanos y yo necesitamos, porque siempre nos dan su cariño y nos enseñan a ser buenas personas como ustedes.*

*A mis hermanos, porque cuando era pequeña quería llegar muy lejos, así como ustedes. Siempre han sido mi ejemplo a seguir. A mi hermano, por cuidarme y hacerme saber que estás conmigo en todo momento, aún en las travesuras que no salieron tan bien. Te admiro mucho. A mi mejor amiga: mi hermana. Gracias por aprenderte tantos nombres raros y ayudarme a estudiar, por confiar en mí y estar conmigo cuando todo se viene abajo, gracias por quererme tanto y por creer en mí. Los amo muchísimo.*

*A mi abuelito, porque en él, también encontré el ejemplo de trabajo y esfuerzo. Gracias por escucharme y platicarme tantas historias y anécdotas. Gracias por ayudarme con mis "bichitos" y por siempre darme un abrazo que me reconforta cuando más lo necesito.*

*A mis tías Ángeles y Norma, a mis primas, a mi tía Tere, a mis padrinos, tíos y primos. Gracias por cuidarme, por estar presentes, por todas sus palabras de ánimo y porque cada que ven un animalito se acuerdan de mí. ¡Los quiero mucho!*

*A Citlali, Mez y Jonathan, porque también son mi familia. Gracias por apoyarme, por escucharme cada que les hablaba de algo relacionado a la Biología y por salvar a las arañitas de su casa, significa mucho para mí.*

*A la persona que desde el primer momento ha creído en mí. Gracias por estar en cada momento de este proceso, por todo el amor que me das, por tu apoyo y por no dejar que me rinda. Gracias por hacer los momentos más divertidos y por reírte de mis chistes malos. Agradezco mucho la oportunidad que tengo de vernos crecer juntos y de saber que sin importar lo que pase mañana, ahí estaremos para apoyarnos. Muchas gracias por todo, Gerardo ¡Te amo!*

*Finalmente, a mi mejor amigo Dunkel, quien me acompañó en cada desvelada y fue mi motivo para seguir adelante y no darme por vencida, gracias por cambiar mi vida y hacer que disfrutara hasta de los detalles más pequeños, gracias por todas las risas que me das con tus travesuras, te quiero como no te imaginas.*

# Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>5</b>
<b>Justificación</b> .....	<b>8</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>8</b>
<b>Método</b> .....	<b>9</b>
<b>Resultados</b> .....	<b>19</b>
<b>Discusión</b> .....	<b>25</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>28</b>
<b>Perspectivas</b> .....	<b>28</b>
<b>Literatura citada</b> .....	<b>29</b>
<b>Anexo 1</b> .....	<b>35</b>

## Resumen

El género *Chlamydomonas* presenta una elevada diversidad de especies, así como características morfológicas y genéticas que lo posicionan como un organismo modelo. Ha sido utilizado para estudiar procesos biológicos, aspectos genéticos, producción de biocombustibles, aplicaciones médicas y de biorremediación, así como en la acuicultura. Sin embargo, se sabe que bajo condiciones de tensión ambiental estos organismos son capaces de formar estructuras multicelulares, las cuales le confieren una resistencia ante los diversos tipos de estresores que puedan estar presentes en el medio.

En este estudio se consideró partir de la descripción morfológica del género, ciclo de vida, importancia y algunas investigaciones que han intentado explicar el fenómeno de agregación en el género, además de los registros de este género en el país. Se realizó una revisión bibliográfica en el portal Web of Science con ayuda de la base de datos Biological abstracts con los siguientes términos de búsqueda: (1) palmelloid *Chlamydomonas*, (2) *Chlamydomonas* aggregation, (3) palmelloid aggregations (4) *Chlamydomonas* colony, (5) *Chlamydomonas* predat\* y (6) *Chlamydomonas* life cycle. En conjunto, la investigación arrojó un total de 230 artículos publicados en un periodo de 22 años, (entre 2000 y 2021) de los cuáles únicamente 27 estaban relacionados al ciclo de vida y 11 a factores que inducían estructuras multicelulares en *Chlamydomonas*. Los países que destacan por sus publicaciones sobre este fenómeno son: Estados Unidos, Alemania y Japón, mientras que las especies más utilizadas fueron *C. reinhardtii*, *C. debaryana*, *C. microsphaera* y *C. nivalis*. Por su parte, las áreas de estudio que tienen interés en la formación de estructuras en este género fueron ecología, genética y toxicología. Los factores abióticos y bióticos causantes de agregación celular mencionados en estas fuentes fueron: metales pesados como Cd, Cu, HgCl<sub>2</sub>, CdCl<sub>2</sub>, además de plaguicidas (paraquat), surfactantes (ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS)), sales (NaCl) y luz, además de bacterias y depredadores como *Paramecium tetraurelia*. Debido a las diversas aplicaciones que posee *Chlamydomonas*, es importante conocer su ciclo de vida, así como aquellos factores que provocan cambios en el mismo. Además, se tienen registros de florecimientos de este género en los Lagos

urbanos de la Cantera Oriente, por lo que se propone realizar experimentos que involucren algunos factores bióticos y abióticos que se han registrado como relevantes, entre los que destacan la relación N:P o la disponibilidad de potasio, así como la presencia de *Daphnia* del complejo *pulex* o *Brachionus calyciflorus* y que pueden ser un factor importante al momento de la agregación celular del género.

**Palabras clave:** Agregación, Ciclo de vida, Contaminantes, Depredación, Palmeloides.

## Abstract

The genus *Chlamydomonas* has a high diversity of species with morphological and genetic characteristics that position it as a model organism. It has been used to study biological processes, genetic aspects, biofuel production, medical and bioremediation applications, and aquaculture. However, it is known that under conditions of environmental stress, these organisms can form multicellular structures that give them resistance to various types of stressors that may be present in the environment.

This study was considered from the morphological description of the genus, life cycle, importance, and some investigations that have tried to explain the phenomenon of aggregation in the genus and records of this genus in the country. A bibliographic review was carried out in the Web of Science portal with the help of the Biological Abstracts database. The following search terms were used: (1) palmelloid *Chlamydomonas*, (2) *Chlamydomonas* aggregation, (3) palmelloid aggregations (4) *Chlamydomonas* colony, (5) *Chlamydomonas* predat\* and (6) *Chlamydomonas* life cycle. Overall, the research threw 230 articles published in 22 years (between 2000 and 2021), of which only 27 were related to the life cycle and 11 to factors that induce multicellular structures in *Chlamydomonas*. The countries that stand out for their publications on this phenomenon are the United States, Germany, and Japan. At the same time, the most used species were *C. reinhardtii*, *C. debaryana*, *C. microsphaera* and *C. nivalis*. On the other hand, the areas of study interested in the formation of structures in this genus were ecology, genetics and toxicology. The abiotic and biotic factors that cause cell aggregation were heavy metals such as Cd, Cu, HgCl<sub>2</sub>, CdCl<sub>2</sub>, also pesticides (paraquat), surfactants (perfluorooctane sulfonic acid (PFOS)), salts (NaCl) and light, in addition to bacteria and predators such as *Paramecium tetraurelia*. Due to the various applications that *Chlamydomonas* has, it is important to know its life cycle, and those factors that cause its changes. In addition, there are records of blooms of this genus in the urban lakes of the Cantera Oriente, so it is proposed to carry out experiments that involve some relevant biotic and abiotic factors. Some of these are changes in N:P ratio,

potassium availability, and the *Daphnia pulex* complex or *Brachionus calyciflorus*, which may be an important factor in the cell aggregation in the genus.

**Keywords:** Aggregation, Life cycle, Pollutants, Predation, Palmelloids.

## Introducción

*Chlamydomonas* (principalmente la especie *C. reinhardtii*), ha sido ampliamente utilizada como organismo modelo gracias a su fácil y rápido crecimiento, tipos de nutrición: autotrófico, mixotrófico o heterotrófico, así como la forma de reproducción y su alta respuesta a técnicas de entrecruzamiento por medios genéticos clásicos. Investigaciones sobre la fotosíntesis en esta especie han sido de gran ayuda, pues los estudios en los mutantes no fotosintéticos muestran que gracias al metabolismo heterotrófico de fuentes de carbono orgánico (como el acetato), pueden sobrevivir aún sin realizar fotosíntesis. También ha ayudado a esclarecer la constitución de los flagelos, los cuáles se desprenden y vuelven a crecer, esto gracias a estructuras llamadas microtúbulos. Otra de las grandes aportaciones son los estudios de fotorrecepción, los cuáles han sido llevados a cabo en la mancha ocular (Niño, 2013; Tran & Kaldenhoff, 2020).

Es importante por su uso en aplicaciones biotecnológicas, para comprender y mejorar la fabricación de bioproductos (ej. biocombustibles) (Scranton *et al.*, 2015), así como para el estudio de procesos biológicos esenciales como es el caso del ciclo del nitrógeno, ya que en este organismo se han estudiado las vías de asimilación de diversas formas de nitrógeno como las inorgánicas (nitrato, nitrito y amonio) y orgánicas (urea, aminoácidos y purinas). Recientemente, se ha observado que, en las reacciones transformadoras de nitrógeno, revelan que esta microalga puede llevar tanto un proceso de amonificación por interacciones mutualistas con bacterias como un proceso de desnitrificación que libera  $N_2O$  al ambiente (Bellido-Pedraza *et al.*, 2020).

Un ejemplo de bioproductos, es el uso de microalgas de agua dulce y tropicales como especies alimenticias en la acuicultura, ya que su composición de ácidos grasos ha sido asociada a altas tasas de crecimiento y supervivencia de zooplancton. Sumado a lo anterior, gracias a que posee células esféricas pequeñas, *Chlamydomonas* resulta una fuente alimenticia ideal para algunos organismos herbívoros (Renaud *et al.*, 1994).

También ha destacado en la biomedicina, ya que se observó el efecto del consumo de biomasa de *Chlamydomonas* sobre la salud gastrointestinal de ratones y

posteriormente en humanos, donde los participantes reportaron una disminución significativa de malestar estomacal, diarrea, hinchazón, gases, así como evacuaciones regulares (Fields *et al.*, 2020).

Dentro de algunas investigaciones, diversos autores han mencionado la formación de estructuras multicelulares (agregados y palmeloides) en cultivos de *Chlamydomonas* (Figura 1). En estos estudios han descrito la respuesta que tiene este género ante diversas tensiones ambientales y muestran la capacidad de adaptación para provocar respuestas específicas de acuerdo con la intensidad de las tensiones que están enfrentando; es decir, si el estrés es bajo se formarán palmeloides, si el estrés es alto, se formarán agregados. Estas estructuras son distinguibles en número, pues los palmeloides están compuestos entre 4 a 16 células rodeadas por una matriz extracelular, mientras que los agregados están conformados desde unas cuantas decenas a varios miles de células y se mantienen unidas por una matriz extracelular mucosa que les confiere resistencia a la digestión (Carpentier *et al.*, 2019).

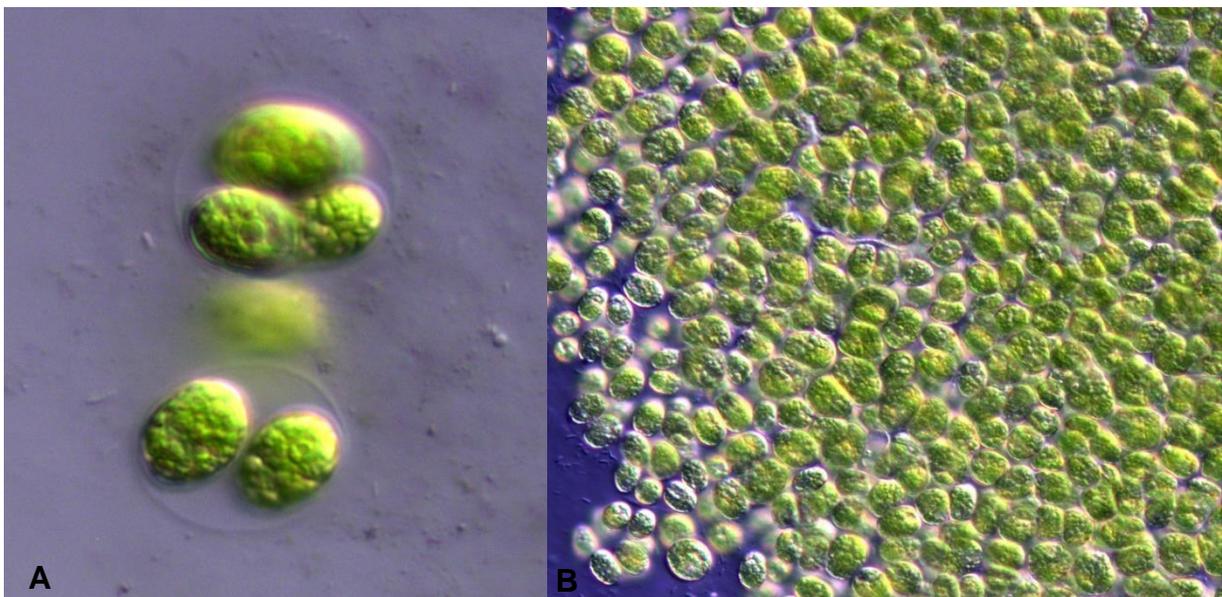


Figura 1: A) Palmeloide rodeado por matriz extracelular, B) Agregado rodeado por matriz extracelular mucosa.

Se cree que una de las razones por las que *C. reinhardtii* es capaz de formar palmeloides, es para hacer frente a la herbivoría, ya que en presencia del rotífero *Brachionus calyciflorus*, *C. reinhardtii* forma esta estructura en un lapso de 25 h, según lo reportado por Lüring & Beekman en 2006. Otro ejemplo, es el caso del

euglenoideo *Peranema trichophorum*, donde se usaron seis cepas como presa (*C. reinhardtii*, *C. debaryana* y *C. moewusii*) y esto con la finalidad de conocer cómo es que la variación de algunos rasgos fenotípicos, así como la motilidad, influyen en el agrupamiento celular inducido por depredadores, donde las cepas de menor tamaño se agregan con mayor facilidad, que las cepas grandes y de nado rápido. Se sugiere que *Peranema* secreta kairomonas, las cuales son detectadas por *Chlamydomonas* y por ello se produce el agrupamiento (Sathe & Durand 2016). Otra de las tensiones reportadas, ha sido el estrés salino, ya que, en presencia de NaCl en el medio, *Chlamydomonas* comienza a formar palmeloides, luego de 12 h (Khona *et al.* (2016).

Otras de las estrategias para poder sobrevivir al estrés ambiental son la alteración de la fotosíntesis y la producción de especies reactivas de oxígeno (ERO), esta primera línea de defensa tiene como finalidad contener la ocurrencia de estrés oxidativo al disminuir la producción de ERO e incrementar la degradación de ERO usando múltiples estrategias como la extinción no fotoquímica, vías alternas de transporte de electrones, activación de enzimas o vías antioxidantes. *Chlamydomonas* también puede desencadenar procesos alternativos: la aclimatación, la socialización como lo es la formación de estructuras multicelulares y finalmente la muerte celular programada, ésta última se considera un mecanismo de supervivencia, ya que, al ser destruidas, las células liberan al medio moléculas que son capaces de ayudar a la población a resistir las condiciones del entorno de una mejor manera (Carpentier *et al.* 2019).

A pesar de los estudios anteriormente mencionados, aún es poca la información sobre los factores que provocan la formación de estas estructuras en el género, sin mencionar que en México no se ha estudiado este fenómeno a pesar de tener registros en el país, por lo que es de suma importancia retomar las investigaciones que incluyan los elementos causantes de este fenómeno en especies de *Chlamydomonas* presentes en lagos y/o lagunas de México.

## **Justificación**

Algunas especies de este género se han observado en los lagos de la Cantera Oriente (REPSA) (Ponce *et al.*, 2019). Así mismo, Peralta *et al.* (2016) indican la formación de flóculos en la capa superficial del agua en el lago norte durante el mes de febrero. Por lo anterior, es de particular interés recopilar información que ayude a explicar el fenómeno producido por diversos factores bióticos y abióticos ya que, al momento de realizar investigaciones en laboratorio o campo, pueden existir condiciones ambientales desfavorables que llevan a estos organismos a modificar su ciclo de vida.

## **Objetivos**

### **General**

- Analizar con base en la literatura existente, los factores que provocan cambios en el ciclo de vida del género *Chlamydomonas*.

### **Particulares**

- Describir los caracteres morfológicos, reproductivos y ecológicos que delimitan a las especies del género *Chlamydomonas*.
- Categorizar el número de estudios por término de búsqueda, por año, especies estudiadas, las disciplinas y países a los que pertenecen dichos estudios.
- Clasificar los factores físicos, químicos y biológicos que pueden ser causantes de la formación de estructuras multicelulares en el género *Chlamydomonas*.

## Método

Revisión de literatura para identificar los factores que generan cambios en el ciclo de vida de *Chlamydomonas*

Se utilizó el sitio Web of Science con la base de datos Biological Abstracts.

## Temporalidad

Se consideraron las publicaciones entre el periodo 2000 a 2021.

## Términos de búsqueda

1) palmelloid <i>Chlamydomonas</i>	2) <i>Chlamydomonas</i> aggregation	3) palmelloid aggregations	4) <i>Chlamydomonas</i> colony	5) <i>Chlamydomonas</i> predat*	6) <i>Chlamydomonas</i> life cycle
--	---	----------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	--

## Categorización de los resultados

Con ayuda del programa SigmaPlot 11.0, se realizaron gráficas del número de estudios por término de búsqueda, estudios acumulados a lo largo de 22 años, estudios por país, especies utilizadas, área de estudio y una tabla que muestra los factores que provocan cambios en el ciclo de vida de *Chlamydomonas*

## Estructura y clasificación del género

*Chlamydomonas* (del griego: *Chlamys*, manto; *monas*, solitario) es un taxón nombrado por Christian G. Ehrenberg (1833) y a pesar de que la especie era incierta, Ettl consideraba que la especie tipo era *C. reinhardtii*. No fue hasta 1888 que se describió formalmente y para la década de 1960 ya era la especie de clorófitas más utilizada en laboratorio (Harris, 2009a). Su clasificación de acuerdo con la propuesta de Database Algae (Guiry & Guiry, 2021) es: Dominio: Eucariota, Reino: Plantae, Subreino: Viridiplantae, Infrareino: Chlorophyta, Filo: Chlorophyta, Clase: Chlorophyceae, Orden: Chlamydomonadales, Familia: Chlamydomonadaceae, Género: *Chlamydomonas*.

El género *Chlamydomonas* (Figura 2 y 3) presenta una forma ovoide, elipsoidal o esférica y su tamaño varía entre 9 y 12  $\mu\text{m}$  de longitud y de 4 a 8  $\mu\text{m}$  de diámetro. Tiene una estructura claramente polar, dos flagelos isocontos anteriores y un cloroplasto en forma de copa. Ya sea en la región basal o a lo largo del costado de la célula y muchas veces, se ven gránulos de almidón alrededor de los pirenoides (Nickelsen & Kück, 2000; Harris, 2009b; Isais, 2019; Guiry & Guiry, 2022).

Aunque la pared celular es distinta en todas las especies, la descripción que se dará a continuación se refiere a la especie *C. reinhardtii*, ya que es la especie más conocida. Esta se encuentra muy adherida a la membrana plasmática, presenta una capa mucilaginosa en la parte externa de la pared. Casi todas las especies tienen una mancha ocular embebida en el cloroplasto, así como una o más vacuolas contráctiles (Harris, 2009a).

Los flagelos emergen de los cuerpos basales situados en el extremo anterior de la célula. El axonema presenta la estructura 9+2 que es una estructura característica en cilios y flagelos de las células eucariotas. Los cuerpos basales se ubican debajo del extremo apical de la célula, están conectados entre sí por una fibra estriada distal y se unen en los extremos proximales a cuatro conjuntos de microtúbulos que se extienden alrededor de la porción anterior de la célula. Los cuerpos basales, no son solo importantes para los flagelos, pues cumplen una función importante en la mitosis ya que asumen un papel alternativo como centriolos (Harris, 2001; 2009b).

La mancha ocular es un organelo por el cual las células orientan su movimiento hacia la luz (fototaxis). En 1980, Melkonian y Robenek confirmaron una asociación específica entre los microtúbulos y la mancha ocular, también encontraron que la mancha ocular se encuentra entre las extremidades distales de las raíces flagelares y ésta se desplaza a 45° del plano flagelar, por lo tanto, los flagelos pueden ser designados como *cis* y *trans* según la posición de la mancha ocular. De esta manera, se comprende el mecanismo por el cual un estímulo de luz induce una frecuencia en los “pulsos” flagelares y provoca un cambio en la dirección del nado (Harris, 2009b).

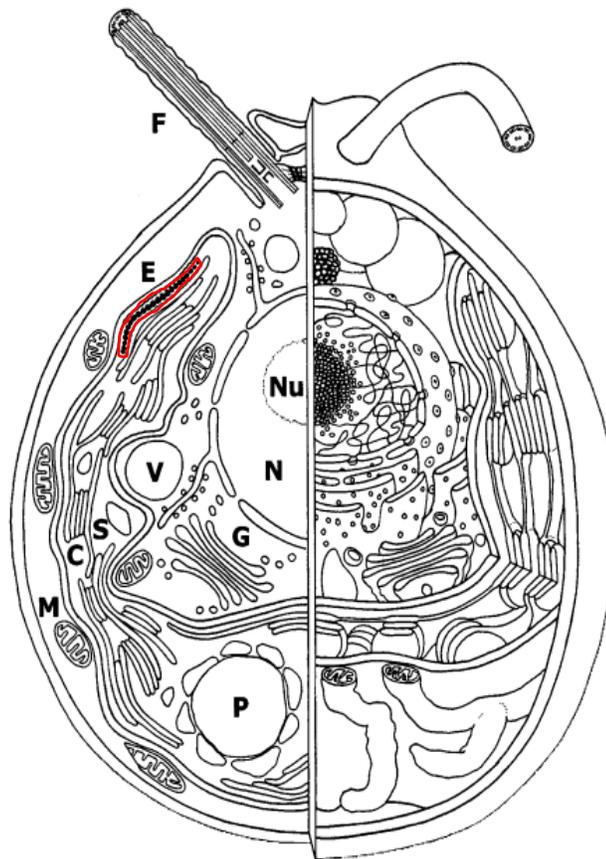


Figura 2. Esquema de *Chlamydomonas reinhardtii*. Vista bidimensional (izquierda) y tridimensional (derecha). Presenta un núcleo central (N), nucleolo (Nu), dos flagelos (F), cloroplasto con forma de copa (C), mancha ocular (E), (señalada por un borde rojo), pirenoide rodeado de gránulos de almidón (P) y mitocondrias (M). Además, se puede distinguir el aparato de Golgi (G), granos de almidón (S) y las vacuolas (V). Tomado de Nickelsen & Kück, (2000).

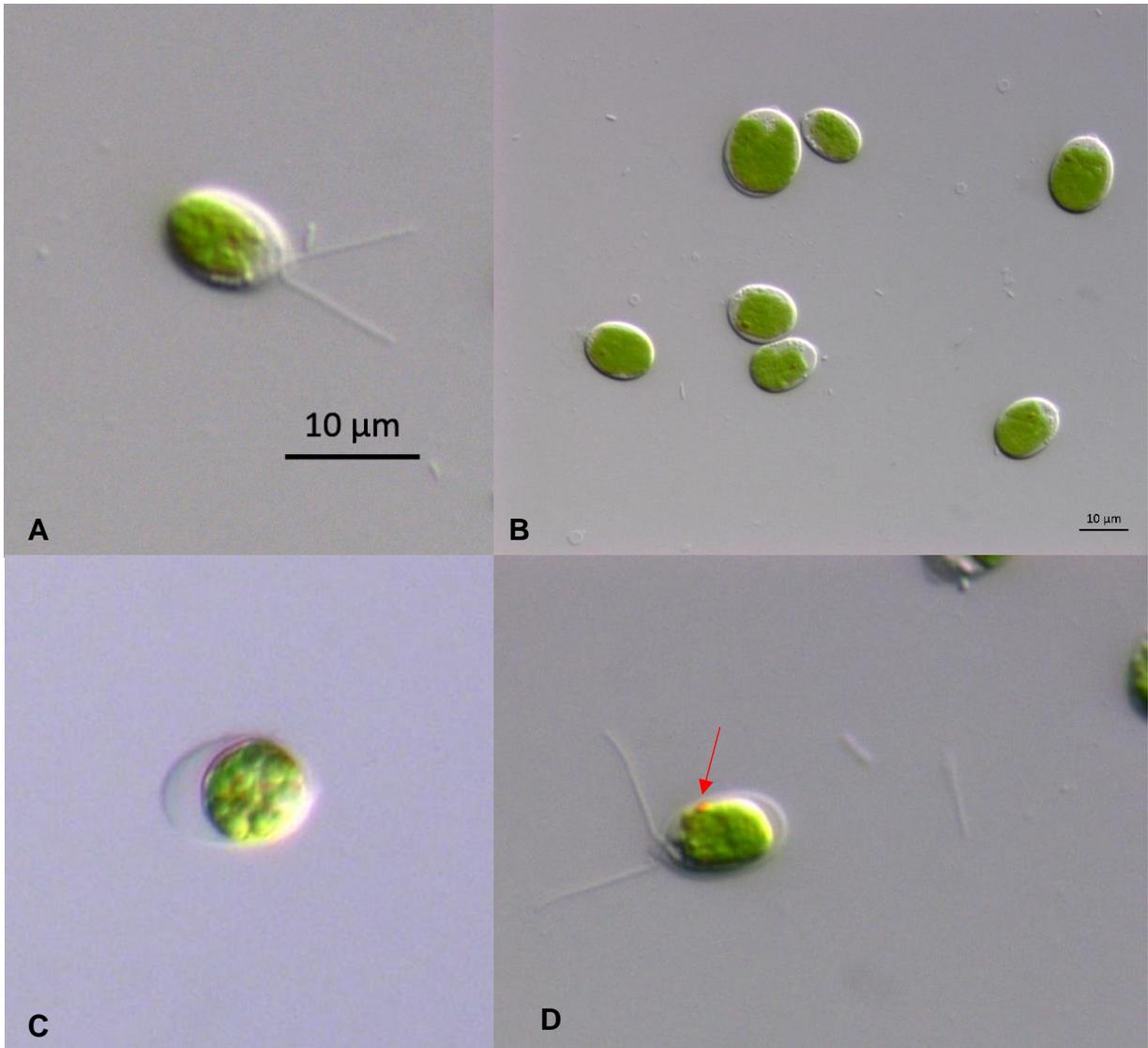


Figura 3. A) *Chlamydomonas globosa* de la Cantera Oriente de la UNAM, B) Forma no flagelada de *Chlamydomonas*, C) Quiste, D) Mancha ocular (señalada con una flecha).

### **Crecimiento, hábitat y distribución**

Se considera que *Chlamydomonas* (incluyendo *Chloromonas*) es uno de los géneros de algas verdes más diverso, ya que cuenta con un aproximado de 951 especies, de las cuales 695 son nombres válidos (Guiry & Guiry, 2021). Se han considerado a los flagelos y al cloroplasto en forma de copa (con la presencia de un pirenoide) como criterios morfológicos suficientes para identificar una célula como *Chlamydomonas*; sin embargo, únicamente es confiable para el nivel de género ya que para identificar una especie sin ambigüedades, además de la microscopía

óptica es necesario conocer marcadores moleculares como *rbcl*, espaciadores transcritos internos (ITS 1 y 2) (Sasso *et al.*, 2018) o de genes como el ARNr 18s y 26s, que son muy útiles para conocer más acerca de la filogenia de las algas (Buchheim & Chapman, 1991). Debido a que es muy difícil distinguir solo con el criterio de morfoespecie, los análisis de secuencias de genes ARNr muestran que *Chlamydomonas* es altamente polifilética dentro de los Chlamydomonadales y es por esto, que varias especies del género han tenido que reclasificarse entre los géneros *Oogamochlamys* (Pröschold *et al.*, 2001) y *Microglena* (Demchenko *et al.*, 2012).

Una de las ventajas que presenta, es que su capacidad fotosintética no es indispensable para su crecimiento, ya que puede crecer de forma heterotrófica en condiciones de oscuridad en presencia de acetato, mientras que con luz su crecimiento es mixotrófico, pues puede metabolizar monosacáridos como pentosas y hexosas, así como un crecimiento autotrófico usando dióxido de carbono como fuente de carbono (Boyle & Morgan, 2009).

Las especies de este género se encuentran con frecuencia en agua dulce, aunque algunas cepas de *C. reinhardtii* usadas para secuenciación genómica han sido aisladas del suelo. Algunas especies se desarrollan en medios marinos, por ejemplo *C. provasolli* y *C. hadleyi*, quienes tienen una asociación simbiótica con foraminíferos como *Cyclorbiculina compressa* (Lee, 1979; Peers & Krishna, 2008; Guiry & Guiry, 2021). Distintas especies de *Chlamydomonas* están adaptadas a una amplia gama de hábitats como drenajes ácidos de minas, por ejemplo, *C. eustigma* (Hirooka *et al.*, 2017), o ambientes marinos templados: *C. euryale* y *C. hedleyi* (Burch *et al.*, 2014).

En los Alpes austríacos, se han observado manchas rojas en la nieve causada por *C. nivalis*, especie que en condiciones de estrés expresa una coloración roja, debido a la concentración de astaxantinas y ácidos grasos derivados de un éster (Remias *et al.*, 2006; Carpentier *et al.*, 2019).

*Chlamydomonas* también se desarrolla en las costras biológicas del suelo, donde participan en la estabilización de la superficie de suelos, contribuye a la producción

primaria y actúan como especies pioneras. Se encuentran también en la zona pelágica de lagos donde suelen formar florecimientos. Varias especies presentan una alta movilidad y esto les confiere una ventaja en lagos que se han estratificado en distintas capas ya que durante el día ascienden a la superficie para optimizar su exposición a la luz solar y por la noche descienden para aprovechar los nutrientes en el ambiente (Jones, 1988; Sasso *et al.*, 2018).

Se ha citado a *Chlamydomonas* en el sureste de los Estados Unidos, donde en la Universidad de Texas se encuentra el cultivo tipo de *C. mexicana*. El género también ha sido registrado en Canadá, Guadalupe, Costa Rica y México, donde es capaz de crecer en lagos pobres en nutrientes o aguas ácidas (Nakada & Nozaki, 2014).

### **Registros de *Chlamydomonas* en México**

Algunas de las especies citadas para México son: *Chlamydomonas globosa*, *C. incerta* y *C. mexicana* en lagunas y depósitos de agua dulce en el Bosque de Chapultepec, así como *C. philotes* en Chihuahua y Durango asociada a suelo del desierto (Ortega, 1984).

Escobar-Briones *et al.*, (2002) investigaron la estructura de la comunidad de un estanque del Jardín Botánico de la UNAM, donde reconocieron *Chlamydomonas* sp. con una densidad igual a 390 céls. ml<sup>-1</sup>. Mientras que Barrera *et al.*, (2008) mencionaron la presencia de *Chlamydomonas caeca* en el río Naolinco en Veracruz, donde hay descargas de aguas residuales municipales, así como las aguas residuales de productos lácteos. Peralta *et al.*, (2016) indicaron la formación de flóculos en la capa superficial del agua en el lago Norte de la Cantera Oriente durante el mes de febrero, donde contabilizaron alrededor de 2,094 céls. ml<sup>-1</sup>. Algunas otras especies de este género como *Chlamydomonas globosa*, *C. ehrenbergii* y *Chlamydomonas* sp. se han observado en los lagos de la Cantera Oriente (REPSA) (Ponce *et al.*, 2019). Isaís (2019) determinó la diversidad del género *Chlamydomonas*, para uno de los lagos de la Cantera Oriente de la REPSA, donde cita cinco nuevos registros para México: *Chlamydomonas monadina*, *C. grovei*, *C. globosa*, *C. snowiae* y *C. conversa*. Finalmente, Choix *et al.*, (2021) reportaron a *Chlamydomonas* sp. en la Laguna de Cajititlán, Jalisco.

## Ciclo de vida y tipos de apareamiento

En la Figura 4, observamos el ciclo de vida de *Chlamydomonas*, éste tiene una fase asexual que comienza con una célula vegetativa móvil en estado haploide (**Figura 4a**) ésta pasa por un proceso de división celular (mitosis) para formar zoosporas (**Figura 4b**), las cuales formarán su propia pared celular estando dentro de la pared materna (**Figura 4c**). Estas células van a sintetizar sus flagelos y consecutivamente, producirán enzimas que rompen la pared esporangial y de esta manera son liberadas en el medio (**Figura 4d**), donde comenzarán a crecer y se desarrollarán como células vegetativas, dando fin a la fase asexual (Ettl, 1983; Guiry & Guiry, 2022).

Por su parte, la fase sexual (Figura 4), comprende tres etapas principales: gametogénesis, activación de los gametos y la formación de cigoto. La gametogénesis (**Figura 4a**) se desencadena debido a cambios ambientales o estímulos hormonales, uno de ellos puede ser la pérdida de una fuente de nitrógeno, lo que provoca la diferenciación dependiente de luz en las células vegetativas en los gametos (Pan & Snell, 2000).

Los gametos comienzan su liberación (**Figura 4b1**) gracias a la autolisina, una enzima que es liberada por las células hijas luego de la división del citoplasma. Los gametos biflagelados altamente móviles y con tipos opuestos de apareamiento (+/- en especies heterotálicas), comienzan a chocar entre sí y comienzan a adherirse unos con otros mediante los flagelos, una vez que los gametos de tipos opuestos se juntan (**Figura 4c1**), se adhieren por medio de aglutininas, las cuáles se activan y posteriormente incrementan su concentración en los flagelos, lo que provoca una mayor capacidad de adhesión (Pan & Snell, 2000; Cortés, 2011).

A partir de este momento, comienza una serie de cambios celulares como la degradación de la pared celular, lo que permitirá la plasmogamia (fusión de los gametos) en la zona apical de cada gameto. Después de este proceso, se comienzan a formar cigotos cuadriflagelados denominados planocigoto (**Figura 4d1**), se desactivan las aglutininas, se reabsorben los flagelos y una vez en la cariogamia (fusión de los núcleos de los gametos) se obtiene el estado diploide del

cigoto (**Figura 4e**). Este cigoto formará una pared gruesa y entrará en un estado de latencia (hipnocigoto/zigospora), lo que le permitirá sobrevivir en condiciones de deficiencia de nutrientes, mismas que indujeron la gametogénesis. Una vez que las condiciones ambientales vuelven a ser favorables, el cigoto germinará y mediante un proceso de división meiótica, dará como resultado cuatro células hijas haploides (**Figura 4f**) dentro de una pared materna, estas formarán su propia pared celular y flagelos, posteriormente serán liberadas para su maduración (**Figura 4g**), se volverán células vegetativas y de esta forma se completará el ciclo sexual (Cortés, 2011). Anteriormente se mencionó que la maduración de la zigospora otorga resistencia a las tensiones ambientales (como la desecación). En cultivos líquidos, las zigosporas tempranas y maduras pueden formar agregados, lo que permite mejorar la resistencia al estrés. En condiciones más severas se forman estados palmeloides (**Figura 2h**) que son de tamaño limitado para mejorar la supervivencia, por lo que *Chlamydomonas* forma estructuras celulares de mayor tamaño llamadas “agregados” o “floculados” (**Figura 2i**). Una vez que las condiciones vuelven a ser óptimas, las células se (**Figura 2j**) liberarán (palmeloides) o (**Figura 2k**) disociarán (agregados) en el medio (Carpentier *et al.*, 2019).

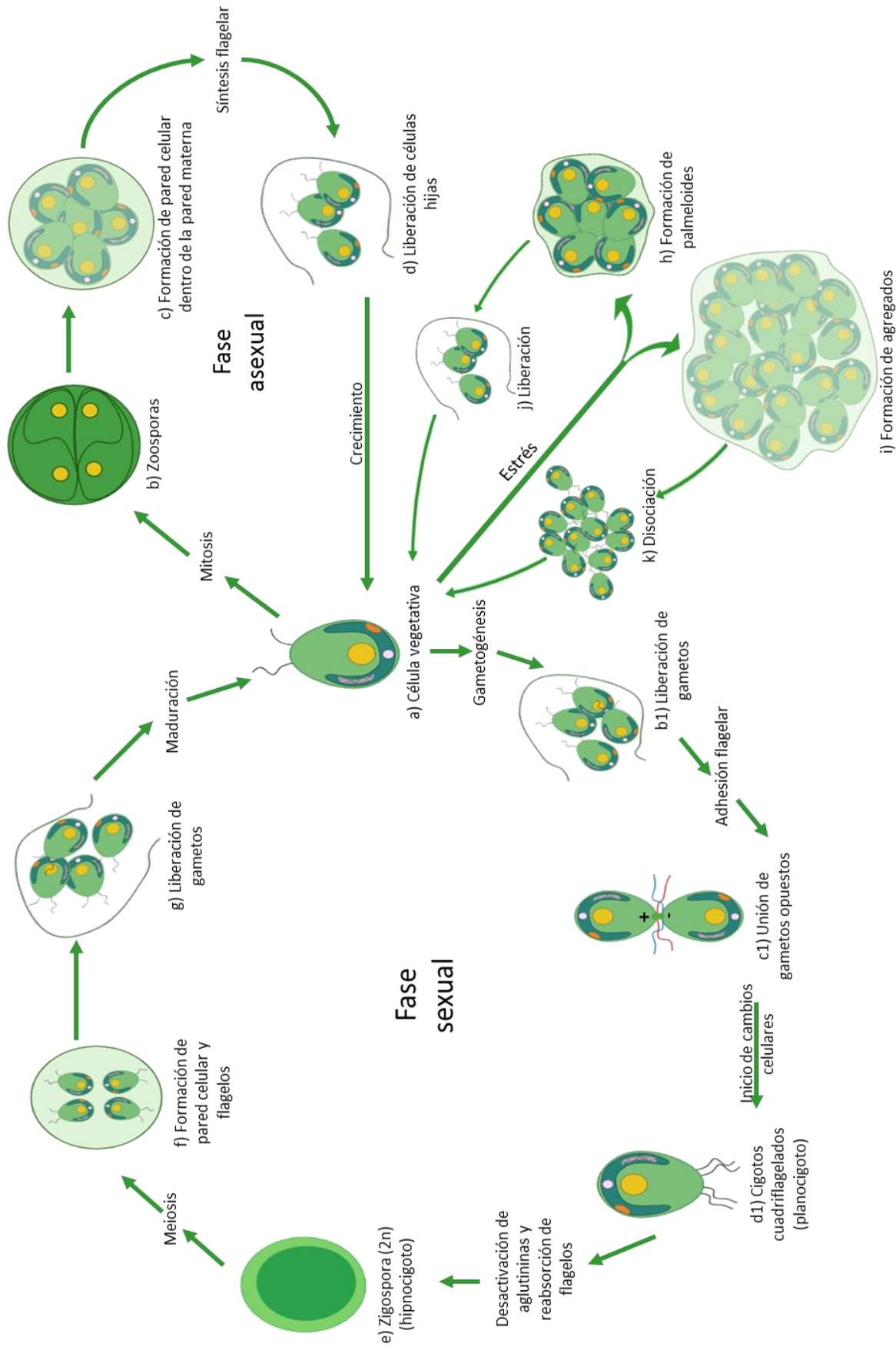


Figura 4. Ciclo de vida de *Chlamydomonas*. La fase asexual de *Chlamydomonas*. 2a) célula haploide, 2b) zoosporas, 2c) pared materna y formación de su propia pared celular y 2d) liberación de células hijas. La fase sexual del ciclo de vida de *Chlamydomonas*. (2<sub>a1</sub>) Inicio de la gametogénesis y (2<sub>b1</sub>), liberación de los gametos, (2<sub>c1</sub>) unión de gametos opuestos y (2<sub>d1</sub>) formación del planocigoto y (2e) zigospora. (2f) formación de la pared celular y de los flagelos. (2g) Liberación de gametos y maduración celular. En condiciones de estrés, las células de *Chlamydomonas* formarán estructuras llamadas (2h) palmeloides y si este estrés persiste, entonces formarán (2i) agregados, una vez que las condiciones regresen a la normalidad, estas estructuras se (2k) disociarán o (2j) liberarán. Basado en Pan & Snell, (2000) y Cortés, (2011).

Se sabe que las especies más usadas en laboratorio, *C. reinhardtii* y *C. moewusii*, son heterotálicas e isógamas, es decir que para que exista la reproducción de tipo sexual, es necesaria la unión de dos células con gametos opuestos pero compatibles “+” y “-“ (lo que en macroorganismos equivale al sexo es decir “macho” y “hembra”) además de ser similares en tamaño y apariencia. Por su parte, hay especies homotálicas donde ambos tipos de apareamiento (+/-) se pueden formar en una sola población, pero con una gran diversidad de tipos de cópula o unión gametangial (figura 5) como lo son la isogamia (**Figura 5a**), que es definida como el apareamiento entre dos gametos de similar tamaño, pero indistinguibles a nivel de microscopía óptica. La anisogamia (**Figura 5b**), es la unión entre dos gametos de estructura similar pero diferente tamaño y la oogamia (**Figura 5c**) es donde la unión ocurre entre un “espermatozoide” móvil pequeño y un “óvulo” grande no flagelado (Harris, 2009c).

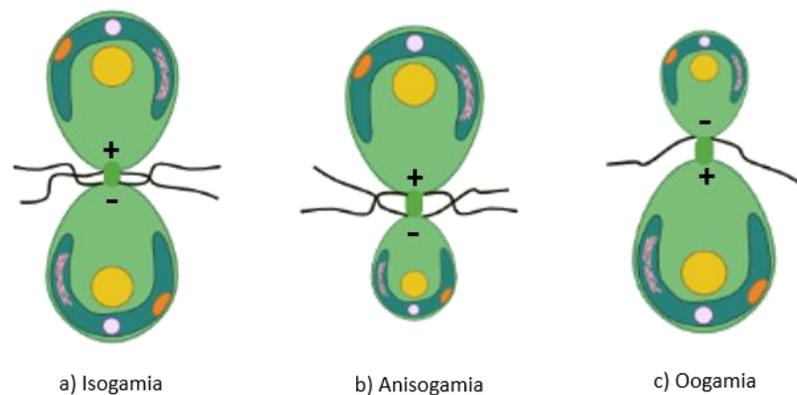


Figura 5. Tipos de apareamiento en la reproducción sexual de *Chlamydomonas*. (a) isogamia, (b) anisogamia y (c) oogamia.

## Resultados

La búsqueda en la base de datos Biological Abstracts arrojó un total de 230 artículos, de los cuales solo 38 abordaron la temática de los objetivos de este trabajo. De ellos, ocho pertenecen al término palmelloid *Chlamydomonas*, 27 a *Chlamydomonas* life cycle y tres a *Chlamydomonas* aggregation (Figura 6). *Chlamydomonas* predat\*, *Chlamydomonas* colony y palmelloid aggregations, presentan resultados iguales a cero, ya que arrojaron artículos que se mencionaron en términos anteriores, por lo que no se contaron para evitar una duplicación de información.

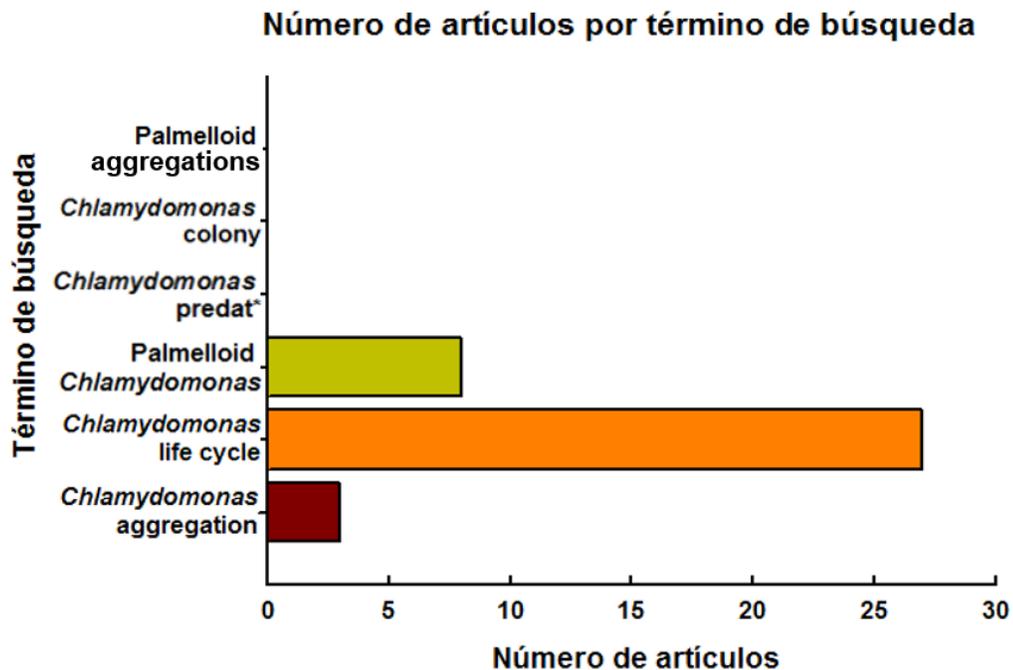


Figura 6. Número de publicaciones de acuerdo con el término de búsqueda en Biological Abstracts del Web Of Science.

A lo largo de 21 años, en el mundo se acumularon 39 artículos sobre el ciclo de vida del género *Chlamydomonas* (Figura 7), así como los factores que inducen cambios en el mismo. Se observa que, para la primera década, el número de aportaciones osciló entre 1 y 3 artículos por año, en comparación con los años 2014 y 2016, donde comenzaron a incrementar las publicaciones sobre los temas antes mencionados, mientras que el año 2020 fue uno de los más importantes para el estudio del género, ya que hubo un total de ocho publicaciones y tres más para el año 2021.

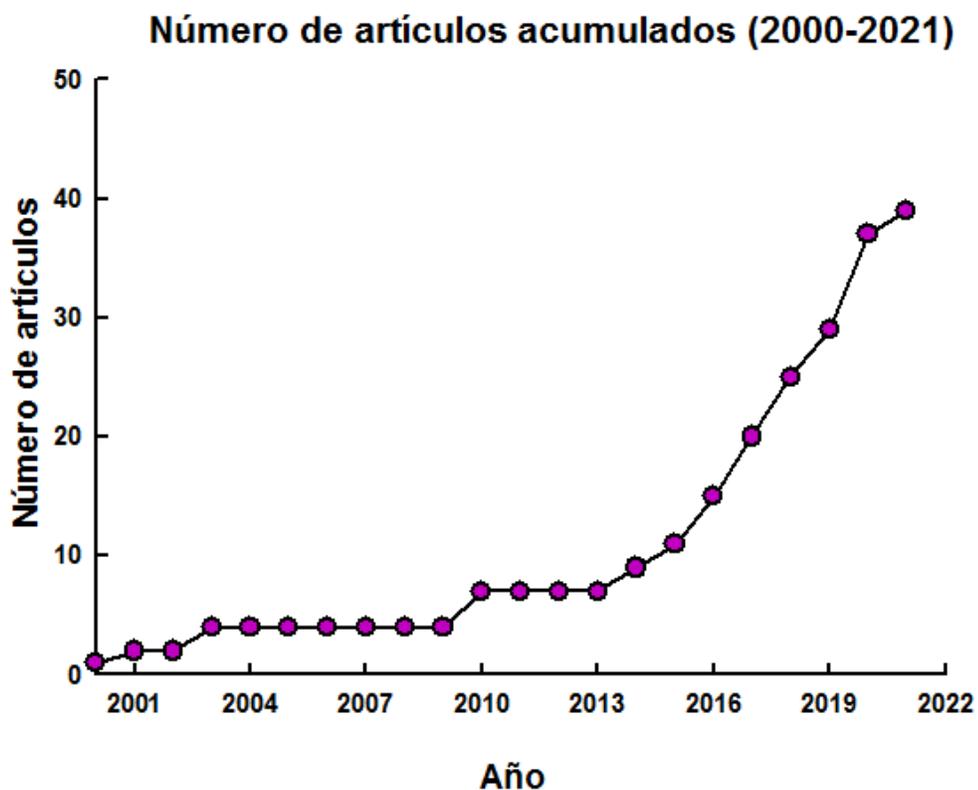


Figura 7. Número de artículos acumulados a lo largo de 21 años que mencionan factores que inducen cambios en el ciclo de vida del género *Chlamydomonas*.

En la Figura 8, observamos que Estados Unidos, Alemania y Japón son los países que encabezan la lista de mayor número de publicaciones a lo largo de 22 años, seguidos por Australia, China y Suiza. A pesar de contar con una o dos publicaciones, el resto de los países presentes en la gráfica cuentan con aportaciones valiosas sobre los cambios en la estructura del género *Chlamydomonas* a causa de diversos factores.

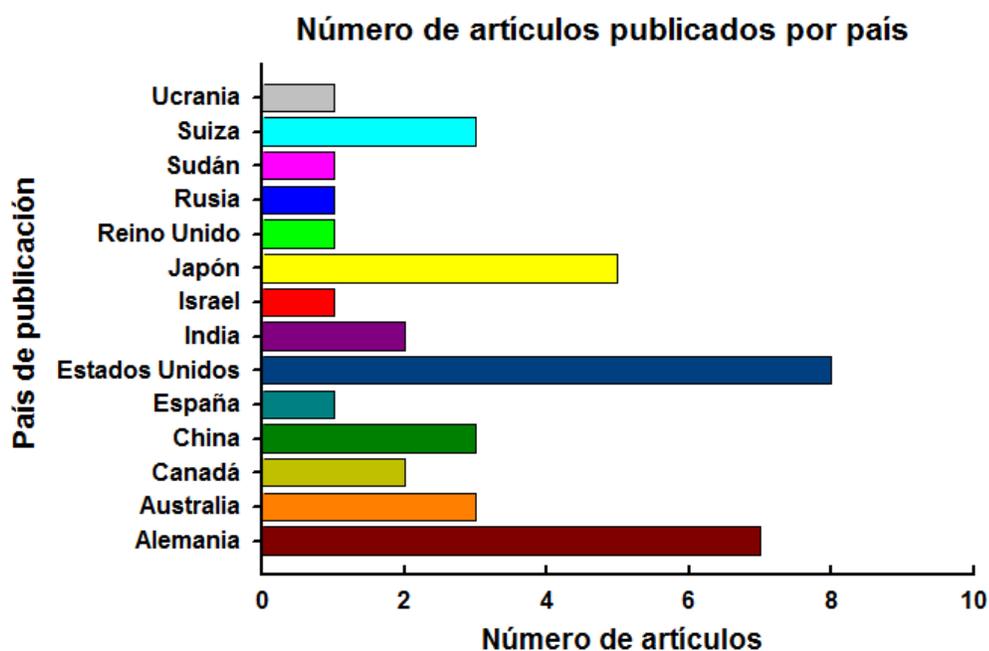


Figura 8. Número de artículos publicados por país que mencionan factores que inducen cambios en el ciclo de vida del género *Chlamydomonas*.

Es muy marcado el uso de la especie *Chlamydomonas reinhardtii* en la mayoría de los estudios encontrados, sin embargo en la Figura 9, se puede apreciar que a pesar de ser una minoría, especies como *C. debaryana*, *C. microsphaera*, *C. nivalis*, *C. smithii* y *C. ucrainica* también son utilizadas en la diversidad de estudios.



Figura 9. Número de artículos publicados que mencionan factores que inducen cambios en el ciclo de vida de distintas especies del género *Chlamydomonas*.

En la Figura 10, se observa que la mayoría de los estudios se relaciona al área de la Ecología, así como la Genética; sin embargo, el área Toxicológica se va abriendo paso en el estudio de las *Chlamydomonas* y las implicaciones de diversos contaminantes en el género. La Biotecnología también ocupa un lugar importante ya que cada vez es más frecuente la producción de biocombustibles a partir de esta alga.

### Número de artículos publicados por área de estudio

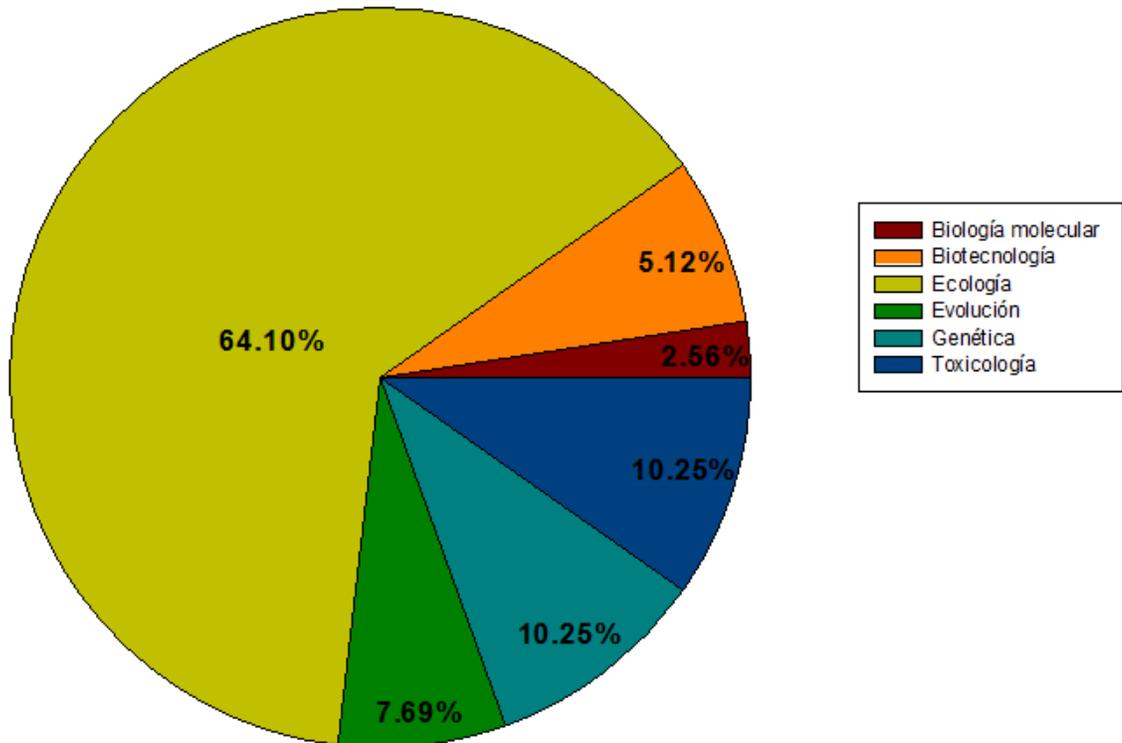


Figura 10. Número de artículos que mencionan factores que inducen cambios en el ciclo de vida del género *Chlamydomonas* publicados por área de estudio.

De acuerdo con lo que se revisó, los factores que tienen mayor efecto sobre la agregación y formación de palmeloides se resumen en la Tabla 1, donde *C. reinhardtii* ha sido una de las especies más usadas en estudios de genética, biotecnología y ecología. Se presentan los factores que inducen cambios en *Chlamydomonas* produciendo estructuras como palmeloides o agregados, entre ellos se presentan metales pesados como el Cd, Cu, HgCl<sub>2</sub> y CdCl<sub>2</sub> plaguicidas (paraquat), surfactantes (ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS)), sales (NaCl), luz y factores bióticos como las bacterias y depredadores (*Paramecium tetraurelia*). Sin embargo, también se observa la presencia de factores novedosos como son los microplásticos de poliestireno y el gel de alginato de Ca<sup>2+</sup> este último con la finalidad de producir mayores concentraciones de triacilglicerol gracias a la formación de palmeloides.

Tabla 1. Resumen de los artículos obtenidos de la base de datos Biological Abstracts con los términos de búsqueda palmeloid *Chlamydomonas*, y *Chlamydomonas* aggregation relacionados a los factores que inducen cambios en distintas especies y cepas de *Chlamydomonas*.

Especie	Resumen	Estructura/Forma	Autor y año
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Observaron la formación de palmeloides de <i>C. reinhardtii</i> en respuesta al estrés de diversos microcontaminantes (Cu, Cd, PFOS y paraquat) durante 72 h. El tamaño y número de colonias palmeloides dependieron de la concentración, así como la duración de la exposición.	Parmeloides	Cheloni, <i>et al.</i> , 2021
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Para conocer los efectos de los microplásticos en el fitoplancton, fue expuesta a cuatro concentraciones de mp, dando como resultado, agregados formados por células de <i>Chlamydomonas</i> y microplásticos.	Agregados/heteroagregados	Shuangxi <i>et al.</i> , 2020
<i>Chlamydomonas microspheara</i>	En medios con fuentes de carbono orgánico limitado, las bacterias heterotróficas inducen agregación para obtener los polisacáridos derivados de las mismas, de esta manera, las bacterias lo usan como fuente de carbono y, además, sirve para facilitar la agregación entre bacteria- <i>Chlamydomonas</i> .	Agregados	Zhao <i>et al.</i> , 2020
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Para comprobar que la fototaxis es un indicador de riesgo ambiental asociado a líquidos iónicos quirales, fue expuesta a una fuente de luz por tiempos variables. Una vez que se cumplió el tiempo de exposición, se observó la formación de agregados.	Agregados	Chen <i>et al.</i> , 2020
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Determinaron la toxicidad de HgCl <sub>2</sub> en tres cepas mutantes con alta resistencia a la luz en un periodo de 24 a 72 h. A las 48 h de exposición, una de las cepas formó palmeloides de 4 a 5 células para reducir el contacto de la superficie con el Hg	Parmeloides	Samadani, <i>et al.</i> , 2020
<i>Chlamydomonas debaryana</i>	Para producir una mayor cantidad de triacilglicerol (TAG) las células se encapsularon en gel de alginato de Calcio para cultivo con alta densidad celular, donde hubo formación de células palmeloides esféricas.	Parmeloides	Yoshitomi, <i>et al.</i> , 2020
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Se sometió al depredador <i>Paramecium tetraurelia</i> y observaron que dos poblaciones desarrollaron estructuras multicelulares. Esto, apoya la hipótesis sobre que la depredación pudo haber sido fundamental en los orígenes de la multicelularidad.	Agregados	Herron <i>et al.</i> , 2019
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> (CC-503 y CC-125)	Para determinar el efecto inhibitorio de crecimiento del Cd <sub>2</sub> , fueron expuestas ante diferentes concentraciones durante 24 a 72 h, esto con la finalidad de demostrar que el cambio en la tasa de crecimiento es un indicador de toxicidad. La primera cepa sufrió necrosis, mientras que la segunda tuvo formación de palmeloides	Parmeloides	Samadani <i>et al.</i> , 2018
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Se estudió la formación de palmeloides en respuesta al estrés inducido por NaCl a y 150 mM. En la palmeloidación hubo acumulación de almidón y lípidos, así como la participación de proteínas de la pared celular para la formación y mantenimiento de esta estructura.	Parmeloides	Khona, <i>et al.</i> , 2016
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Se estudió la adaptación de células de tipo salvaje y clonales ante diversas concentraciones de Be. Bajo exposición aguda, las células sufrieron una muerte masiva, sin embargo, pudieron adaptarse a 33mg/L. Las cepas resistentes se distribuyeron en agregados.	Agregados	Baselga, <i>et al.</i> , 2016
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Se construyó una población mediante mutagénesis aleatoria y esta fue sometida a numerosas rondas de apareamiento y crecimiento en salinidad. Esta línea fue capaz de crecer a700 mM NaCl, mientras que los progenitores, crecieron a 300 mM y la línea asexual a 500 mM.	Parmeloides	Takouridis <i>et al.</i> , 2014

## Discusión

Los estudios de *C. reinhardtii* comenzaron en el año 1833 y en 1960 se presentó un auge en las investigaciones de dicha especie debido a sus características morfológicas y genéticas (Harris, 2009a). La mayoría de los artículos obtenidos en esta búsqueda, estuvieron dirigidos hacia el ciclo de vida, por encima de los términos palmelloid *Chlamydomonas* o *Chlamydomonas* aggregation. Esto puede ser debido a que la mayoría de los autores han realizado estudios sobre la ecología y evolución de estos organismos, así como de su genoma. También se observa que de 2014 a 2021 ha habido un incremento en las publicaciones enfocadas en los factores que inducen la formación de estructuras multicelulares en *Chlamydomonas*, ya que para comprender mejor la funcionalidad de este género es necesario conocer cómo se adapta ante diversas condiciones ambientales (Carpentier *et al.*, 2019).

Es importante señalar que Estados Unidos es uno de los países con más publicaciones acerca de este género, lo cual puede deberse a que hay más de 20 especies enlistadas en el sureste del país gracias a los bancos de algas ubicados en laboratorios como la Universidad de Texas (Nakada & Nozaki, 2014). En contraste con lo anteriormente referido, a pesar de tener listados de especies de *Chlamydomonas* en México, no se encontraron registros en la base de datos sobre artículos que hablen de los factores causantes de cambios en *Chlamydomonas* o sobre su ciclo de vida realizados en el país. Caso contrario con Europa, pues en el año 1895, 15 nuevas especies fueron descritas y para el año 1927, había un total de 146 especies registradas en Europa central (Harris, 2009a). Otro aspecto que es importante resaltar, es que en Alemania, a pesar de tener un gran número de especies descritas, la mayoría de los artículos publicados se enfocan en el estudio de *C. reinhardtii*, al igual que Japón, China y Australia.

Algunas instituciones que se encuentran en estos países, han contribuido en el ámbito biotecnológico, siendo los cinco países más productivos en biotecnología: Estados Unidos de América, China, Alemania, Brasil e India, en estos países sus principales aportaciones se centran en la degradación de insecticidas,

microorganismos que absorben cromo contaminante, así como microalgas y cianobacterias para biorremediación del ambiente a causa del dióxido de carbono emitido por las centrales eléctricas de carbón. Además, se aborda el uso de astaxantinas como colorante alimenticio y un potente antioxidante y por supuesto biocombustibles que han cobrado mayor relevancia debido al proceso de cambio climático (Yeung *et al.* 2019).

Se puede observar una gran inclinación hacia *Chlamydomonas reinhardtii* ya que este organismo se ha destacado por sus estudios en investigaciones básicas, así como en sus aplicaciones biotecnológicas, pero también gracias a la capacidad de crecimiento no fotosintético, además de mencionar que fue uno de los primeros organismos en tener un genoma completamente secuenciado (Harris, 2001; Carpentier *et al.*, 2019; Tran & Kaldenhoff, 2020). Así mismo, algunas cepas de *C. reinhardtii* han sido estudiadas para análisis genéticos y bioquímicos, así como en estudios evolutivos, donde se muestra cómo es que las respuestas ante diversos tipos de estrés han llevado a este organismo a una transición desde la unicelularidad a la multicelularidad (Harris, 2009a; Ratcliff *et al.*, 2013). Otra de las especies mencionadas y muy importantes es *C. nivalis* pues tiene la capacidad de vivir en condiciones de temperaturas extremas cercanas a 0°C, pH ácidos y desecación; son un componente importante de la biosfera global, así como en los ciclos del carbono y el agua (Hoham, 2020). Mientras que la especie *C. ucrainica* no cuenta con estudios a pesar de haber sido descrita en el año 2003, siendo éste el único artículo, pero sin libre acceso al público.

Es importante distinguir la diferencia entre un agregado y un palmeloide, Yoshitomi *et al.*, 2020 mencionan que las colonias palmeloides son múltiples divisiones de células originadas desde una célula en común dentro de una pared celular externa. Mientras que Herron *et al.* (2019), comparte que el término “palmeloide” abarca dos fenómenos diferentes. El primero es una “falla” de las células hijas para escapar de la pared celular materna, lo que resulta en una formación de colonias. La segunda, es la producción de un material gelatinoso que se excreta extracelularmente, lo que resulta en una adhesión entre células y/o colonias. La forma de distinguir a la pared

celular de la matriz extracelular (ME) es mediante microscopía, ya que las paredes bloquean la luz transmitida, por lo que parecen más oscuras que la ME. Sin embargo, lo anterior puede referirse a un agregado, de acuerdo con los conceptos de Carpentier *et al.* (2019).

Los primeros estudios sobre palmeloidación en *Chlamydomonas*, corrieron a cargo de Iwaza & Murakami (1968), donde comprobaron la formación de estas estructuras en presencia de ácidos orgánicos; desde ese entonces, metales pesados, pesticidas, depredadores y agentes como la luz, se han sumado a la lista de estresores que han sido estudiados para conocer las concentraciones y efectos tóxicos que son capaces de tolerar las células de *Chlamydomonas*.

En cuanto a los estudios relacionados con depredadores, Herron y cols. (2019) compartieron que *P. tetraurelia* indujo la formación de agregados en *C. reinhardtii*, lo que apoya la hipótesis sobre que los depredadores fueron un factor importante para el desarrollo de la multicelularidad y esto tiene una razón, pues se sabe que la mayoría de ellos, únicamente pueden consumir presas que se encuentren dentro de un rango de tamaño, pero independientemente de esto, se dice que las células multicelulares de *C. reinhardtii* que evolucionaron a partir de un linaje unicelular, están protegidos de la depredación durante una parte de su ciclo de vida (Kirk, 1998).

Observamos también que hay una presencia de estudios novedosos que han optado por el uso de microplásticos para conocer los efectos que pueden producir en diversos organismos como *Chlamydomonas*, pues estos desechos representan un problema grave gracias al aumento en su fabricación y uso, así como su eliminación y actividades antropogénicas (Horton *et al.*, 2020). En 2010, se vertieron en el océano entre 4,8 y 12,7 millones de toneladas métricas de desechos plásticos y se cree que habrá un gran aumento en la magnitud para 2025. Sin embargo, la presencia de microplásticos no solo se limita a los ambientes marinos ya que también se han encontrado en ecosistemas de agua dulce con abundancias que van desde los 30 a 50 mg/L lo que provoca efectos tóxicos en las microalgas,

además de la inhibición del crecimiento y la reducción en la eficiencia fotosintética (Li *et al.*, 2020).

## **Conclusiones**

*Chlamydomonas* es uno de los géneros más importantes en la investigación gracias a la diversidad de aplicaciones que se le han conferido. A pesar de tener tantos años siendo estudiado, es curioso observar que son pocas las publicaciones que mencionan aquellos factores causantes de la agregación y/o formación de palmeloides de esta alga. A partir de 2014 ya hay una tendencia en el estudio de los factores anteriormente señalados. A pesar de que los términos de búsqueda fueron adecuados, se esperaba un mayor número de resultados. Tal vez sea recomendable realizar una nueva búsqueda a finales del 2021 e inicios del año 2022, ya que notamos que varios estudios comenzaron a ser publicados a partir del 2020 lo que puede ser un indicador de que se está retomando el estudio del género y los factores que producen estas estructuras.

Es necesario unificar los conceptos sobre la formación de estructuras, ya que diversos autores nombran “palmeloides” a lo que debería ser llamado “agregado” puesto que, sin una figura de referencia, podría comprenderse que el número de células es igual o menor a 16 por colonia, lo que puede provocar imprecisiones.

## **Perspectivas**

Debido a los florecimientos de este género en los Lagos de la Cantera Oriente y de acuerdo con la literatura analizada, se propone que se realicen estudios con algunos factores bióticos o abióticos registrados en la Cantera Oriente (Anexo 1), que podrían jugar un papel clave en la formación de agregados en *Chlamydomonas* como son las proporciones de N:P, disponibilidad de potasio, fotoperíodo e intensidad de luz o de depredadores como *Daphnia* del complejo *pulex* o *Brachionus calyciflorus*.

Para el caso de México, es necesario que más instituciones se sumen al estudio de este género no solo para la creación de biocombustibles o biorremediación sino también para conocer aspectos básicos como ciclo de vida, diversidad de especies

o factores potenciales que pueden estar presentes en los lagos del país y esto, con la finalidad de darle un mayor aprovechamiento a *Chlamydomonas*.

### Literatura citada

**Barrera**, B. C. Vázquez, G. Barceló, Q. I. Bussy, A. L. (2008). Microalgal dynamics in Batch reactors for municipal wastewater treatment containing dairy sewage water. *Water Air Soil Pollution*, 190(1), 259-270. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9598-3>.

**Bellido-Pedraza**, C. M. Calatrava, V. Sanz-Luque, E. Tejada-Jiménez, M. Llamas, Á. Plouviez, M. Guieysse, B. Fernández, E. Galván, A. (2020). *Chlamydomonas reinhardtii*, an algal model in the nitrogen cycle. *Plants*, 9(7), 903. <https://doi.org/10.3390/plants9070903>.

**Boyle**, N. R. Morgan, J. A. (2009). Flux balance analysis of primary metabolism in *Chlamydomonas reinhardtii*. *BMC Systems Biology*, 3, 4, <https://doi.org/10.1186/1752-0509-3-4>.

**Buchheim**, M. A. Chapman, R. L. (1991). Phylogeny of the colonial green flagellates: a study of 18S and 26S rRNA sequence data. *BioSystems*, 25(1-2), 85-100. [https://doi.org/10.1016/0303-2647\(91\)90015-d](https://doi.org/10.1016/0303-2647(91)90015-d).

**Burch**, T. A. Adams, W. W. Degrenne, B. L. S. Englert, C. H. Mines, B. R. Nash, P. C. Boone, E. C. Demming-Adamms, B. (2014). Environmental manipulation of growth and energy carrier release from freshwater and marine *Chlamydomonas* species. *Journal of Applied Phycology*, 27, 127-1136. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0433-0>.

**Carpentier**, F. Lemaire, S. D. Danon, A. (2019). When unity is strength: The strategies used by *Chlamydomonas* to survive environmental stresses. *Cells*, 8(11), 1307. <https://doi.org/10.3390/cells8111307>.

**Choix**, F. J. Ramos-Ibarra, J. R. Mondragón-Cortez, P. Lara-González, M. A. Juárez-Carrillo, E. Becerril-Espinosa, A. Ocampo-Alvarez, H. Torres, R. J. (2021). Mixotrophic growth regime as a strategy to develop microalgal

bioprocess from nutritional composition of tequila vinasses. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44(6), 1155-1166. <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02512-y>

**Cortés**, L. E. (2011). El género *Pteromonas* (Chlorophyta, Volvocales) en cuerpos de agua urbanos de la Ciudad de México. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias, UNAM. México, Ciudad de México.

**Demchenko**, E, Mikhailyuk, T., Coleman, A.W. & Proschold, T. (2012). Generic and species concepts in *Microglena* (previously the *Chlamydomonas monadina* group) revised using an integrative approach. *European Journal of Phycology*, 47(3), 64-290.

**Escobar-Briones**, E. Cortez-Aguilar. A. M. García-Ramos, M. Mejía-Ortíz. L. M. Simms-Del Castillo, A. Y. (2002). Structure of a pond community in Central Mexico. *Hydrobiologia*, 467, 133-139. <https://doi.org/10.1023/A:1014977810846>.

**Ettl**, H. (1983). *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Vol 9. Chlorophyta I: Phytomonadina*. Stuttgart, Gustav Fisher Verlag, 807p.

**Fields**, F. J. Lejzerowicz, F. Schroeder, D. Ngoi, S. M. Tran, M. McDonald, D. Jiang, L. Chang, J. T. Knight, R. Mayfield, S. (2020). Effects of the microalgae *Chlamydomonas* on gastrointestinal health. *Journal of Functional Foods*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103738>.

**Guiry**, M.D, Guiry, M.D. (2021). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Obtenido el 12 de abril de 2021 de <http://www.algaebase.org>.

**Harris**, H. E. (2001). *Chlamydomonas* as a model organism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 52, 363-406. <https://10.1146/annurev.arplant.52.1.363>.

- Harris, H. E.** (2009a). "The genus *Chlamydomonas*" En: E. Harris, D. Stern (Ed.) *The Chlamydomonas Sourcebook* (pp. 1-24). Elsevier. San Diego, Estados Unidos.
- Harris, H., E.** (2009b). "Cell Architecture" En: E. Harris, D. Stern (Ed.) *The Chlamydomonas Sourcebook* (pp. 25-64). Elsevier. San Diego, Estados Unidos.
- Harris, H., E.** (2009c). "The sexual cycle" En: E. Harris, D. Stern (Ed.) *The Chlamydomonas Sourcebook* (pp. 119-157). Elsevier. San Diego, Estados Unidos.
- Herron, M. D. Borin, J. M. Boswell, J. C. Walker, J. Chen, I. K. Boyd, M. Rosenzweig, F. Ratcliff, W. C.** (2019). *De novo*, origins of multicellularity in response to predation. *Scientific Reports*, 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39558-8>.
- Hirooka, S. Hirose, Y. Kanasaki, Y. Higuchi, S. Fujiwara, T. Onuma, R. Era, A. Ohbayashi, R. Uzuka, A. Nozaki, H. Yoshikawa, H. Miyagishima, S.** (2017). Acidophilic green algal genome provides insights into adaptation to an acidic environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(39), E8304-E8313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707072114>.
- Hoham, R. W.** (2020). Snow and glacial algae: A review. *Journal of Phycology*. 56(2), 264-282. <https://doi.org/10.1111/jpy.12952>.
- Horton, A. A. Barnes, D. K. A.** (2020). Microplastic pollution in a rapidly changing world: Implications for remote and vulnerable marine ecosystems. *Science of the Total Environment*, 738, 140349 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140349>.
- Isaís, L. N. M.** (2019). Diversidad de especies del género *Chlamydomonas* de la Cantera Oriente y evaluación de su crecimiento bajo diferentes condiciones de cultivo. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias, UNAM. México, Ciudad de México.

- Iwaza**, K. Murakami, S. (1968). Palmelloid formation of *Chlamydomonas* I. Palmelloid induction by organic acids. *Physiologia Plantarum*, 21, 1224-1233.
- Jones**, R. I. (1988). Vertical distribution and diel migration of flagellated phytoplankton in a small humic lake. *Hydrobiologia*. 161(1), 75-87. <https://doi.org/10.1007/BF00044102>.
- Khona**, D. K. Shirolikar, S. M. Gawde, K. K. Hom, E. Deodhar, M. A. D' Souza, J. S. (2016). Characterization of salt stress-induced palmelloids in the green alga, *Chlamydomonas reinhardtii*. *Algal Research*, 16: 434-448. <http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2016.03.035>.
- Kirk**, L. D. (1998). Volvox: Molecular-Genetic origins of multicellularity and cellular differentiation. *European Journal of Phycology*, 33(3), 275-280.
- Lee**, J. J. McEnery, M. E. Kahn, E. G. Schuster, F. L. (1979). Symbiosis and the evolution of larger foraminifera. *Micropaleontology*, (25)2, 118-140.
- Li, S.** Wang, P. Zhang, C. Zhou, X. Yin, Z. Hu, T. Hu, D. Liu, C. Zhu, L. Influence of polystyrene microplastics on the growth, photosynthetic efficiency and aggregation of freshwater microalgae *Chlamydomonas reinhardtii*. *Science of the Total Environment*, 714, 136767. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136767>.
- Lürling**, M. Beekman, W. (2006). Palmelloids formation in *Chlamydomonas reinhardtii*: defence against rotifer predators? *Limnology Journal*, 42(2), 65-72. <https://doi.org/10.1051/limn/2006010>.
- Nakada**, T Nozaki, H. (2014). "Flagellated green algae" En: J. D. Wehr, R. G. Sheath y J. P. Kociolek. (Eds.) *Freshwater Algae of North America: Ecology and classification* (pp. 265-313). Elsevier. San Diego, Estados Unidos.
- Nickelsen**, J. Kück, U. (2000). The unicellular green alga *Chlamydomonas reinhardtii* as an experimental system to study chloroplast RNA metabolism. *Naturwissenschaften*, 87(3), 97-107. <https://doi.org/10.1007/s001140050686>.

- Niño**, G. J. A. (2013). Análisis de los flujos metabólicos de *Chlamydomonas reinhardtii* para su aplicación en la producción de biocombustibles. (Tesis de maestría). Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. IPN. México. Ciudad de México.
- Ortega**, M. M. (1984). Catálogo de algas continentales recientes de México. Instituto de Biología. UNAM, México, Ciudad de México.
- Pan**, J. M. Snell, W. J. (2000). Signal transduction during fertilization in the unicellular green alga, *Chlamydomonas*. *Current Opinion in Microbiology*, 3, 596-602. [https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(00\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S1369-5274(00)00146-6).
- Peers**, G. Krishna, K. N. (2008). Pond scum genomics: the genome of *Chlamydomonas* and *Ostreococcus*. *The Plant Cell*, 20(3), 502-507. <https://doi.org/10.1105/tpc.107.056556>.
- Peralta**, S. L. Lugo, V. A. Godínez, O. J. L. Sánchez, R. M. R. Escobar, O. M. A. (2016). Florecimiento de *Chlamydomonas* cf. *reinhardtii* (Chlamydomonadales) en un lago urbano del sur de la Ciudad de México. [Figura]. s.r. Feria de las ciencias. Ciudad Universitaria, UNAM,
- Ponce**, M. M. E. Ramírez, R. R. Vázquez, M. R. (2019). Algas de la Cantera Oriente, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Guía de campo y laboratorio. UNAM. Ciudad de México.
- Pröschold**, T. Marin, B. Schlösser, U. G. Melkonian, M. (2001). Molecular phylogeny and taxonomic revision of *Chlamydomonas* (Chlorophyta). I. Emendation of *Chlamydomonas Ehrenberg* and *Chloromonas Gobi*, and description of *Oogamochlamys* gen. nov. and *Lobochlamys* gen. nov. *Protist*, 152, 265-300. <https://doi.org/10.1078/1434-4610-00068>.
- Ratcliff**, W C. Herron, D. M. Howell, K. Pentz, J. T. Rosenzweig, F. Travisano, M. (2013). Experimental evolution of an alternating uni- and multicellular life cycle in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Nature Communications*. 4, 2742. <https://doi.org/10.1038/ncomms3742>.

- Remias**, D. Lütz-Meindl, U. Lütz, C. (2006). Photosynthesis, pigments and ultrastructure of the alpine snow alga *Chlamydomonas nivalis*. *European Journal of Phycology*, 40(3), 259-268. <https://doi.org/10.1080/09670260500202148>.
- Renaud**, S. M. Parry, D. L. Thinh, V. L. (1994). Microalgae for use in tropical aquaculture I: Gross chemical and fatty acid composition of twelve species of microalgae from the Northern Territory, Australia. *Journal of Applied Phycology*, 6, 337-345. <https://doi.org/10.1007/BF02181948>.
- Sasso**, S. Stibor, H. Mittag, M. Grossman, A. R. (2018). From molecular manipulation of domesticated *Chlamydomonas reinhardtii* to survival in nature. *eLife*, 7, e39233. <https://doi.org/10.7554/eLife.39233>.
- Sathe**, S. Durand, P. M. (2016). Cellular aggregation in *Chlamydomonas* (Chlorophyceae) is chimaeric and depends on traits like cell size and motility. *European Journal of Phycology*, 51, 129-138. <https://doi.org/10.1080/09670262.2015.1107759>.
- Scranton**, M. A. Ostrand, J. T. Fields, F. J. Mayfield, S. P. (2015). *Chlamydomonas* as a model for biofuels and bio-products production. *The Plant Journal: for cell and molecular biology*, 82(3), 523-531. <https://doi.org/10.1111/tpj.12780>.
- Tran**, N. T. Kaldenhoff, R. (2020). Achievements and challenges of genetic engineering of the model green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Algal Research*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101986>.
- Yeung**, A. W. K. Tzvetkov, N. Gupta, V. K. Gupta, S. Orive, G. *et al.* (2019). Current research in biotechnology: Exploring the biotech forefront. *Current Research in Biotechnology*, 1, 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2019.08.003>.
- Yoshitomi**, T. Kaminaga, S. Sato, N. Toyoshima, M. Moriyama, T. Yoshimoto K. (2019). Formation of spherical palmelloid colony with enhanced lipid accumulation by gel encapsulation of *Chlamydomonas debaryana* NIES-2212. *Plant and Cell Physiology*. 61(1), 158-168. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcz188>.

## Anexo 1

En el laboratorio de Limnología Tropical se encuentra aislada *Chlamydomonas globosa*, proveniente del Lago Norte de la Cantera Oriente de la REPSA de la UNAM, por lo que se pretende someter a este organismo a factores bióticos para conocer la respuesta que tiene ante ellos. A continuación, se muestra un modelo modificado de Lürling, (2016) que se propone seguir (Figura 11). Este tendrá dos grupos testigo y dos tratamientos con cuatro réplicas donde se expondrá una misma concentración de *C. globosa* ante individuos de *D. obtusa* en condiciones de luz y oscuridad.

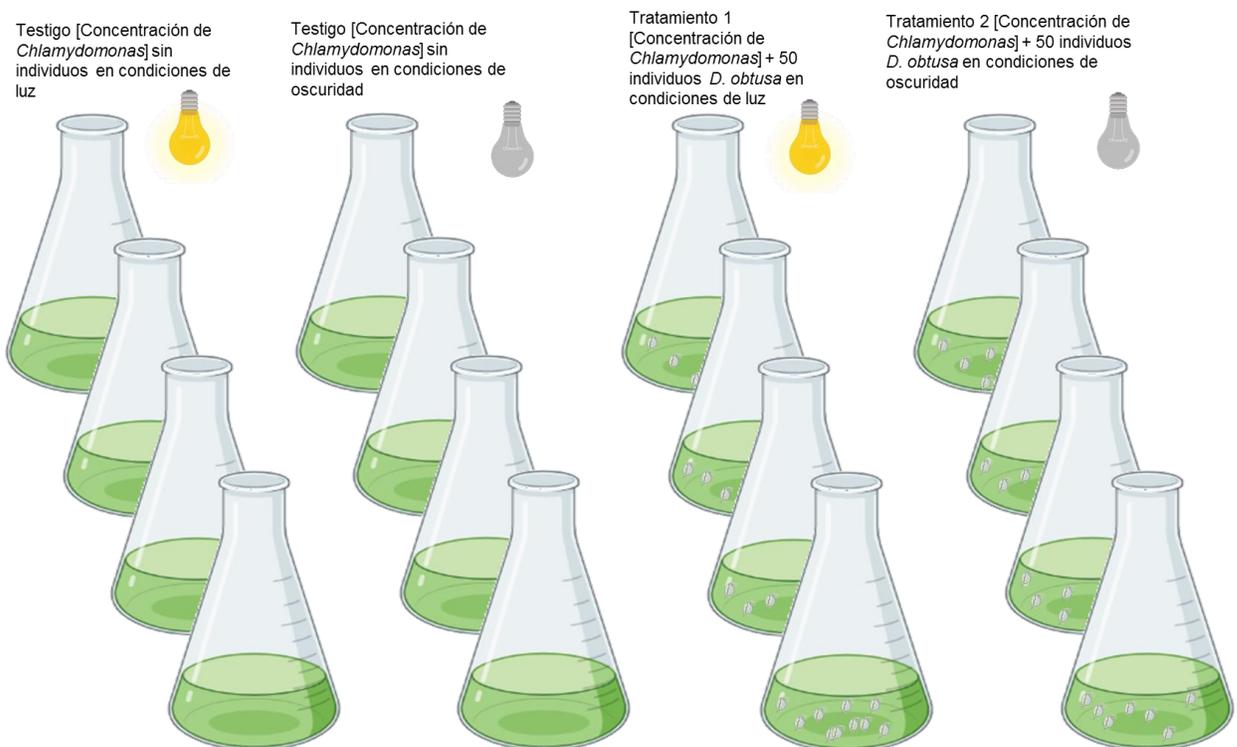


Figura 11. Propuesta de modelo experimental. Concentraciones definidas de *Chlamydomonas globosa* en interacción con distintas cantidades de individuos de *Daphnia obtusa* en condiciones de luz/oscuridad.