



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**Efecto del surfactante aniónico dodecil sulfato de sodio sobre la
dinámica poblacional de *Brachionus havanaensis* y *Plationus
patulus* (Rotifera: Brachionidae)**

TESIS

Que para optar por el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA

Biol. Andrea González Ávila

Tutor principal:

Dr. Singaraju Sri Subrahmanya Sarma

Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM

Comité tutor:

Dr. Marcelo Silva Briano

Universidad Autónoma de Aguascalientes

Dr. Pedro Ramírez García

Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM

Dra. Patricia Bonilla Lemus

Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM

Dr. José Luis Gómez Márquez

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM

Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México. Noviembre, 2022



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.



POSGRADO EN
CIENCIAS DEL MAR Y
LIMNOLOGÍA

**Efecto del surfactante aniónico dodecil sulfato de sodio sobre la
dinámica poblacional de *Brachionus havanaensis* y *Plationus
patulus* (Rotifera: Brachionidae)**

TESIS

Que para optar por el grado académico de:

MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA

Biol. Andrea González Ávila

Tutor principal:

Dr. Singaraju Sri Subrahmanya Sarma

Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM

Comité tutor:

Dr. Marcelo Silva Briano

Universidad Autónoma de Aguascalientes

Dr. Pedro Ramírez García

Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM

Dra. Patricia Bonilla Lemus

Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM

Dr. José Luis Gómez Márquez

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM

Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México. Noviembre, 2022

Dedicatoria:

A mi madre Teresa Ávila Hernández, la persona que me dio la vida, me vio crecer, me ha dado todo su amor, me ha apoyado y comprendido. Te amo con todo mi corazón y espero que estés orgullosa de mí, porque soy el reflejo de tu excelente trabajo como madre.

A mi padre Andrés González de Aquino, te amo papá, siempre he tomado las buenas cualidades de ti como trabajar arduamente y nunca rendirme. Gracias por todo y recuerda que hay más vida para ti con nosotros tu familia.

A mi abuelita Alicia. Te amo abuelita gracias por estar siempre para mí, por el amor y apoyo que me das y para consentirme siempre que estoy contigo. Admiro como has luchado contra la vida y aun así has logrado salir adelante.

Al amor de mi vida Daniel Pérez Ortiz, te amo con todo mi ser, has sido la persona más importante para mí durante estos dos años de maestría porque me viste pasar por situaciones tanto buenas como malas y pese a ello seguiste apoyándome y procurándome para no rendirme, para no rendirnos. Juntos lograremos cosas maravillosas Dany. Te amo.

Gracias infinitas a Dios y a la vida por este momento.

Agradecimientos Institucionales:

Al **Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología** por ayudar a que los alumnos de maestría y doctorado adquieran nuevos y preciados conocimientos con académicos de excelencia y un comité extraordinario. Gracias por permitirme estudiar un posgrado en este prestigioso instituto y poder llevar a cabo este proyecto de investigación que ha impactado positivamente en mi formación.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, mi *alma mater* por abrirme las puertas desde el bachillerato a través del **Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Naucalpan** y **Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur**.

A la **Facultad de Estudios Superiores Iztacala** y a la **Carrera de Biología** por darme los recursos necesarios y un espacio donde realizar mi proyecto de maestría en el **Laboratorio de Zoología Acuática**.

Al **Dr. Singaraju Sri Subrahmanya Sarma** por su apoyo durante la pandemia, sin su guía yo no podría haber avanzado como lo hice; así que gracias infinitas por dirigirme y por aportarme tan valioso conocimiento sobre ecotoxicología. Lo admiro. Espero que a través del tiempo siga formando a muchos jóvenes en las áreas de la limnología y siga transmitiendo su valioso conocimiento.

Al **Dr. Marcelo Silva Briano** gracias por su valioso conocimiento y sus sugerencias en la parte de morfometría geométrica. Le aseguro que seguiré sus recomendaciones cinematográficas y de series.

Al **Dr. Pedro Ramírez García** gracias por sus correcciones que me han servido desde la licenciatura, siempre han sido muy acertadas, le agradezco por la atención al escrito y a la presentación en cada tutorial.

A la **Dra. Patricia Bonilla** Lemus gracias por la atención en los tutorales y por hacerme ver que siempre puedo complementar mis respuestas más allá de lo obvio.

Al **Dr. José Luis Gómez Márquez** muchas gracias por la atención en el tutorial y sus sugerencias de la parte estadística, sin su visión este trabajo no hubiera quedado tan completo.

A la **Dra. Nandini Sarma** por permitirme usar las instalaciones de su laboratorio al igual que el material. Gracias sus enseñanzas y reflexiones y por apoyarnos (a sus alumnos) durante esta dura etapa de pandemia.

Agradezco al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca de maestría (813216).

Agradecimientos Personales:

Gracias nuevamente a mis padres por ser el pilar más importante en mi vida, sin ustedes todo esto no sería posible.

A mi familia: mis hermanas Karen y Kenia, mi abuelo q. e. p. d., mi abuelita Alicia, mis tíos Claudia, Eugenia y Miguel Ángel, Sergio y Armando, mi primo Gael y mi sobrina Nelly. A mi otra familia: Tere, Ángel, Emma, Jesús y Lupita. Todos han sido parte esencial de mi vida y me han mostrado su apoyo de una u otra forma e incluso mis mascotas han estado conmigo.

A mis amigos de la carrera: Melissa, Sandra y Jesús. Amigos ustedes saben que los amo con todo mi corazón quiero vivir más momentos hermosos con ustedes <3.

A mi wera Karina, que, aunque estés lejos siempre está en mi corazón porque has sido una hermosa y especial amiga, espero vernos pronto.

A mis compañeros de laboratorio: **en especial** a la **Dra. Michelle** y el **Dr. Toño** por su apoyo en el diseño experimental y resultados de morfometría, ustedes llegarán muy muy lejos como investigadores. A la **M. en C. Nayeli** por su guía con el tema de tasa de mortalidad y prueba de LogRank, pronto serás toda una doctora. Al **M. en C. Tony**, Carlitos, Salmita, Sergio, Alejandro, César, Rosita, Mayrita, Meetzli, Lety, Sara, Ron, José Luis, Noemi, Denisse y Mafer por los buenos momentos en el lab, los conocimientos que me aportaron y algunos otros que creamos juntos.

A Haide Saldaña Esquivel por su ayuda relacionada con el alimento de los experimentos.

A mis amiguitos del inglés: Sarahi, Paul, Monse, Estivalis, María Ana, Lalito. Me encanta cuando nos vemos y ojalá sigan ocurriendo esas salidas bonitas.

Estrella sigues aquí para mí, ya no tan constante quizás, pero sigues siendo una gran amiga desde la secundaria y también espero que permanezcas en mi vida por mucho más tiempo.

Ismael sigues insistiendo en vernos de vez en cuando, gracias por seguir siendo mi amigo desde el club de tenis donde compartimos gratos momentos, te quiero.

Dany, eres el amor de mi vida, eres el mejor compañero de vida que pude escoger porque siempre estás ahí para levantarme y darme ánimo. Gracias por enfrentar la vida conmigo, te aseguro que terminaremos el año maravillosamente. Nos hemos superado juntos y lo seguiremos haciendo. Te amo demasiado.

Gracias a Dios y a la vida.

Índice

1. Resumen	1
2. Abstract	2
3. Introducción	3
3.1. Industria Química y surfactantes	3
3.2. Clasificación y propiedades	4
3.3. Forma de acción	6
3.4. Aplicaciones	8
3.5. Dodecil sulfato de sodio	9
3.6. Contaminación en cuerpos de agua	10
3.7. Efecto en organismos acuáticos	12
4. Antecedentes	14
5. Justificación	16
6. Hipótesis	18
7. Objetivos	19
7.1 Objetivo general	19
7.2 Objetivos particulares	19
8. Materiales y métodos	20
8.1. Aislamiento y cultivo de organismos	20
8.2. Adquisición del surfactante	21
8.3. Bioensayo agudo	22
8.4. Bioensayo crónico	23
8.4.1. Crecimiento poblacional	23
8.4.2. Morfometría lineal y geométrica	24
8.4.3. Tabla de vida	25
8.4.4. Análisis estadístico	27
9. Resultados	29
9.1. Concentración letal media	29
9.2. Crecimiento poblacional	30
9.3. Relación huevo-hembra	35

9.4. Morfometría lineal	37
9.5. Morfometría geométrica	40
9.6. Tabla de vida	44
10. Discusión	51
11. Conclusiones	59
12. Literatura citada	60

Índice de figuras

Figura 1. Estructura general de un surfactante, se observa la cadena de hidrocarburo y la estructura hidrófila.	4
Figura 2. Clasificación de surfactantes de acuerdo con la carga que posee la cabeza hidrofílica.	5
Figura 3. Estructura de una micela. Se observa la forma monomolecular y la agrupación de monómeros que da origen a la forma micelar.	7
Figura 4. Estructuras formadas por asociación de surfactantes.	7
Figura 5. Estructura química del dodecil sulfato de sodio.	9
Figura 6. Mapa. Ubicación del Canal de Cuemanco (Ciudad de México, Xochimilco).	20
Figura 7. Rotíferos utilizados durante la experimentación. A) <i>Brachionus havanaensis</i> , B) <i>Platyonus patulus</i> .	21
Figura 8. Alga <i>Chlorella vulgaris</i> .	21
Figura 9. Surfactante aniónico dodecil sulfato de sodio. Vista lateral izquierda y derecha.	22
Figura 10. Medición de largo (azul) y ancho (rojo) de los rotíferos A) <i>Brachionus havanaensis</i> y B) <i>Platyonus patulus</i> . Vista dorsal.	25
Figura 11. Colocación de los landmarks en A) <i>Brachionus havanaensis</i> y B) <i>Platyonus patulus</i> . Vista dorsal.	25
Figura 12. Concentración letal media. Se observa la tendencia, el valor obtenido de la CL ₅₀ (línea punteada) y se presenta el valor del límite superior e inferior para cada especie de rotífero.	29
Figura 13. Curvas de crecimiento poblacional de los rotíferos <i>B. havanaensis</i> y <i>P. patulus</i> expuestos al surfactante dodecil sulfato de sodio. Los valores indican el promedio ± el error estándar de cuatro repeticiones. Los controles presentan la ecuación que describe el crecimiento logístico y el valor de K (capacidad de carga).	31
Figura 14. Tasa intrínseca de incremento poblacional de los rotíferos <i>B. havanaensis</i> y <i>P. patulus</i> expuestos a diferentes concentraciones de tensoactivo. Los valores muestran el promedio de cuatro repeticiones con su error estándar y las letras las diferencias entre los tratamientos a través del análisis <i>post hoc</i> de Tukey.	32
Figura 15. Día de abundancia máxima de los rotíferos <i>B. havanaensis</i> y <i>P. patulus</i> expuestos a diferentes concentraciones de surfactante. Los valores muestran el promedio de cuatro repeticiones con su error estándar y las letras las diferencias entre los tratamientos a través del análisis <i>post hoc</i> de Tukey.	33

- Figura 16.** Densidad poblacional máxima de los rotíferos *B. havanaensis* y *P. patulus* expuestos a diferentes concentraciones de tensioactivo. Los valores muestran el promedio de cuatro repeticiones con su error estándar y las letras las diferencias entre los tratamientos a través del análisis *post hoc* de Tukey. 34
- Figura 17.** Relación huevo/hembra de *Brachionus havanaensis* y *Platinius patulus*. 36
- Figura 18.** Gradillas de deformación del análisis de variables canónicas de *B. havanaensis*. Se muestra el cambio en la forma del individuo. Los círculos indican la forma promedio y las flechas indican el sentido y la magnitud de los cambios en la posición relativa de los landmarks. 41
- Figura 19.** Gradillas de deformación del análisis de variables canónicas de *P. patulus*. Se muestra el cambio en la forma del individuo. Los círculos indican la forma promedio y las flechas indican el sentido y la magnitud de los cambios en la posición relativa de los landmarks. 42
- Figura 20.** Morfología de *Brachionus havanaensis*. A1) Control, A2) Expuesto a 5 mg/L y A3) Expuesto a 10 mg/L. Morfología de *Platinius patulus*. B1) Control, B2) Expuesto a 10 mg/L. 43
- Figura 21.** Curvas de supervivencia (lx) de las dos especies de brachiópidos expuestos a diferentes concentraciones del dodecil sulfato de sodio. Los valores indican el promedio \pm el error estándar de cuatro repeticiones (línea negra). La línea roja es la proyección de los datos utilizando la ecuación del modelo. 45
- Figura 22.** Curvas de fecundidad (mx) de las dos especies de rotíferos expuestos al surfactante. Los valores indican el promedio \pm el error estándar de cuatro repeticiones. 46
- Figura 23.** Parámetros de tabla de vida de *Brachionus havanaensis* expuesto a distintas concentraciones del surfactante dodecil sulfato de sodio. Los valores muestran el promedio de cuatro repeticiones con su error estándar y las letras las diferencias entre tratamiento a través del análisis *post hoc* de Tukey. 48
- Figura 24.** Parámetros de tabla de vida de *Platinius patulus* expuesto a distintas concentraciones del dodecil sulfato de sodio. Los valores muestran el promedio de cuatro repeticiones con su error estándar y las letras las diferencias entre tratamiento a través del análisis *post hoc* de Tukey. 49

Índice de tablas

Tabla 1. Variables de crecimiento poblacional de ambas especies de rotíferos expuestas a diferentes concentraciones de dodecil sulfato de sodio. Se muestra el error correspondiente para cada tratamiento. Las letras distintas indican las diferencias significativas ($p < 0.05$) mientras que las letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0.05$). 35

Tabla 2. Diferencias en las mediciones de largo, ancho y morfometría geométrica de los tratamientos de DSS sobre *B. havanaensis* y *P. patulus*. Las letras distintas indican las diferencias significativas ($p < 0.05$, $p < 0.01$) mientras que las letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0.05$, $p > 0.01$). s/d= sin datos disponibles. 38

Tabla 3. Análisis de varianza de una vía sobre las mediciones de largo y ancho de las especies *B. havanaensis* y *P. patulus* que estuvieron expuestas al surfactante. GL = grados de libertad, SS= suma de cuadrados, MS= media de cuadrados, F, P. 38

Tabla 4. Valores de la regresión lineal de *B. havanaensis* y *P. patulus* comparando largo contra ancho de los individuos. Se muestran los valores de una curva $y = ax + b$ por tratamiento y por réplica. Se presenta adicionalmente el valor de correlación de las variables. Los asteriscos (*) indican la significancia de cada modelo. 39

Tabla 5. Variables de historia de vida de los rotíferos *B. havanaensis* y *P. patulus* expuestos a concentraciones subletales de DSS. Se denota el error correspondiente para cada tratamiento. Las letras distintas indican las diferencias significativas ($p < 0.05$) mientras que las letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0.05$). PV= promedio de vida, ex= esperanza de vida, TRB= tasa de reproducción bruta, TRN= tasa de reproducción neta, TG= tiempo generacional y r= tasa intrínseca de crecimiento poblacional. 50

1. Resumen

El incremento de la población humana va en aumento, lo cual genera que diversos compuestos lleguen a diferentes ambientes como el aire, el suelo y el agua. Una de las industrias más importantes de todos los tiempos es la industria química ya que genera múltiples insumos para otras industrias y cuenta con una gran variedad de productos comerciales. Sin embargo, esta industria también produce muchos compuestos que, al carecer de regulación y ser de uso amplio por hogares y compañías nacionales e internacionales terminan en cuerpos de agua superficiales. Las vías de ingreso pueden considerarse directas e indirectas y son constantemente introducidas al ambiente (o al agua) por lo que tienen contacto con organismos acuáticos. En esta investigación nos enfocamos al dodecil sulfato de sodio (DSS o por sus siglas en inglés SDS) el cual es un surfactante de tipo aniónico muy utilizado en formulaciones de detergentes, pinturas, cosméticos, entre otros. En distintos países, el límite permitido de esta sustancia es por debajo de 1 mg/L, sin embargo, se ha detectado a mayores concentraciones en cuerpos de agua de distintos países ya que la regulación en muchos de ellos no es llevada a cabo adecuadamente. Por otro lado, la literatura nos indica que en ensayos agudos como en la concentración letal media las concentraciones de surfactantes suelen estar por encima de 1 mg/L y usualmente por debajo de los 100 mg/L, pero los ensayos de toxicidad crónica llámense crecimiento poblacional o tabla de vida utilizan concentraciones de varios órdenes más bajos y en muchas de ellas se observan alteraciones en la fecundidad, fertilidad, supervivencia o etiología de sobre cladóceros, alevines y rotíferos, con concentraciones por debajo de 1 mg/L. Los rotíferos se han utilizado poco o muy poco en estudios de ecotoxicología relacionados con surfactantes aniónicos pese a que muestran características muy positivas como su corto ciclo de vida, altas tasas de reproducción, reproducción partenogenética, fácil cultivo y sobre todo su sensibilidad. En este trabajo se realizaron ensayos agudos y crónicos, así como análisis de morfología y morfometría para abarcar los aspectos a nivel individual y de población. Aplicar los ensayos ecotoxicológicos utilizando dodecil sulfato de sodio sobre las especies *Brachionus havanaensis* y *Platonus patulus* puede brindar información de lo que puede ocurrirle a estas y otras especies de los cuerpos de agua mexicanos.

2. Abstract

The increase in human population is on the rise, which generates that various compounds reach different environments such as air, soil, and water. One of the most important industries of all times is the chemical industry since it generates multiple inputs for other industries and has a wide variety of commercial products. However, this industry also produces many compounds that, lacking regulation and being widely used by households and national and international companies, end up in surface water bodies. The pathways of entry can be considered direct and indirect and are constantly introduced into the environment (or water) and therefore come into contact with aquatic organisms. In this research we focus on sodium dodecyl sulphate (SDS or for its acronym in Spanish DDS) which is an anionic surfactant widely used in detergent formulations, paints, cosmetics, among others. In different countries, the permitted limit for this substance is below 1 mg/L, however, it has been detected at higher concentrations in water bodies in different countries since the regulation in many of them is not adequately carried out. On the other hand, the literature indicates that in acute tests such as the mean lethal concentration, surfactant concentrations are usually above 1 mg/L and usually below 100 mg/L, but chronic toxicity tests such as population growth or life table use concentrations of several orders lower and in many of them alterations are observed in the fecundity, fertility, survival or etiology of cladocerans, fry and rotifers, with concentrations below 1 mg/L. Rotifers have been little or very little used in ecotoxicology studies related to anionic surfactants despite the fact that they show very positive characteristics such as their short life cycle, high reproduction rates, parthenogenetic reproduction, easy culture and, above all, their sensitivity. In this work, acute and chronic assays as well as morphology and morphometry analyses were performed to cover individual and population level aspects. Applying ecotoxicological tests using sodium dodecyl sulphate on *Brachionus havanaensis* and *Platyonus patulus* species can provide information on what can happen to these and other species in Mexican water bodies.

3. Introducción

3.1. Industria química y surfactantes

Actualmente existen muchas industrias alrededor del mundo creadas para satisfacer las necesidades humanas, las cuales son de alta demanda como la agricultura, alimentos, comercio, construcción, transporte, turismo, mecánica, eléctrica, textil y química. Esta última produce insumos básicos e intermedios para muchas otras industrias y se generan productos que se integran al mercado como consumo final (Villavicencio, 2009). La industria química en México se encarga de la fabricación de productos químicos básicos como resinas, hules sintéticos, fibras químicas, fertilizantes, pesticidas, agroquímicas, adhesivos, detergentes, jabones y limpiadores, etc. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el año 2013 reportó una producción bruta total del 5.7% dentro del sector manufacturero donde la fabricación de jabones, limpiadores y preparaciones de tocador generó el mayor monto. La productividad generada por la industria química fue mayor respecto a las industrias manufactureras y respecto al total nacional siendo superior a los 655 mil pesos (INEGI, 2014). Asimismo, se informó que el mayor número de unidades económicas de la Industria química se concentró en el Estado de México (17.0%), Ciudad de México (11.8%) y Jalisco (10.7%) mientras que las entidades restantes sumaban en total 60.5% (INEGI, 2014).

Un grupo de compuestos relevantes en la industria química son los surfactantes o también denominados tensoactivos, los cuales son un diverso grupo de productos químicos que consta de un grupo de cabeza polar soluble en agua y un grupo de cola de hidrocarburo no polar, que no es soluble en agua (Ying, 2006). En México y el mundo son compuestos de alta demanda ya que se encuentran en una gran cantidad de productos que utilizan diariamente los hogares y las distintas industrias que existen. La razón de su persistente uso es que tienen una buena solubilidad y excelentes propiedades de limpieza; su uso desmedido ocasiona a la vez, que la mayoría terminen en compartimentos ambientales como suelo, sedimentos y agua (Ivanović y Hrenović, 2009). Se estima que su consumo a nivel mundial es de aproximadamente 12.5 millones de toneladas anuales (Edser, 2006) y los mayores productores son Asia con el 45%, Europa con el 28% y América con

el 22% (Ramírez-Duarte *et al.*, 2005). De la producción total de surfactantes en el mundo un aproximado del 20% es de origen vegetal u oleoquímico (Álvarez, 2004; Rondel *et al.*, 2009) y el resto es de origen petroquímico, los cuales representan la mayoría en el mercado actual (Pinheiro y Faustino, 2017).

Los surfactantes o agentes tensioactivos (Figura 1) son definidos como moléculas anfifílicas o anfipáticas que consisten en una porción de hidrocarburo no polar que está unido a una porción polar o iónica (hidrófila) (Tadros, 2014). Los surfactantes reducen la tensión y debido a esta propiedad las moléculas se ubican en la interfase de fluidos como los sistemas aceite-agua y aire-agua (Stoyanov *et al.*, 2003). Fenómenos intersticiales superficiales como la emulsificación, solubilización, dispersión, detergencia, adherencia y adsorción son propiedades de los surfactantes y es la razón por la cual se utiliza en diversos sectores industriales como por ejemplo jabones, detergentes, cuidado personal, farmacéuticos, agricultura, plásticos, minería, explotación petrolera y pinturas (Álvarez, 2004).



Figura 1.- Estructura general de un surfactante, se observa la cadena de hidrocarburo y la estructura hidrófila.

3.2. Clasificación y propiedades

Los surfactantes (Figura 2) se clasifican en no iónicos, aniónicos, catiónicos o anfotéricos por la presencia o ausencia de grupos de cabeza hidrófilos cargados formalmente (Cowan-Ellsberry *et al.*, 2013). Empleando las palabras del autor los tensoactivos se clasifican de acuerdo con sus constituyentes en cuatro grupos:

Aniónicos: surfactantes compuestos por un grupo hidrófilo que presenta una carga negativa. Generalmente estos grupos hidrófilos se encuentran unidos a través de un enlace iónico a un catión metálico.

Catiónicos: surfactantes que presentan en un grupo hidrófilo una carga positiva.

No iónicos: en este tipo de surfactantes, la estructura molecular no contiene iones que puedan disociarse en una disolución, por lo que la carga de la estructura molecular no se modifica.

Anfotéricos: Esta clase de surfactantes contienen en su estructura dos o más grupos funcionales.

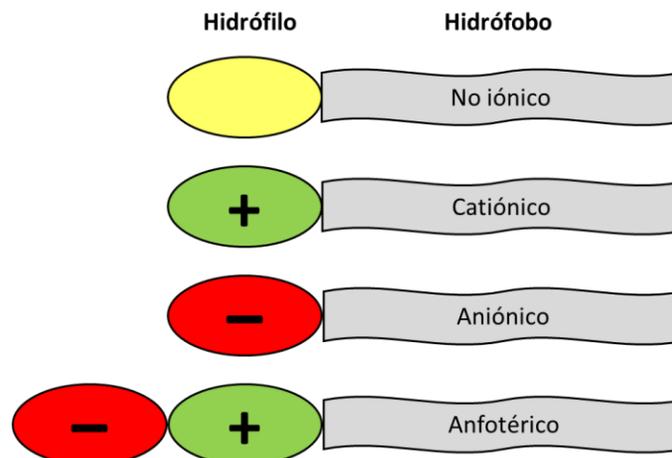


Figura 2.- Clasificación de surfactantes de acuerdo con la carga que posee la cabeza hidrofílica.

La actividad de los tensoactivos va ligada a los cambios de tensión superficial del agua. Para estudiar el efecto de los tensoactivos se utiliza la concentración micelar crítica (CMC) y otras propiedades características de los tensoactivos como el número de agregación (n_a), el balance hidrofílico-lipofílico (HBL) y el punto de nube (PN) (Islas *et al.*, 2010).

A continuación, se definen las propiedades importantes para estudiar a los surfactantes, los conceptos son definidos por Jiménez *et al.* (2010).

La primera propiedad es la concentración micelar crítica o **CMC** que se define como la concentración de tensoactivo en la que se alcanza la mínima tensión superficial, es la concentración de tensoactivo debajo de la cual las micelas se forman espontáneamente. Es decir que debajo del valor de la concentración el tensoactivo presente en la solución se hallará en forma de monómeros.

El **HBL** o también llamado balance hidrofílico-lipofílico es un valor que representa la capacidad de un tensoactivo de formar emulsiones estables en sistemas agua-aceite o aceite-agua al compararse con los valores estándar establecidos de HBL de ácido oleico (HBL= 1) y oleato de sodio (HBL= 20). De tal manera que valores de HBL cercanos a 1 indican que el tensoactivo forma emulsiones estables en sistemas de agua-aceite y en sistemas aceite-agua los valores cercanos a 20 señalan su capacidad de formar emulsiones estables.

El número de agregación o **na** indica el promedio de moléculas del tensoactivo que se encuentran formando micelas.

La temperatura es un factor clave ya que influye en la solubilidad del tensoactivo en solución acuosa. Esta propiedad se denomina punto nube o **PN** y se define como la temperatura a la cual el tensoactivo pierde su solubilidad en una solución acuosa. A nivel macroscópico se observa una apariencia turbia como de una nube.

3.3. Forma de acción

La cadena de hidrocarburos interactúa débilmente con las moléculas de agua, mientras que el grupo de cabeza polar interactúa fuertemente con las moléculas de agua a través de las interacciones dipolo o ion-dipolo. Esta fuerte interacción hace que el tensoactivo sea soluble en agua (Tadros, 2014). De esta manera, el surfactante se absorbe desde la solución acuosa a la superficie hidrofóbica y orienta su grupo hidrofóbico hacia la superficie mientras que el grupo polar es expuesto al agua (Ospina, 2012). El resultado es que la superficie se transforma en hidrofílica y la tensión entre ésta y el agua se reduce.

En la estructura micelar (Figura 3), los grupos hidrófobos se dirigen al interior del agregado y los grupos de cabeza polar se dirigen hacia el disolvente (Tadros, 2005). Cuando a una solución (acuosa, por ejemplo) se le añade cada vez más surfactante, este comienza a adsorberse a las interfaces disponibles, luego su concentración en forma monomolecular aumenta hasta que se forman las primeras micelas (Salager, 1992).

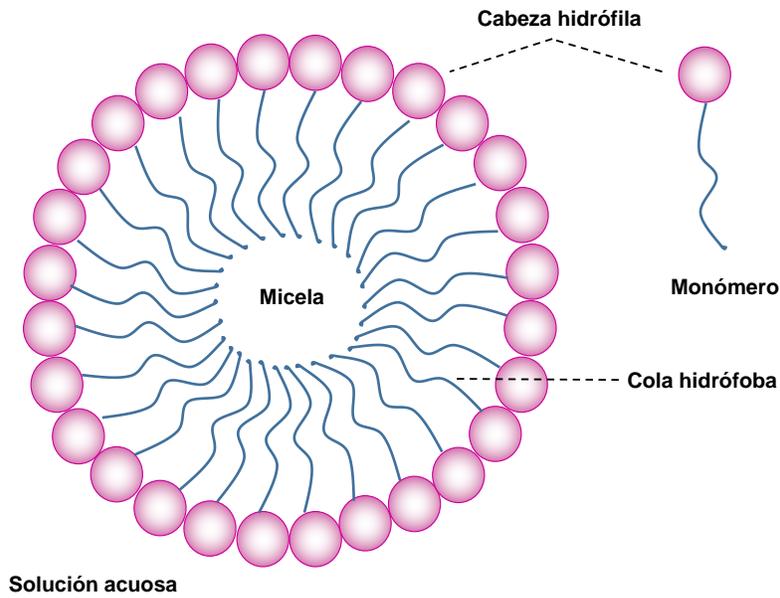


Figura 3.- Estructura de una micela. Se observa la forma monomolecular y la agrupación de monómeros que da origen a la forma micelar.

Existen otros agregados (Figura 4) como las micelas inversas y una vez que hay demasiadas micelas en el medio acuoso se puede obtener una microemulsión lo cual significa que en una solución hay micelas hinchadas que se tocan entre sí. Al ocurrir esto se pueden formar nuevas estructuras como organizaciones cilíndricas de micelas o micelas cilíndricas inversas, también se pueden formar organizaciones bicontinuas que tienen una doble capa denominadas cristal líquido laminar (Salager, 1992).

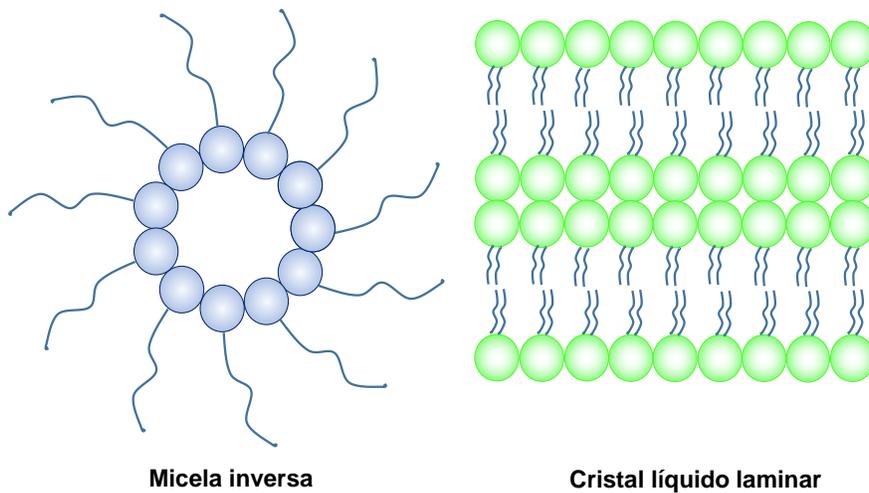


Figura 4.- Estructuras formadas por asociación de surfactantes.

3.4. Aplicación de surfactantes

Los tensioactivos se encuentran en una vasta gama de productos químicos, pues son utilizados a nivel industrial como agentes de limpieza en jabones y detergentes, así como en preparaciones de cosméticos, fármacos productos alimentarios y en procesos industriales como la petroquímica, cromatografía, análisis de suelos, catálisis, etc. (Ospina, 2012). De acuerdo con Álvarez (2004) el mayor porcentaje de surfactantes se concentra en productos de cuidado del hogar (56%), aplicaciones técnicas (27%) que contempla elaboración de agroquímicos, lubricantes, químicos para construcción, productos plásticos y textiles, (9%) en productos industriales como detergentes, limpiadores y lubricantes de dirigidos a ese sector y finalmente el (8%) en productos de cuidado personal.

Los surfactantes tienen múltiples aplicaciones independientemente de su acción de detergencia, por ejemplo, en la industria de la leche se utilizan surfactantes no iónicos en tuberías y dispensadores para evitar que microorganismos que descomponen la leche tengan crecimiento (Nivón, 2019). Los surfactantes se utilizan a favor del ambiente en dispersantes de mareas negras. El petróleo derramado de los petroleros y pozos de petróleo se emulsionan utilizando tensoactivos, la emulsión resultante se separa y luego se desemulsiona el sistema para recuperar el petróleo (Tadros, 2014). En la producción de herbicidas los utilizan como humectadores o adherentes en formulaciones de fungicidas y como emulsificantes se aplican en insecticidas para facilitar su dispersión en atomizadores (Fuentes y Román, 1980).

Salager (1992) indica otras propiedades relevantes como utilizar humectantes sobre frutas y hojas para que las gotas de agua en vez de rodar se extiendan alrededor del fruto y así favorecer la evaporación de agua y en su lugar dejara un residuo sólido en la superficie para que esto continúe ocurriendo. Destaca que en algunos países cálidos y áridos se esparce una monocapa de surfactante insoluble sobre la superficie de lagos o lagunas para reducir el proceso de evaporación. Incluso menciona otras aplicaciones como el uso de esencias orgánicas insolubles para producir bebidas aromatizadas; en la industria minera se

agregan para que mediante flotación se adhieran a los minerales y así asentar tierra y ganga, incluso se utilizan en laboratorio para electroforesis. Estas son solo algunas de las muchas aplicaciones de este grupo. Hoy en día son útiles en distintos campos y se estudian distintas clases de surfactantes para ser utilizadas en áreas de alta tecnología como la microelectrónica y la biotecnología, entre otras (Ospina, 2012).

3.5. Dodecil sulfato de sodio

Los surfactantes de tipo aniónico son los que en una solución acuosa, se disocian en un anión anfífilo y un catión metálico o amonio. En esta clasificación entra más del 60% de la producción de surfactantes que contempla jabones, detergentes en polvo y líquidos (Salager y Fernández, 2004; Vázquez *et al.*, 2020). El dodecil sulfato de sodio o SDS (Figura 5) es un tensoactivo perteneciente a la clase de los surfactantes aniónicos el cual es de uso amplio, cuenta con una alta solubilidad en agua y se encuentra en una amplia gama de productos como detergentes, pinturas, colorantes, cosméticos, farmacéuticos, agroquímicos, fibras, plásticos, entre otros. (Tadros, 2014). Es una sal de sulfato de alquilo que se obtiene de la sulfatación de alcohol laurílico seguida de una neutralización con carbonato de sodio (Merck, 2015).

El también denominado lauril sulfato de sodio (SDS, C₁₂ H₂₅ O S O-Na⁺) es uno de los surfactantes iónicos más utilizados en los estudios de agregación micelar, estabilidad de espumas, formación de monocapas y preparación de emulsiones (Myers, 2005, Yan *et al.*, 2011). Cabe destacar que el SDS tiene un alto valor de solubilidad en agua lo cual expresa su alto nivel hidrofílico (Parra *et al.*, 2014).



Figura 5.- Estructura química del dodecil sulfato de sodio.

Biológicamente este compuesto tiene la capacidad de unirse a macromoléculas bioactivas como péptidos, enzimas y ADN; en grandes concentraciones actúa eliminando la capa de fosfolípidos de membrana lo que conlleva a la pérdida de la actividad biológica de la célula, mientras que en el ambiente reduce la cantidad de oxígeno disuelto (Freitas y Rocha, 2012). En general los surfactantes reducen la cantidad de oxígeno en los cuerpos de agua ya que al reducir la tensión superficial incrementa la espuma y estas capas impiden el intercambio gaseoso entre el medio acuático y la atmósfera, impidiendo los procesos de autodepuración. Los residuos provenientes del uso doméstico e industrial de detergentes hacen que el dodecil sulfato de sodio se halle comúnmente en aguas residuales (Baker y Grant, 2018). Los surfactantes usualmente son descargados en grandes cantidades en plantas de tratamiento de aguas residuales o directamente en el ambiente (Ying, 2006) donde tiene contacto con organismos acuáticos que podrían estar siendo adversamente afectados.

3.6. Contaminación de cuerpos de agua

Una población que se incrementa cada año requiere productos que satisfagan sus necesidades básicas; sin embargo, el origen y desecho de productos de demanda global tiende a contaminar ambientes terrestres y/o acuáticos. Los recursos hídricos están siendo alterados no solo por los contaminantes habituales, sino también por contaminantes emergentes, refiriéndose estos a compuestos de distinto origen y naturaleza química, cuya presencia no se considera significativa en términos de distribución y/o concentración (Gil *et al.*, 2012). Pese a que se hallen en bajas concentraciones en el ambiente, dichos compuestos tienen impacto ecológico y representan un riesgo para la salud pública (Stuart *et al.*, 2012). Por otro lado, las tasas de transformación y remoción que presentan se compensan por una introducción continua en el ambiente (Barceló y López, 2007).

Las fuentes de generación de estos contaminantes provienen del uso doméstico, agricultura, ganadería e industria principalmente, además en su mayoría son compuestos no regulados (Becerril, 2009). La mayoría de los contaminantes emergentes son de origen antropogénico e incluyen productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, disruptores endocrinos, plastificantes, plaguicidas,

aditivos industriales y surfactantes (García *et al.*, 2011) y su dispersión en el entorno depende de sus características fisicoquímicas como la vida media, la polaridad, la degradabilidad celular y ambiental y la toxicinética (Ray, 2016). El efecto de la contaminación es que los cuerpos de agua epicontinentales y marinos presentan signos de degradación, reducen su cantidad y calidad de servicios ambientales y en algunos casos hasta su biodiversidad (SEMARNAT, 2016)

En la mitad del siglo XX se desarrollaron los primeros surfactantes sintéticos. Las mejoras en las nuevas formulaciones lograron que el uso de detergentes incrementara de una forma muy rápida a la vez que estos se hacían presentes en los cuerpos de agua ya que de acuerdo con SEMARNAT (2016) las aguas residuales (sobre todo en los países en desarrollo) se vierten sin tratamiento en los cuerpos de agua superficiales. A finales de la década de 1940 se informó por primera vez acerca de la formación de espumas en arroyos y en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs) y a inicios de 1950 se identificó que los causantes eran los surfactantes de carácter sintético (Cowan-Ellsberry *et al.*, 2013). El consumo de surfactantes ha sido creciente desde entonces pues son más económicos de realizar; aun así, actualmente algunas empresas han comenzado a optar por ingredientes de origen natural que puedan degradarse en el ambiente.

En los cuerpos de agua el dodecil sulfato de sodio tiene contacto con la comunidad acuática la cual está formada por una gran variedad de organismos. Cada uno de ellos es importante para dar la estructura trófica de los cuerpos de agua epicontinentales y marinos. El zooplancton es un grupo clave en la base de la cadena trófica y en él se encuentran los rotíferos los cuales colonizan hábitats rápidamente y convierten a productores primarios (algas y cianobacterias) en formas utilizables para consumidores secundarios, haciendo disponible la energía para los siguientes niveles tróficos (Rico-Martínez *et al.*, 2016). Actualmente la Sociedad Americana de Ensayos Materiales (ASTM por sus siglas en inglés, 2012) contempla a los rotíferos *Brachionus calyciflorus* y *Brachionus plicatilis* como organismos de prueba en ecotoxicología. Sin embargo, otras especies de rotíferos del género *Brachionus* se encuentran entre los organismos de ensayo más utilizados (Janssen *et al.*, 1993). Los rotíferos se consideran excelentes modelos de

estudio ya que pueden cultivarse en laboratorio, forman clones a través de partenogénesis, tienen un ciclo de vida corto, altas tasas de crecimiento, sensibilidad y relevancia ecológica (Sarma, 2000).

El efecto potencial que una sustancia puede tener sobre los organismos se evalúa utilizando ensayos ecotoxicológicos, los cuales siguen rigurosos protocolos y dan la pauta para utilizar una gran variedad de compuestos. Estos deben de cumplir con una serie de requisitos, por ejemplo, deben ser capaces de generar resultados ecológicamente significativos, tienen que generar información defendible desde el punto de vista científico y legal, deben estar basadas en métodos disponibles rutinariamente y ser de amplia aplicación, deben predecir efectos ecológicos, ser aplicables a una amplia variedad de compuestos y ser simples y costo-efectivas (Ramírez y Mendoza, 2008). Los ensayos agudos permiten determinar los efectos de una sustancia sobre los organismos que aparecen en un tiempo corto, mientras que por el otro lado en los ensayos crónicos se observan a los organismos por una gran parte de su vida expuestos a una sustancia (Repetto y Sanz, 1993). Cada ensayo tiene sus limitaciones a la hora de aplicarse y muestran información diferente por ello generalmente se evalúan de forma independiente. Sin embargo, cada vez más investigadores utilizan ambas técnicas en experimentación para que puedan complementar su información y además han optado por aplicar otros análisis como los de morfometría lineal y geométrica que nos aportan información de la variación de la forma con factores subyacentes (Toro *et al.*, 2010).

3.7. Efectos en los organismos acuáticos

En el agua dulce, los plaguicidas y surfactantes tienen efectos especialmente graves sobre la biota y pueden provocar grandes pérdidas en la biodiversidad (Freitas y Rocha, 2012). Se han estudiado algunos tipos de surfactantes en el pasado, por ejemplo, en una exhaustiva investigación Lewis (1991) recuperó información de ensayos de toxicidad aguda y crónica de los surfactantes más representativos de la época como sulfonato de alquilbenceno lineal, alquil etoxilato lineal, bromuro de cetiltrimetilamonio y cloruro de di sebo dimetil amonio sobre organismos acuáticos. Sus resultados sobre toxicidad crónica muestran que hubo efectos negativos

evidentes en los organismos con concentraciones de surfactantes aniónicos de 0.04 a >10 mg/L y con catiónicos de 0.009 a 0.41 mg/L.

Los efectos varían de acuerdo con el tipo de surfactante y especie; sin embargo, a grandes rasgos se puede detectar que hubo afectaciones negativas principalmente en reproducción, crecimiento y desarrollo y en menor medida en supervivencia tanto para tensioactivos aniónicos como catiónicos y el mismo efecto negativo se ha observado en peces con surfactantes no iónicos (Kline *et al.* 1996). Respecto a los efectos subletales Lewis (1991) señala que hubo afectación en las respuestas fisiológicas/histopatológicas (olfato, respiración de laminillas branquiales, vasodilatación y morfología branquial, morfología de la piel y peso seco, entre otras). En cuestión de las respuestas etológicas o de comportamiento también se observaron alteraciones (evitación, quimio-atracción, actividad locomotora, patrones y actividad de nado, comportamiento alimentario y excavación) utilizando concentraciones máximas de 5, 10 y 20 mg/L.

Existe evidencia de la afectación de organismos acuáticos como peces, en ellos aumenta la permeabilidad de las branquias, alterando el proceso respiratorio (Mason, 1981), además causa cambios en la etología de peces, produciendo movimientos erráticos, espasmos musculares, y torsión del cuerpo (Argese *et al.*, 1994). Resultados parecidos obtuvieron Vázquez *et al.* (2020), ya que realizaron una evaluación del efecto del lauril éter sulfato de sodio sobre larvas de *Rhinella arenarum* y semillas de *Lactuca sativa*, encontraron que desde las concentraciones más bajas aplicadas (50 mg/L) se observaron alteraciones en el desarrollo de las larvas y afectación en el comportamiento, en las semillas hubo inhibición en la germinación en la concentración más baja e inhibición en el desarrollo de la radícula e hipocótilo en la concentración 1 mg/L. En general hay evidencia de los efectos negativos que causan los surfactantes sobre algunos organismos acuáticos, pero carecemos de información de los efectos que el dodecil sulfato de sodio provoca en especies acuáticas a pesar de que se utiliza en varias de las formulaciones de muchos productos cotidianos que utilizamos.

4. Antecedentes

Respuestas agudas ya han sido evaluadas utilizando surfactantes sobre organismos que pertenecen al medio acuático, por ejemplo, Warne y Schifko (1999) evaluaron los componentes más usuales que se hallan en formulaciones de detergentes para ropa sobre el cladócero *Ceriodaphnia dubia*. Los resultados arrojaron que hay componentes con toxicidad baja, moderada y alta. El grupo de los surfactantes tuvo toxicidad alta y contribuyó un 40.7% a la toxicidad total. El análisis indicó que los tensioactivos actuaban de forma antagónica, aditiva y sinérgica dependiendo de los compuestos utilizados.

Anastácio *et al.* (2000) evaluaron el efecto de un surfactante no iónico Genapol OX-80 sobre el alga *Selenastrum capricornotum* en un rango de concentración de 0.1-1 mg/L. El valor obtenido de la CE_{50} a 72 horas fue de 0.5 mg/L, este resultado es dos órdenes de magnitud menores a las cantidades normalmente utilizadas en campo (50 mg/L), por lo que los autores indican que es posible que no haya un efecto significativo del surfactante en campo.

Vieira *et al.* (2019) utilizaron surfactantes sintéticos y biogénicos a diferentes concentraciones sobre *Daphnia magna* y *Dendrocephalus brasiliensis*. Ambas especies mostraron una alta sensibilidad al compuesto sintético dodecil sulfato de sodio (DSS). Los valores obtenidos de CE_{50} de 24.1 mg/L y 15.4 mg/L respectivamente. El surfactante fue aproximadamente 1.5 veces más tóxico en el crustáceo que en el cladócero, los autores lo atribuyen a que las especies tropicales son más sensibles que las de regiones templadas.

Los efectos de toxicidad crónica han sido reportados por Versteeg *et al.* (1997). Ellos expusieron al rotífero *Brachionus calyciflorus* a diferentes clases de surfactantes que fueron diferenciados por su estructura, largo de la cadena y grupo principal. La exposición crónica fue únicamente de dos días y el DSS obtuvo una CE_{20} de 0.24 y una CE_{50} de 1.4 mg/L. Concluyeron que los compuestos que contenían N (aminas y amonio) fueron más tóxicos; los de menor toxicidad fueron los aniónicos; sin embargo, dentro de ellos los que presentaron sustitución de sulfato fueron más tóxicos que los que presentaron la de sulfonato.

Como muchos surfactantes se encuentran en herbicidas, Freitas y Rocha (2012) consideraron importante evaluar el efecto de la atrazina (herbicida no iónico) y el DSS sobre el cladóceros *Pseudosida ramosa*. Los valores de CL₅₀ a 48 h fueron de 20.9 mg/L para atrazina y 11.1 mg/L para el surfactante indicando que este último fue el doble de tóxico. Realizaron una exposición a largo plazo donde las concentraciones de DSS no redujeron la supervivencia, pero si la fecundidad y la fertilidad ambas a los 21 días a concentraciones de entre 2 y 4 mg/L. Con ambos compuestos las tasas de crecimiento fueron positivas; sin embargo, se presentaron embriones con anomalías en el desarrollo durante la experimentación.

La morfometría es una de las variables sensibles en las especies acuáticas, principalmente en especies zooplanctónicas. Generalmente estas muestran una disminución o un aumento en el ancho y largo del cuerpo o cambios en las espinas anteriores/posteriores cuando son expuestas a sustancias tóxicas. Por ejemplo, Sarma *et al.* (2008) estudiaron el efecto de dos metales pesados sobre morfología de *Plationus patulus*. Los datos morfométricos indicaron que el Cu⁺² provocó individuos de mayor tamaño corporal, mientras que el efecto contrario se produjo debido al Hg⁺². Las espinas posterolaterales se vieron significativamente influenciadas por la concentración de Cu⁺² o Hg⁺² ya que, hubo una reducción en la longitud de la espina a bajas concentraciones de Cu⁺², y en todos los niveles probados de Hg⁺² comparado con el control.

Especies fitoplanctónicas también muestran diferencias en la morfometría. Lürning (2006) realizó experimentos agudos sobre *Scenedesmus obliquus*. Evaluó el crecimiento basado en clorofila, biovolumen, eficiencia del fotosistema II y la formación de colonias. Las concentraciones del surfactante FFD-6 se definieron utilizando como referencia valores ya estipulados de CE₅₀ y NOEC y además lo dividieron en tres grupos: sin limitación de nutrientes, limitación de N y limitación de P. Hubo diferencias significativas en el crecimiento respecto a nutrientes y a la concentración del surfactante. En general el crecimiento se vio afectado a partir de la concentración de 1 g/L y la morfología se vio afectada a concentraciones de entre 0.001 y 1 g/L donde el aspecto más importante fue que hubo cenobios de 4 y 8 células abundantes en los tratamientos.

5. Justificación

La contaminación en cuerpos de agua por detergentes es un tema de interés considerando que contienen distintos ingredientes en su formulación que han sido señalados como dañinos. Uno de ellos es la alta cantidad de fósforo que puede acarrear consigo problemas de eutrofización en sistemas acuáticos, por otro lado, se encuentran los compuestos organoclorados con posibles efectos tóxicos y carcinógenos, y no menos importantes son los surfactantes que reducen la tensión superficial y generan espuma que impide el adecuado intercambio aire-agua y reduce el oxígeno disuelto. Es decir que conocemos el efecto de surfactantes en los cuerpos de agua; sin embargo, no se tiene información completa de los efectos que tienen sobre la historia de vida de organismos acuáticos.

A finales del siglo pasado se comenzó a estudiar a los surfactantes más representativos como el sulfonato de alquilbenceno lineal (LAS), alquil etoxilato lineal (AES) o sulfato de alcohol (AS) dejando de lado a los etoxisulfatos de alquilo y a los sulfatos de alquilo. En este último subgrupo encontramos al dodecil sulfato de sodio que se encuentra en muchas formulaciones de productos de uso cotidiano e industrial. En México marcas de pasta dental, jabón de tocador, detergentes, lavatrastes, jabón de manos y pastillas para el inodoro cuentan con uno o más tipos de surfactantes aniónicos incluyendo dodecil sulfato de sodio, laurato de sodio, lauril sulfato éter de sodio y dodecilbenceno sulfonato de sodio. Específicamente dos marcas muy populares de dentífricos declaran en su etiquetado contener dodecil sulfato de sodio.

El país carece de estudios que detecten la concentración de surfactantes en distintos cuerpos de agua. La Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021) indica que en cuerpos de agua la concentración de tensioactivos suele ser menor a 0.1 mg/L; sin embargo, se sospecha que esta concentración podría ser más elevada puesto que diariamente se utilizan grandes cantidades en hogares e industria. Estos compuestos son vertidos directamente a los cuerpos de agua y los que se dirigen a las plantas de tratamiento de aguas residuales no siempre son eliminados eficazmente.

En las últimas décadas se ha estudiado más a los sulfatos de alquilo sobre algunas especies de invertebrados acuáticos y se han observado efectos negativos sobre la supervivencia y fecundidad, incluso se han encontrado en otros aspectos como en fisiología y etiología. El tipo de respuesta varía de acuerdo con el organismo utilizado, el surfactante seleccionado y las concentraciones aplicadas. Aun así, es preocupante que en concentraciones de miligramos y microgramos por litro los organismos estén siendo adversamente afectados.

Los rotíferos son utilizados en ecotoxicología, ya que brindan múltiples ventajas como ser partenogénéticos y por lo tanto, tener altas tasas de reproducción, ciclo de vida corto, cultivo fácil y económico, sensibilidad a cambios en el entorno y además son un importante eslabón en la cadena trófica; incluso la Asociación Americana de Ensayos Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) y la Asociación Estadounidense de Salud Pública (APHA, por sus siglas en inglés) en Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas Residuales contempla a *Brachionus calyciflorus*, *Brachionus plicatilis* y *Plationus patulus* como organismos de prueba.

Los ensayos agudos son sumamente importantes ya que nos brindan información de efectos letales y subletales en un tiempo reducido. Algunos autores complementan con ensayos crónicos como crecimiento poblacional o tabla de vida dado que estas indican cómo crece una población o una cohorte a través de tiempo y ofrecen la oportunidad de obtener la tasa intrínseca de incremento poblacional la cual es sensible a los cambios en el ambiente. El análisis de morfometría indica si hay o no variación en determinados caracteres. Se utiliza en el campo de la sistemática y filogenia, pero puede aplicarse a organismos que tuvieron una exposición a algún contaminante para observar anomalías.

Realizar un estudio que contemple ensayos agudos, crónicos y análisis de morfometría lineal y geométrica; brindará información sobre los efectos que el DSS causa a los rotíferos dulceacuícolas *Brachionus havanaensis* y *Plationus patulus*. Se espera que este estudio ayude a avanzar un paso más hacia la normatividad de los surfactantes para un manejo y desecho apropiados con sus respectivos límites permisibles.

6. Hipótesis

Al aplicar dodecil sulfato de sodio sobre especies sensibles como los rotíferos *Brachionus havanaensis* y *Plationus patulus*, se esperará que el surfactante tenga efectos tóxicos, los cuales podrán verse reflejados en la densidad poblacional y en las variables de tabla de vida como supervivencia y fecundidad de una manera dependiente de la concentración.

7. Objetivos

7.1. Objetivo principal

- Evaluar el efecto del surfactante aniónico dodecil sulfato de sodio sobre la demografía de las especies *Brachionus havanaensis* y *Plationus patulus* a diferentes concentraciones.

7.2. Objetivos particulares

- Determinar la concentración letal media para ambas especies expuestas al dodecil sulfato de sodio.
- Comparar las curvas de crecimiento poblacional, así como las gráficas de supervivencia y fecundidad de los rotíferos expuestos al surfactante.
- Evaluar la tasa de incremento poblacional, día de abundancia máxima, densidad poblacional máxima y relación huevo-hembra de las especies de rotíferos expuestos.
- Evaluar el efecto del surfactante sobre las características de historia de vida como promedio de vida, esperanza de vida, tasa de reproducción bruta, tasa de reproducción neta, tiempo generacional y tasa intrínseca de incremento poblacional de las especies expuestas.
- Determinar si existen anomalías en la morfometría y morfología de *Brachionus havanaensis* y *Plationus patulus* al ser expuestos al surfactante aniónico.

8. Materiales y métodos

8.1. Aislamiento y cultivo de organismos

Las cepas de los rotíferos *Brachionus havanaensis* Rousselet, 1911 y *Plationus patulus* Müller, (1786) (Figura 7) fueron aisladas del Canal de Cuemanco (Figura 6) el cual forma parte del lago artificial de Xochimilco localizado en la alcaldía Xochimilco al Sur de la Ciudad de México con coordenadas 19°17'05.2"N 99°06'07.5"W y situado a una altitud de 2,240 m.s.n.m (INAFED, 2019). Se filtraron con una malla de 50 µm y se recolectaron en recipientes plásticos de 300 ml. Fueron transportados al laboratorio de Zoología Acuática de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala donde se realizó la determinación taxonómica de los rotíferos mediante el uso de claves taxonómicas especializadas (Koste, 1978).

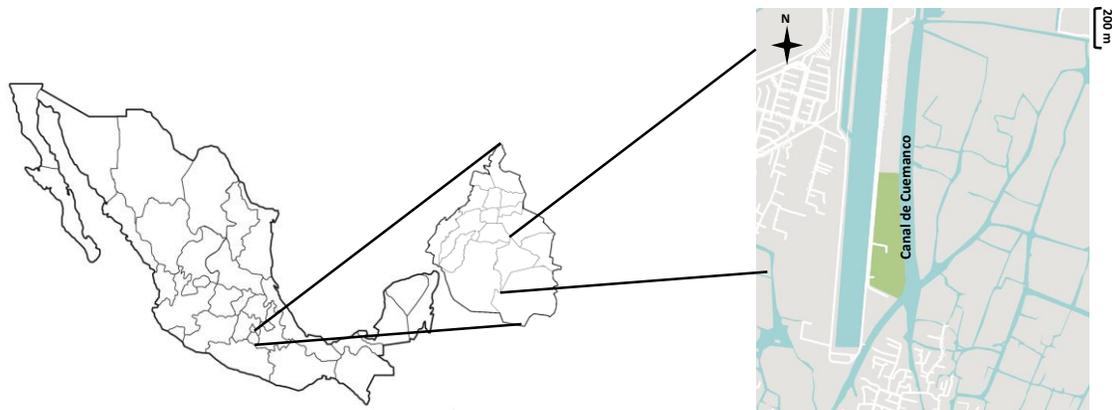


Figura 6.- Mapa. Ubicación del Canal de Cuemanco (Ciudad de México, Xochimilco).

Antes de que se utilizaran experimentalmente, se realizó un cultivo a partir de una hembra partenogénica y los organismos permanecieron en condiciones de laboratorio en agua moderadamente dura (medio EPA) preparada con 60 mg de CaSO_4 , 60 mg de MgSO_4 , 96 mg de NaHCO_3 y 4 mg de KCl por litro. El alga seleccionada para la experimentación fue *Chlorella vulgaris* cepa CL V-3, CICESE, Ensenada, México (Figura 8) la cual se cultivó en medio basal Bold (Borowitzka y Borowitzka, 1988) en contenedores de 2 L agregando cada tres días 0.5 g de bicarbonato de sodio además de luz y aireación constante. Al llegar a una densidad elevada, el alga se cosechó, fue sedimentada, decantada y resuspendida en agua destilada. Por último, se cuantificó en la cámara de Neubauer y se suministró a los

organismos en densidades de 0.5×10^6 céls./ml. Los organismos de prueba permanecieron en periodos de luz/obscuridad, temperatura ambiente de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y el cambio de medio se realizó cada tres días.

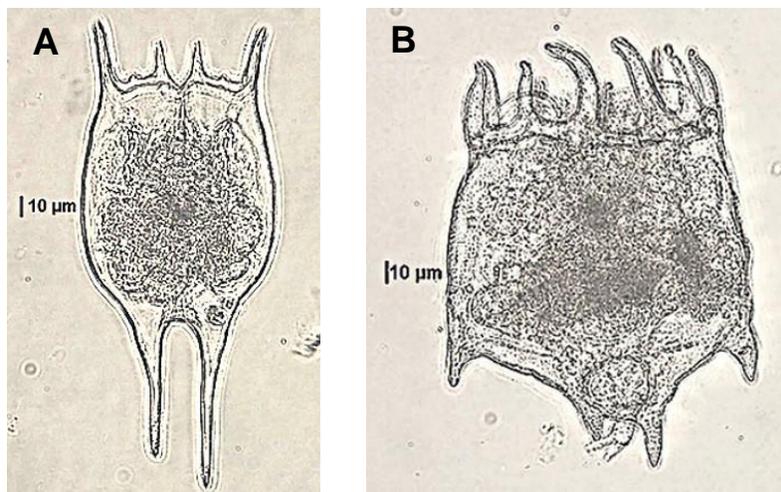


Figura 7.- Rotíferos utilizados durante la experimentación. A) *Brachionus havanaensis*, B) *Plationus patulus*.

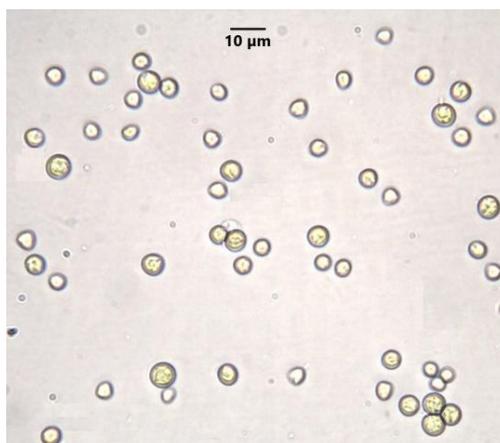


Figura 8.- Alga *Chlorella vulgaris*.

8.2. Adquisición del surfactante

El compuesto químico dodecil sulfato de sodio (Figura 9) se obtuvo a través de Sigma Aldrich. El tensoactivo venía en una presentación de 25 gramos, una pureza $\geq 98.5\%$ y con lote #SLCC2823. Con base en su pureza se realizaron los cálculos correspondientes para obtener una solución madre de 200 mg/L la cual fue

preparada con agua destilada y que se mantuvo en refrigeración durante la experimentación.



Figura 9.- Surfactante aniónico dodecil sulfato de sodio. Vista lateral izquierda y derecha.

8.3. Bioensayo agudo

Con base en lo reportado en la literatura, se realizó una prueba de concentración letal media (CL₅₀) para ambas especies de rotíferos. Las concentraciones utilizadas en las especies *Brachionus havanaensis* y *Plationus patulus* fueron 6.25, 12.5, 25, 50 y 100 mg/L. Los bioensayos fueron realizados en contenedores de 50 ml de capacidad con 20 ml de medio EPA con cada una de las concentraciones seleccionadas del surfactante y en el control se agregó únicamente medio EPA. Utilizando pipetas Pasteur bajo microscopio estereoscópico (Nikon, SMZ2645) se añadieron 20 neonatos de cada una de las especies de rotíferos por recipiente a los cuales no se les agregó alimento algal. En ambos experimentos las condiciones experimentales fueron; temperatura $25 \pm 2^\circ\text{C}$, pH~7.5, luz continua y difusa. Se realizaron cuatro réplicas por concentración y la duración experimental fue de 24 h al cabo de las cuales se realizó el conteo de individuos vivos y muertos.

8.4. Bioensayo crónico

Con base en los resultados obtenidos en la prueba de CL₅₀ se realizaron dos pruebas crónicas: crecimiento poblacional y tabla de vida para cada especie. Para ambos experimentos se utilizaron concentraciones nominales y se realizaron cuatro repeticiones para los tratamientos y el control. En recipientes de 50 ml de capacidad se añadieron 20 ml que contenían medio EPA para el control y en los tratamientos además las concentraciones de 0.625, 1.25, 2.5, 5 y 10 mg/L para *Brachionus havanaensis* y 1.25, 2.5, 5, 10 y 20 mg/L para *Plationus patulus*. Como alimento se les suministro *Chlorella vulgaris* a una densidad de 0.5x10⁶ céls./ml. A cada recipiente se agregaron 20 neonatos para obtener una densidad inicial de 1 ind./ml.

8.4.1 Crecimiento poblacional

Utilizando el diseño experimental mencionado anteriormente se realizó el crecimiento poblacional de ambas especies de rotíferos. Tras el inicio de los experimentos diariamente se realizó el conteo de individuos y sus huevos en cada recipiente, así como el cambio de medio 100% (con alimento y la concentración de dodecil sulfato de sodio) durante un periodo de 24 días en donde la población mostró una tendencia de incremento. Únicamente en los controles de ambas especies se requirió aplicar la fórmula integral de crecimiento logístico (Krebs, 1985) para describir el crecimiento de la población en función del tiempo:

$$N_t = \frac{K}{1 + e^{a-rt}}$$

Dónde:

N_t = tamaño de la población en el tiempo t

t= tiempo en días

K= valor máximo o capacidad de carga

a= constante de integración que define la posición de la curva relativa al origen

r= capacidad intrínseca de aumento

La tasa intrínseca de crecimiento poblacional (r) se calculó utilizando la ecuación exponencial de Krebs (1985):

$$r = \frac{\ln N_t - \ln N_0}{t}$$

Dónde:

N_0 = densidad de la población inicial

N_t = densidad de la población después del tiempo

t = tiempo en días

8.4.2. Morfometría lineal y geométrica

Una vez concluido los experimentos de crecimiento poblacional se recuperaron los rotíferos de ambas especies y se preservaron en tubos Eppendorf de 2 ml con formol al 4%. Para analizar las diferencias de tamaño entre el control y los tratamientos 10 individuos adultos de *B. havanaensis* y *P. patulus* fueron colocados en posición dorsal con el fin de obtener el largo y el ancho para cada réplica y tratamiento (Figura 10), esto se realizó utilizando un microscopio óptico Nikon Eclipse E600 y el programa Motic 2000. Se tomaron tres fotos por individuo enfocando distintos ángulos y posteriormente se utilizó el programa Combine ZP para empalmar las fotografías y obtener imágenes más nítidas, ya que este registro fotográfico se empleó también en el análisis de morfometría geométrica. En el caso de la morfometría lineal a los datos de largo y ancho se les aplicó un ANDEVA de una vía para determinar si había diferencias significativas entre el control y los tratamientos. Para el análisis de morfometría geométrica se utilizó la galería fotográfica ya mencionada, se creó un archivo TPS con el programa tpsUtil32. En el programa tpsDig32 se procedió a digitalizar las fotos añadiendo la escala en micrómetros y añadiendo los hitos o landmarks como se observa en la Figura 11. Finalmente, en el programa Morpho J se realizó el análisis de Procrustes para ajustar la rotación, traslación y escala (Zelditch *et al.*, 2004). Los individuos de la concentración de 20 mg/L de *P. patulus* no se pudieron medir ya que murieron en los primeros días y eran menos de 10 organismos; además dos de los landmarks observados en la Figura 11 de *B. havanaensis* fueron omitidos al procesarlos en el programa Morpho J (números 6 y 12), ya que existía demasiada variabilidad en ancho de la lórica cuando esto es normal en los individuos de esta especie.

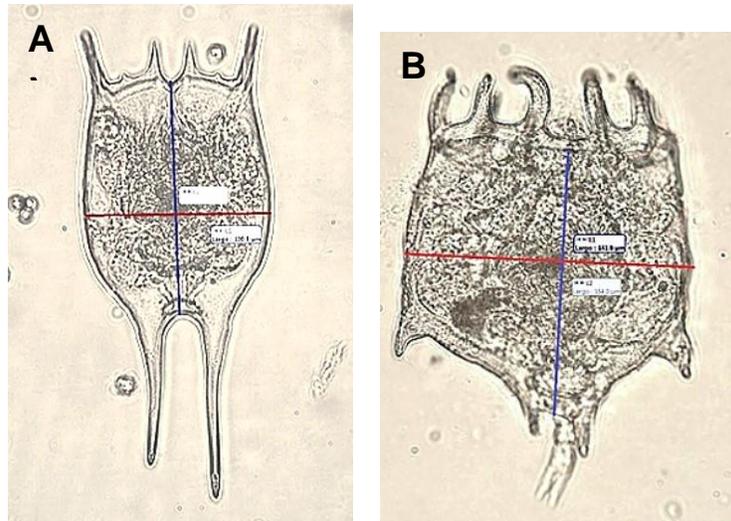


Figura 10.- Medición de largo (azul) y ancho (rojo) de los rotíferos A) *Brachionus havanaensis* y B) *Plationus patulus*. Vista dorsal.

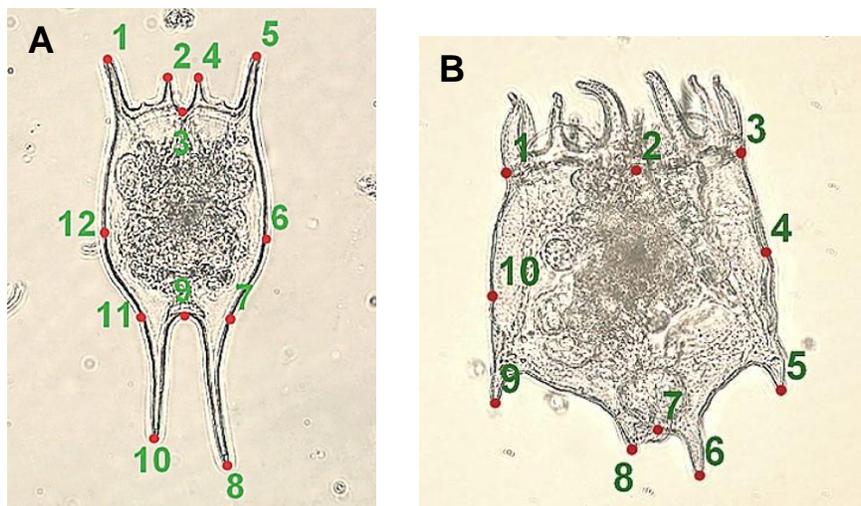


Figura 11. Colocación de los landmarks en A) *Brachionus havanaensis* y B) *Plationus patulus*. Vista dorsal.

8.4.3. Tabla de vida

Utilizando el mismo diseño experimental se realizó la tabla de vida demográfica de *B. havanaensis* y *P. patulus* separadamente. En recipientes de 50 ml se colocaron 20 individuos de cada especie de rotíferos. Los conteos se registraron cada 12 horas anotando el número de individuos y el número de neonatos recién nacidos. Los neonatos y los individuos de la cohorte original muertos fueron retirados; los individuos vivos de cada cohorte fueron transferidos a recipientes con nuevo medio

(alga y concentración de surfactante seleccionada) cada 24 horas. La duración experimental en cada tratamiento fue hasta que el último individuo de la cohorte murió. Se calcularon los siguientes parámetros perteneciendo la supervivencia y la reproducción con la ecuación de Krebs (1985):

Supervivencia:

$$l_x = \frac{n_x}{N^{\circ} \text{ inicial de individuos}}$$

Fecundidad:

$$m_x = \frac{N^{\circ} \text{ de individuos producidos}}{n_x}$$

Promedio de vida:

$$\sum_0^{\infty} l_x$$

Esperanza de vida:

$$e_0 = \frac{T_x}{n_x} \quad , \quad T_x = \sum_0^{\infty} L_x \quad , \quad L_x = \frac{n_x + n_{x+1}}{2}$$

Tasa de reproducción bruta:

$$\sum_0^{\infty} m_x$$

Tasa de reproducción neta:

$$R_0 = \sum_0^{\infty} l_x m_x$$

Tiempo generacional:

$$T = \frac{\sum l_x m_x * x}{R_0}$$

Tasa de incremento poblacional (r):

$$\sum_{x=0}^{\infty} e^{-rx} l_x m_x = 1$$

Donde n_x es el número de sobrevivientes a la edad x y l_x es la probabilidad de que un individuo sobreviva a una clase de edad dada, m_x es la fecundidad específica de edad y R_0 es el número de descendencia promedio por hembra.

8.4.4 Análisis estadístico

En el ensayo agudo, se obtuvo el valor de concentración letal cincuenta donde murió el 50% de los organismos, así como el límite superior y el límite inferior con ayuda del método de probit (Finney, 1971).

Los datos obtenidos en el crecimiento poblacional de cada especie fueron introducidos en una matriz en bruto, donde se calculó el número de individuos por mililitro y se obtuvieron el promedio y error estándar. Con estos datos se procedió a graficar el crecimiento poblacional en función del tiempo para los tratamientos y en los controles se incluyó la ecuación de crecimiento logístico que describía su crecimiento. Asimismo, se obtuvieron la tasa de crecimiento poblacional, día de abundancia máxima y densidad poblacional máxima; estos últimos se analizaron mediante un análisis de varianza de una vía (ANDEVA) y una prueba de *post hoc* (Prueba de Tukey) para determinar si existían diferencias significativas entre cada uno de los tratamientos con y sin la presencia del dodecil sulfato de sodio. El análisis de varianza se aplicó después de satisfacer las condiciones de distribución normal teniendo en cuenta el análisis residual siguiendo el programa SigmaPlot.

La relación huevo-hembra y la densidad poblacional se graficó mediante una regresión lineal con su ecuación correspondiente y su valor de R^2 siguiendo a Edmondson (1968).

Los datos de morfometría lineal (largo y ancho) de cada especie se analizaron mediante un ANDEVA de una vía para determinar si existían diferencias significativas con el control y entre tratamientos. Para comprobar el crecimiento isométrico de las especies se llevó a cabo un análisis de regresión lineal comparando en el eje X el largo y en el eje Y el ancho de los individuos; de esto se obtuvo la ecuación de las curvas, su valor de r y su valor de significancia (p). En el análisis de morfometría geométrica se aplicó un análisis de variables canónicas

(AVC) el cual arrojó las gradillas de deformación de las variables canónicas (VC) que contribuyen mayormente a la variación de cada especie de rotífero y se empleó un análisis discriminante con el fin de hallar diferencias significativas entre tratamientos.

Los datos de tabla de vida fueron introducidos en una matriz donde se obtuvo el promedio y error estándar con lo cual se elaboraron las gráficas de supervivencia y de fecundidad cada uno en función del tiempo usando el programa SigmaPlot. La tasa de mortalidad de la población indica el número total de individuos muertos durante una unidad de tiempo. Esta se analizó a partir del deceso de los organismos y se realizó una regresión para obtener la ecuación que describe el modelo, así como su correspondiente valor de R^2 (Rabinovich, 1984).

$$y = ae^{bx} \rightarrow Nt = N_0 * e^{-mt}$$

Donde:

y/N_t = Supervivencia de organismos en un tiempo $t+n$

a/N_0 = Supervivencia de organismos en un tiempo t

$b/-m$ = tasa intrínseca de mortalidad

x/t = tiempo días

Las curvas de supervivencia de cada tratamiento fueron comparadas estadísticamente entre sí mediante el análisis de supervivencia de Log Rank. Adicionalmente una prueba *post hoc* de comparación múltiple fue aplicada con el método de Holm-Sidak para hallar los grupos con diferencias.

Los datos de los parámetros de historia de vida fueron colocados en una matriz y se obtuvieron el promedio de vida, esperanza de vida, tiempo generacional, tasa de reproducción bruta, tasa de reproducción neta, y tasa intrínseca de incremento poblacional de acuerdo con las fórmulas anteriormente mencionadas. Un análisis de varianza de una vía (ANDEVA) y posteriormente una prueba de *post hoc* (Tukey) se efectuó para observar diferencias significativas en cada uno de los parámetros.

9. Resultados

9.1. Concentración letal media

En la Figura 12 se observa el valor de la concentración letal media del dodecil sulfato de sodio para cada rotífero. El análisis de probit arrojó que la concentración letal media (CL_{50}) con un límite de confianza del 95% para *Brachionus havanaensis* fue de 35.55 mg/L con un límite inferior y superior (28.18, 44.84). Para *P. patulus* la concentración letal cincuenta fue de 120.14 mg/L con un límite inferior y superior de (92.77, 155.59). El dodecil sulfato de sodio fue cerca de tres veces más tóxico para *Brachionus havanaensis* en comparación con *Plationus patulus*.

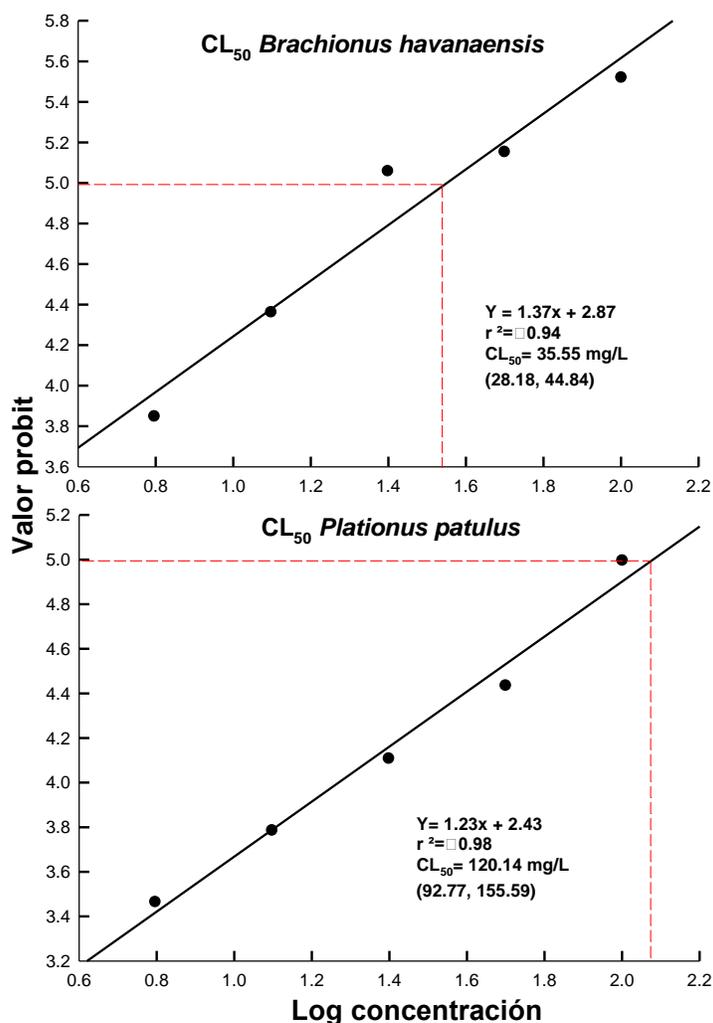


Figura 12.- Concentración letal media. Se observa la tendencia, el valor obtenido de la CL_{50} (línea punteada) y se presenta el valor del límite superior e inferior para cada especie de rotífero.

9.2. Crecimiento poblacional

Las gráficas de crecimiento poblacional del control y los tratamientos se muestran en la Figura 13. En ambas especies se observa que el control tuvo la mayor densidad de organismos, además tuvo una fase exponencial y pasando del día 20 entra en fase de retardo lo cual denota un crecimiento de tipo logístico con curvas de tipo sigmoideas. Se muestra la ecuación que describe el modelo, así como la capacidad de carga, la cual fue de 5902.5 (individuos totales) o 295.125 (ind./ml) en *B. havanaensis* y 4121.66 (individuos totales) o 206.083 (ind./ml) en *P. patulus*. Esto solo se observó en los controles ya que en los tratamientos los individuos de la población continuaron en la fase exponencial o se encontraron aún en la fase inicial de crecimiento debido a que fueron afectados por las concentraciones del surfactante que limitó la tasa de crecimiento. En los tratamientos a los que se les aplicó el dodecil sulfato de sodio se observó una tendencia pues conforme incrementó la concentración en el medio disminuyó la densidad de la población.

Al comparar los tratamientos de *B. havanaensis* con su control podemos observar que las concentraciones de 0.625, 1.25 y 2.5 disminuyeron aproximadamente 50% en densidad y las concentraciones de 5 y 10 mg/L disminuyeron > 75% en densidad final en comparación con el control pues la población tuvo un crecimiento deficiente a lo largo del tiempo. El control y las tres primeras concentraciones bajas dispararon su crecimiento en los primeros 5 días en cambio las dos concentraciones más altas crecieron un poco después del día 10 y 15, respectivamente. Cuando comparamos el control de *P. patulus* contra a los que se les aplicó el dodecil sulfato de sodio se observa que la concentración más baja utilizada redujo su densidad al 50% y la siguiente concentración de 2.5 mg/L la redujo al 75%. En las 3 concentraciones más altas se redujo la población >90%. Incluso en la concentración más alta de 20 mg/L no hubo crecimiento dado que los individuos murieron dentro de los primeros 6 días de experimentación.

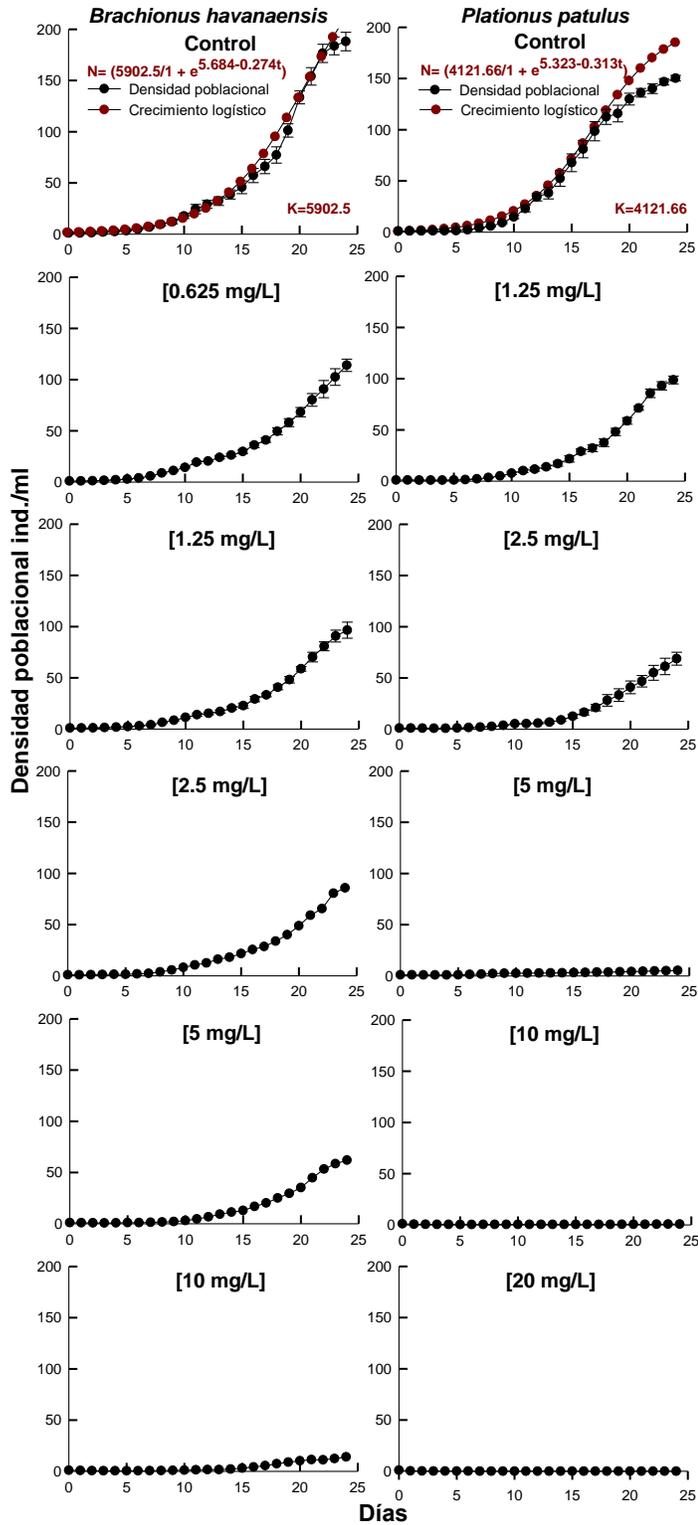


Figura 13.- Curvas de crecimiento poblacional de los rotíferos *B. havanaensis* y *P. patulus* expuestos al surfactante dodecil sulfato de sodio. Los valores indican el promedio \pm el error estándar de cuatro repeticiones. Los controles presentan la ecuación que describe el crecimiento logístico y el valor de K (capacidad de carga).

La tasa intrínseca de crecimiento poblacional de ambas especies de rotíferos se muestra en la Figura 14. La tasa de *B. havanaensis* tuvo diferencias significativas con los tratamientos ($p < 0.05$, ANDEVA, Tabla 1). Entre tratamientos las primeras concentraciones no fueron diferentes entre sí, pero tuvieron diferencias con las concentraciones de 5 y 10 mg/L. En cambio *P. patulus* no tuvo diferencia significativa ($p > 0.05$, ANDEVA, Tabla 1) con la más baja concentración (1.25 mg/L), pero si hubo diferencias significativas ($p < 0.05$, ANDEVA, Tabla 1) con las concentraciones de 2.5 mg/L o superiores. La tasa de crecimiento de la concentración más alta (20 mg/L) fue negativa pues la población no creció ya que murió dentro de los primeros 6 días de experimentación.

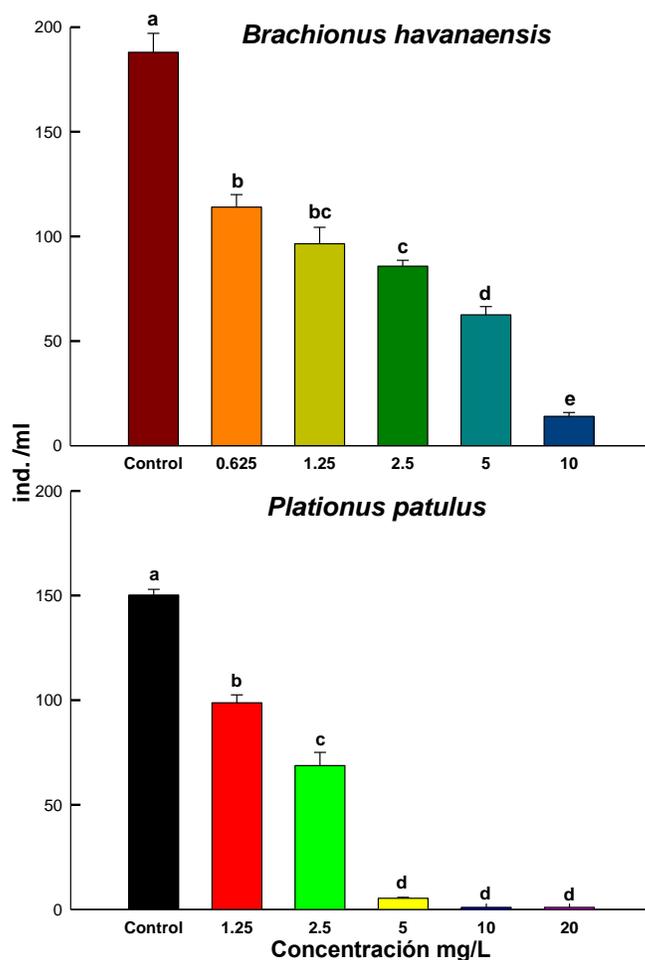


Figura 14.- Tasa intrínseca de incremento poblacional de los rotíferos *B. havanaensis* y *P. patulus* expuestos a diferentes concentraciones de tensoactivo. Los valores muestran el promedio de cuatro repeticiones con su error estándar y las letras las diferencias entre los tratamientos a través del análisis *post hoc* de Tukey.

El día de abundancia máxima (Figura 15) para *B. havanaensis* no tuvo diferencias significativas ($p>0.05$, ANDEVA, Tabla 1) respecto al control y fue el día 24 en el control y los tratamientos. Para la población de *P. patulus* únicamente hubo diferencias significativas ($p<0.05$, ANDEVA, Tabla 1) entre el control (día 24) y la concentración de 20 mg/L (día 5).

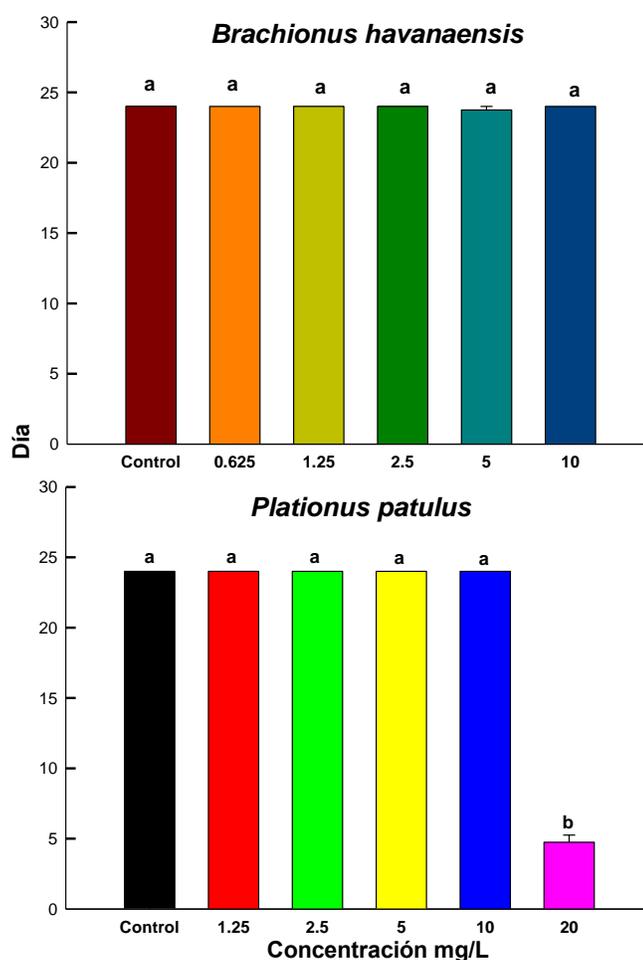


Figura 15.- Día de abundancia máxima de los rotíferos *B. havanaensis* y *P. patulus* expuestos a diferentes concentraciones de surfactante. Los valores muestran el promedio de cuatro repeticiones con su error estándar y las letras las diferencias entre los tratamientos a través del análisis *post hoc* de Tukey.

La densidad poblacional máxima de ambas especies de rotíferos se muestra en la Figura 16. La población de *Brachionus havanaensis* tuvo diferencias significativas ($p < 0.05$, ANDEVA, Tabla 1) comparándolo con el control. Entre tratamientos en las dos concentraciones bajas no mostraron diferencias significativas, pero en las siguientes concentraciones hubo diferencias entre sí. En *P. patulus* la densidad poblacional máxima de los tratamientos tuvo diferencias significativas ($p < 0.05$, ANDEVA, Tabla 1) respecto al control. Hubo diferencias entre tratamientos; sin embargo, las tres concentraciones más altas fueron similares entre sí.

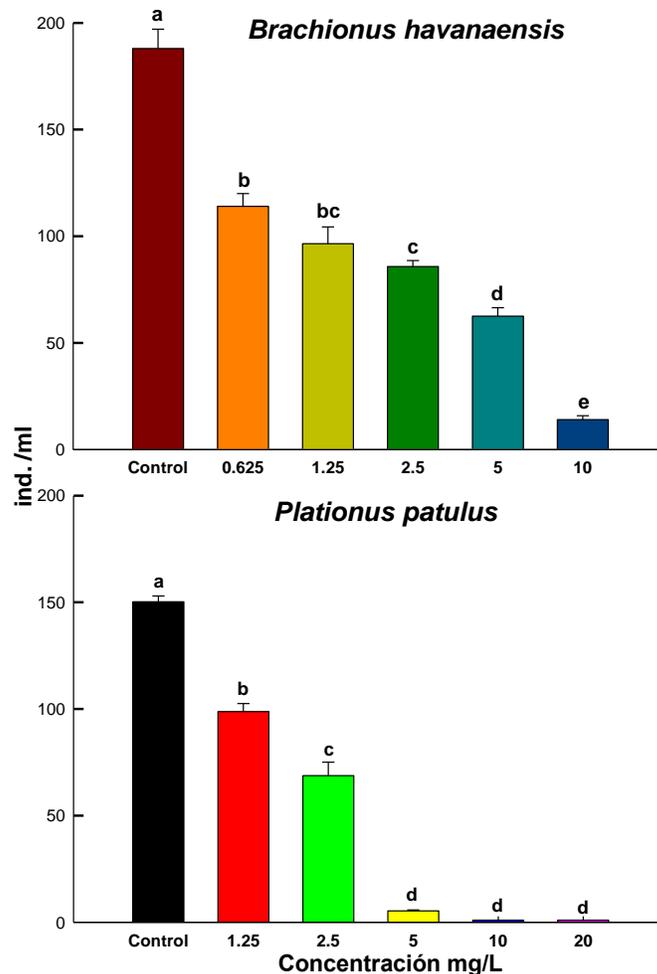


Figura 16.- Densidad poblacional máxima de los rotíferos *B. havanaensis* y *P. patulus* expuestos a diferentes concentraciones de tensioactivo. Los valores muestran el promedio de cuatro repeticiones con su error estándar y las letras las diferencias entre los tratamientos a través del análisis *post hoc* de Tukey.

Tabla 1.- Variables de crecimiento poblacional de ambas especies de rotíferos expuestos a diferentes concentraciones de dodecil sulfato de sodio. Se muestra el error correspondiente para cada tratamiento. Las letras distintas indican las diferencias significativas ($p < 0.05$) mientras que las letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0.05$).

Tratamientos (mg/L)	Tasa intrínseca de incremento poblacional	Densidad poblacional máxima	Día de abundancia máxima
<i>Brachionus havanaensis</i>			
Control	0.23±0.002 ^a	188±9.02 ^a	24±0 ^a
0.625	0.20±0.004 ^b	114±5.98 ^b	24±0 ^a
1.25	0.20±0.002 ^b	96.5±7.83 ^{bc}	24±0 ^a
2.5	0.21±0.001 ^b	85.75±2.86 ^c	24±0 ^a
5	0.17±0.002 ^c	62.5±3.94 ^d	24±0 ^a
10	0.15±0.009 ^c	14.02±1.79 ^e	24±0 ^a
<i>Plationus patulus</i>			
Control	0.25±0.001 ^a	150.25±2.71 ^a	24±0 ^a
1.25	0.23±0.001 ^{ab}	98.75±3.79 ^b	24±0 ^a
2.5	0.20±0.007 ^b	68.75±6.31 ^c	24±0 ^a
5	0.08±0.005 ^c	5.33±0.47 ^d	24±0 ^a
10	0.008±0.004 ^d	1±0 ^d	24±0 ^a
20	-0.11 ± 0.01 ^e	1±0 ^d	4.75±0.5 ^b

9.3. Relación huevo-hembra

La densidad poblacional fue graficada contra la relación huevo-hembra. Aquí se eliminaron los valores atípicos de ambas especies (primeros seis días) y al parecer hay una tendencia inversa en algunos tratamientos para ambos casos. En *Brachionus havanaensis* el valor de r^2 no fue significativo en ningún caso, en *Plationus patulus* fue de apenas 0.6 en el control. Se observó que el valor de la proporción de huevos fue disminuyendo en los tratamientos a medida que incrementaba la densidad poblacional. (Figura 17).

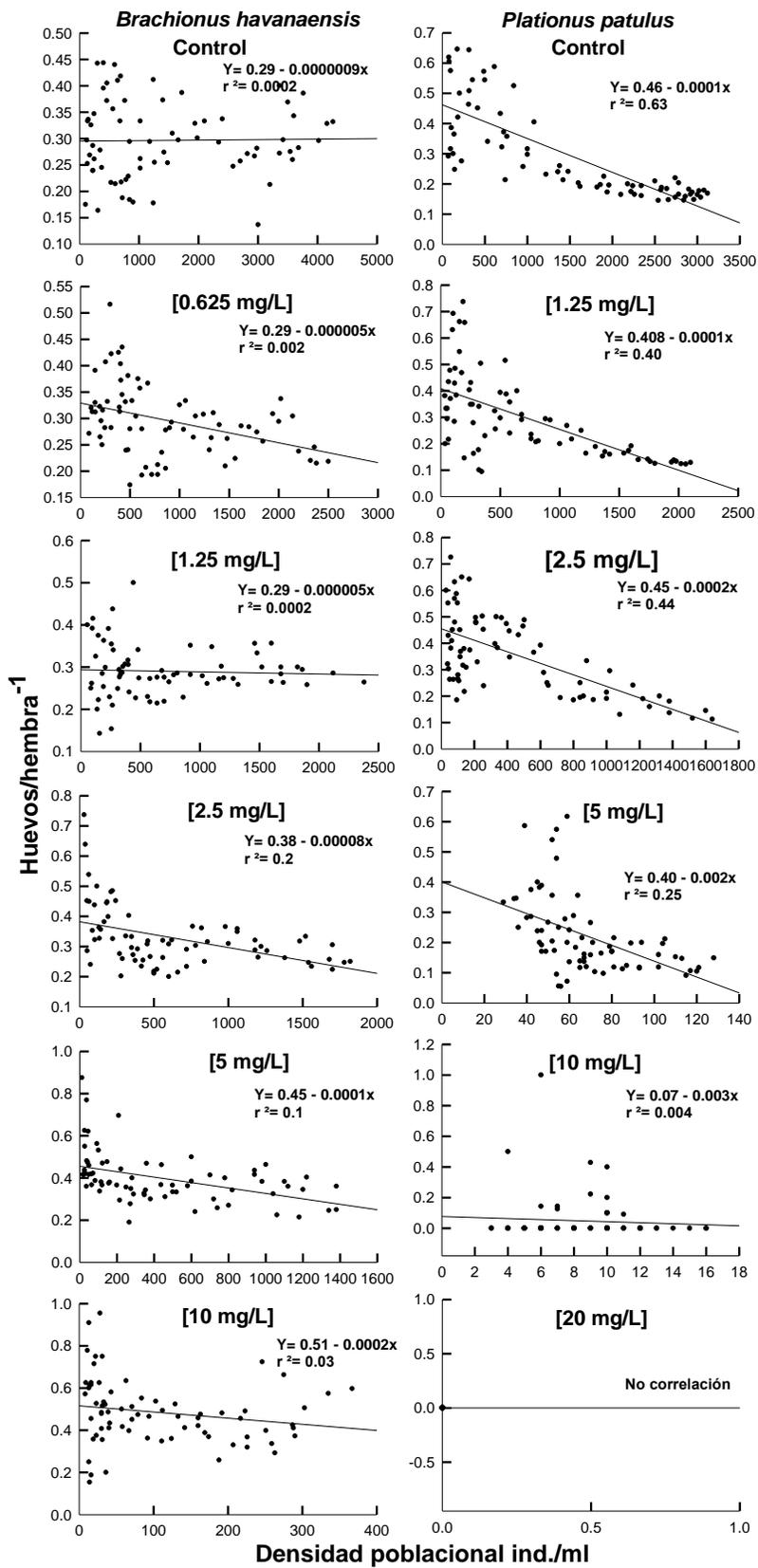


Figura 17.- Relación huevo/hembra de *Brachionus havanaensis* y *Platyonus patulus*.

9.4. Morfometría lineal

Los resultados del ANDEVA de una vía del largo y ancho de la lórica de ambos rotíferos se resumen en la Tabla 3 ($p < 0.001$). Diferencias significativas ($p < 0.05$, Tabla 2) se hallaron entre el control y los tratamientos en las medidas del ancho de la lórica de *B. havanaensis*. Las medidas del largo tuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$, Tabla 2) entre el control y las concentraciones de 0.625, 10 y 20 mg/L, pero no tuvo diferencias ($p > 0.05$, Tabla 2) con 1.25 y 2.5 mg/L. El ancho de la lórica de *P. patulus* tuvo diferencias significativas ($p < 0.05$, Tabla 2) con las concentraciones de 2.5 y 5 mg/L. Respecto al largo, se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$, Tabla 2) entre el control y los tratamientos de 2.5 y 5 mg/L.

Cuando se compararon el largo y ancho de ambas especies de rotíferos mediante un análisis de regresión lineal (Tabla 4) la mayoría de los modelos fueron altamente significativos ($p < 0.05$, Tabla 4), o sea que se pueden utilizar y realizar interpolaciones o extrapolaciones cuando así sea necesario. Los valores obtenidos de r señalan una relación fuerte $r > 0.8$ en los controles de *B. havanaensis* lo cual nos indicaría un crecimiento con tendencia a la isometría de la especie. En contraste, los valores de r en los tratamientos oscilan entre 0.4 ~ 0.8 pero con la diferencia de que el valor de la pendiente es menor. Hubo una buena relación $r > 0.6$ en los controles de *P. patulus*, pero en los tratamientos la r osciló entre 0.1 ~ 0.9 y el valor de la pendiente también fue menor. Esto nos indicaría que hubo una modificación en el crecimiento proporcional de los rotíferos a causa del surfactante, lo que implica que el crecimiento es alométrico en función de la concentración del surfactante.

Tabla 2.- Diferencias en las mediciones de largo, ancho y morfometría geométrica de los tratamientos de DSS sobre *B. havanaensis* y *P. patulus*. Las letras distintas indican las diferencias significativas ($p < 0.05$, $p < 0.01$) mientras que las letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0.05$, $p > 0.01$). s/d= sin datos disponibles.

Tratamientos (mg/L)	Largo	Ancho	M. geométrica
<i>Brachionus havanaensis</i>			
Control	a	a	a
0.625	b	b	b
1.25	b	ab	b
2.5	b	ab	bc
5	b	c	c
10	c	d	c
<i>Platyonus patulus</i>			
Control	a	a	a
1.25	ab	ab	a
2.5	bc	b	b
5	c	bc	bc
10	ab	a	c
20	s/d	s/d	s/d
valor de p	$p < 0.05$	$p < 0.05$	$p < 0.01$

Tabla 3.- Análisis de varianza de una vía sobre las mediciones de largo y ancho de las especies *B. havanaensis* y *P. patulus* que estuvieron expuestas al surfactante. GL = grados de libertad, SS= suma de cuadrados, MS= media de cuadrados, F, P.

Fuente de variación	GL	SC	MC	F	P
<i>Brachionus havanaensis</i>					
<i>Largo</i>					
Entre grupos	5	2722.805	544.56	13.98	<0.001
Residuo	234	9113.13	38.945		
Total	2390	11835.94			
<i>Ancho</i>					
Entre grupos	5	2541.199	508.24	20.84	<0.001
Residuo	234	5705.891	24.384		
Total	2390	8247.09			
<i>Platyonus patulus</i>					
<i>Largo</i>					
Entre grupos	4	927.161	231.79	8.498	<0.001
Residuo	195	5318.509	27.274		
Total	199	6245.67			
<i>Ancho</i>					
Entre grupos	4	739.435	184.86	7.763	<0.001
Residuo	195	4643.703	23.814		
Total	199	5383.138			

Tabla 4.- Valores de la regresión lineal de *B. havanaensis* y *P. patulus* comparando largo contra ancho de los individuos. Se muestran los valores de una curva $y = ax + b$ por tratamiento y por réplica. Se presenta adicionalmente el valor de correlación de las variables. Los asteriscos (*) indican la significancia ($p < 0.05$) de cada modelo.

<i>Brachionus havanaensis</i>				<i>Platyonus patulus</i>			
Tratamiento	ax (pendiente)	b (intercepto)	r	Tratamiento	ax (pendiente)	b (intercepto)	r
Control R1	0.585	27.686	0.82*	Control R1	0.773	46.164	0.70*
Control R2	0.835	1.367	0.89*	Control R2	0.645	60.075	0.92*
Control R3	0.793	4.457	0.89*	Control R3	0.745	45.876	0.63*
Control R4	0.851	3.309	0.88*	Control R4	1.204	17.879	0.86*
0.625 R1	0.055	29.339	0.84*	1.25 R1	0.467	86.798	0.71*
0.625 R2	0.613	24.244	0.89*	1.25 R2	0.423	90.607	0.58
0.625 R3	0.179	75.993	0.61	1.25 R3	0.991	12.936	0.75*
0.625 R4	0.734	10.475	0.92*	1.25 R4	0.291	110.66	0.18
1.25 R1	0.544	32.333	0.81*	2.5 R1	0.561	73.313	0.73*
1.25 R2	0.551	31.592	0.76*	2.5 R2	1.13	9.777	0.76*
1.25 R3	0.65	21.012	0.96*	2.5 R3	0.305	108.96	0.39
1.25 R4	0.416	47.871	0.66*	2.5 R4	0.556	75.202	0.62
2.5 R1	0.702	13.758	0.81*	5 R1	0.499	82.998	0.58
2.5 R2	1.073	28.8	0.96*	5 R2	0.015	152.69	0.02
2.5 R3	0.653	19.382	0.79*	5 R3	0.765	45.671	0.83*
2.5 R4	0.584	28.323	0.71*	5 R4	0.445	92.705	0.92*
5 R1	0.804	1.137	0.79*	10 R1	0.897	23.054	0.85*
5 R2	0.396	45.76	0.66*	10 R2	0.889	27.783	0.88*
5 R3	0.727	8.186	0.84*	10 R3	0.363	103.86	0.58
5 R4	0.552	27.491	0.48	10 R4	0.555	74.951	0.59
10 R1	0.602	22.855	0.84*				
10 R2	0.827	0.903	0.77*				
10 R3	0.745	8.558	0.82*				
10 R4	0.434	40.79	0.78*				

9.5. Morfometría geométrica

La variación de la forma fue analizada con el programa Morpho J, el cual arrojó los análisis de variables canónicas. En *B. havanaensis* las primeras cuatro variables canónicas explican >90% de la variación. En las gradillas de deformación (Figura 18) es notorio que las espinas anteriores, las posteriores y la zona posterior del tronco son las que presentan mayor cambio. El análisis discriminante indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.001$, Tabla 2) entre el control y los tratamientos. Entre tratamientos la mayoría presentó diferencias significativas ($p < 0.001$, Tabla 2); sin embargo, las concentraciones de 0.625 y 1.25 mg/L fueron similares ($p > 0.001$, Tabla 2); también 1.25 y 2.5 mg/L así como 5 y 10 mg/L. El análisis de *P. patulus* indicó que las cuatro primeras variables canónicas explican el 100% de la variación utilizando las coordenadas de Procrustes (Figura 19). En las gradillas de deformación la parte anterior y la parte posterior del tronco son las que sufren mayor cambio. Los valores de p de pruebas provenientes de la permutación de las distancias Mahalanobis entre grupos indicó diferencias significativas ($p < 0.001$, Tabla 2) entre control y tratamientos, asimismo indicó diferencias significativas ($p < 0.001$, Tabla 2) entre tratamientos con excepción de 2.5 y 5 mg/L así como 5 y 10 mg/L que no tuvieron diferencias significativas ($p > 0.001$, Tabla 2).

La morfología de la especie *B. havanaensis* se muestra en la Figura 20-A1, se observa la forma común del rotífero (control). En la Figura 20-A2 el margen posterior de las espinas se ve un poco deformado en el tratamiento al que se le aplicó 5 mg/L, es decir que pierde la curvatura y esto se observó también en varios organismos de las concentraciones de 5 y 10 mg/L. En la figura 20-A3 se identifica una deformación en la parte anterior de las espinas intermedias únicamente en un organismo que estuvo expuesto a la concentración de 10 mg/L. En *P. patulus* se observa la forma común del individuo (control) Figura 20-B1. En la mayoría de los individuos analizados no hubo alteración en morfología más que en un individuo de la concentración de 10 mg/L donde el largo del rotífero se visualiza un poco comprimido y con el ancho de la lóricas más curvado.

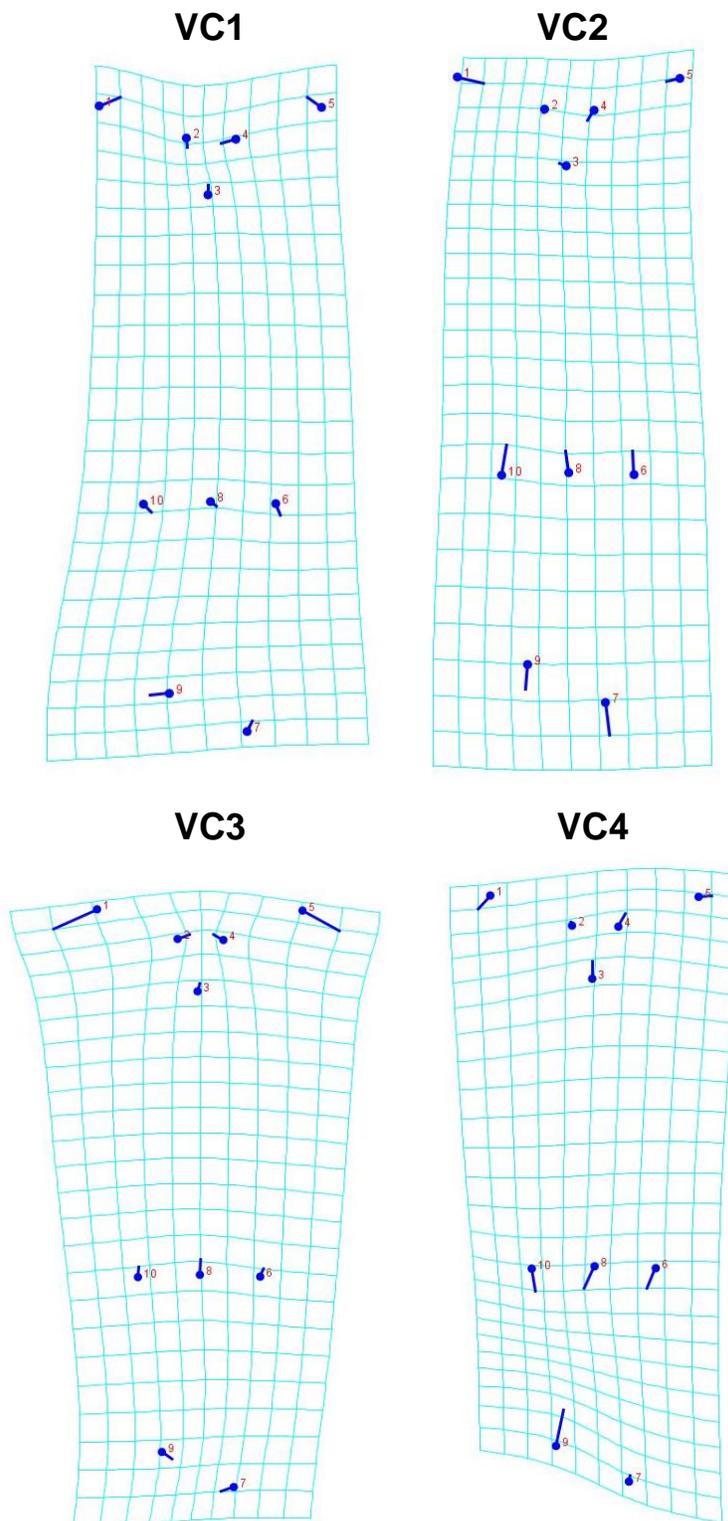


Figura 18.- Gradillas de deformación del análisis de variables canónicas de *B. havanaensis*. Se muestra el cambio en la forma del individuo. Los círculos indican la forma promedio y las flechas indican el sentido y la magnitud de los cambios en la posición relativa de los landmarks.

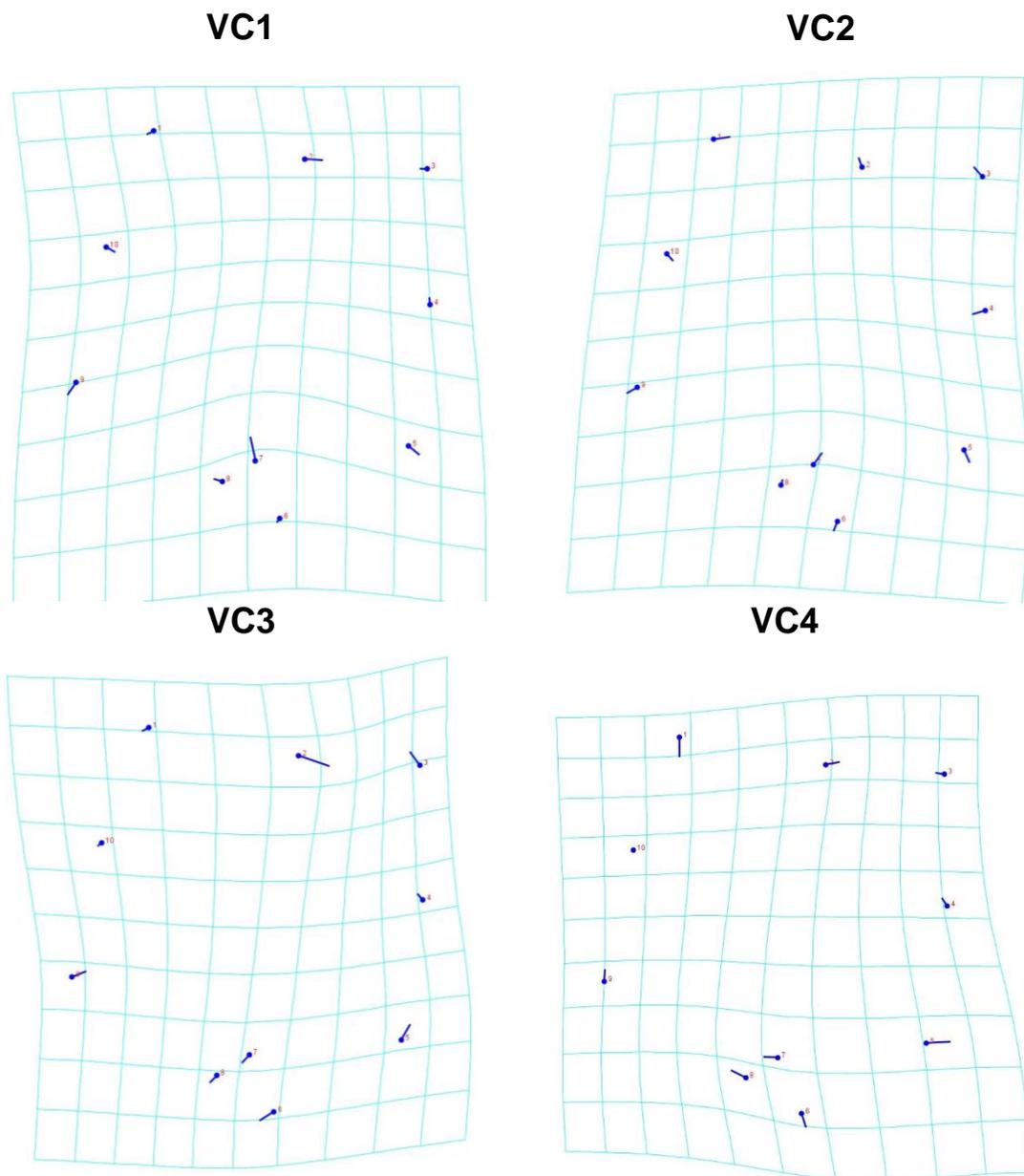


Figura 19.- Gradillas de deformación del análisis de variables canónicas de *P. patulus*. Se muestra el cambio en la forma del individuo. Los círculos indican la forma promedio y las flechas indican el sentido y la magnitud de los cambios en la posición relativa de los landmarks.

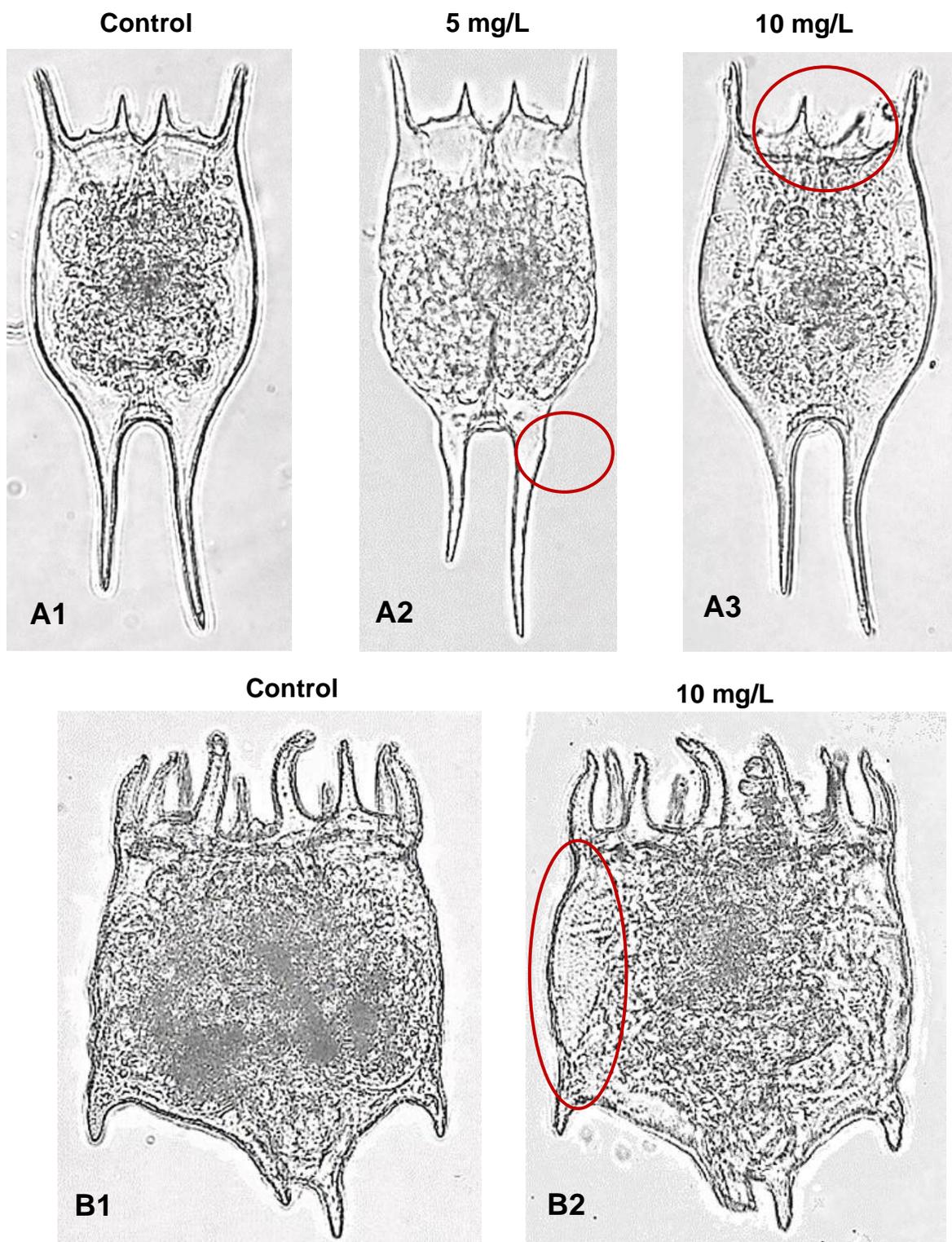


Figura 20.- Morfología de *Brachionus havanaensis*. A1) Control, A2) Expuesto a 5 mg/L y A3) Expuesto a 10 mg/L. Morfología de *Platinius patulus*. B1) Control, B2) Expuesto a 10 mg/L.

9.6. Tabla de vida

La supervivencia de los rotíferos es alta durante el ciclo de vida y presenta una alta mortalidad al final de este, por lo que la curva de supervivencia que los describe es de tipo I. Para ambas especies de rotíferos esto se cumple en el control (Figura 21, curvas de supervivencia) el cual vivió más allá de los veinte días. Por otro lado, en los tratamientos aumenta la pendiente conforme incrementa la concentración haciendo que los individuos murieran entre el día 14 y el día 20. En general ambas especies tuvieron curvas de supervivencia parecidas para los tratamientos.

Cuando se aplica la regresión a las curva del control que pertenece a *B. havanaensis* el comportamiento lo describe la ecuación $Nt = (0.016) e^{-(0.147)(t)}$; es decir que disminuye 0.147 individuos cada día y presentó un coeficiente de determinación de 0.703 (Figura 21, modelo en rojo). Adicionalmente se realizó una proyección de los datos la cual es la línea roja de cada curva. En la curva con la concentración más elevada de 5 mg/L se produjo un incremento en la mortalidad del 51%. Además, la prueba *post hoc* arrojó diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el control y los tratamientos y entre tratamientos. Por lo que se refiere a *P. patulus* cuando se aplicó la regresión a la curva control esta tuvo la siguiente ecuación $Nt = (0.013) e^{-(0.171)(t)}$ lo cual indica que disminuye 0.171 individuos por día y presentó un coeficiente de determinación de 0.689 (Figura 21, modelo en rojo). En la curva del modelo de la concentración más alta (5 mg/L) aumentó la mortalidad 28%. Aquí también se hallaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el control y los tratamientos, así como entre tratamientos.

En las curvas de fecundidad (Figura 22) se observa que los controles de *B. havanaensis* y *P. patulus* tienen una reproducción constante a lo largo del tiempo con varios picos numéricamente altos en la fecundidad. En cambio, en los tratamientos vemos una disminución en el número de descendientes por día y además se observan tres o únicamente dos picos a lo largo del periodo reproductivo el cual también disminuyó. En ambos controles la reproducción fue dentro de los 20 días en cambio en los tratamientos se observa que se llevó a cabo hasta el día 12 para *B. havanaensis* y hasta el día 13 para *P. patulus*.

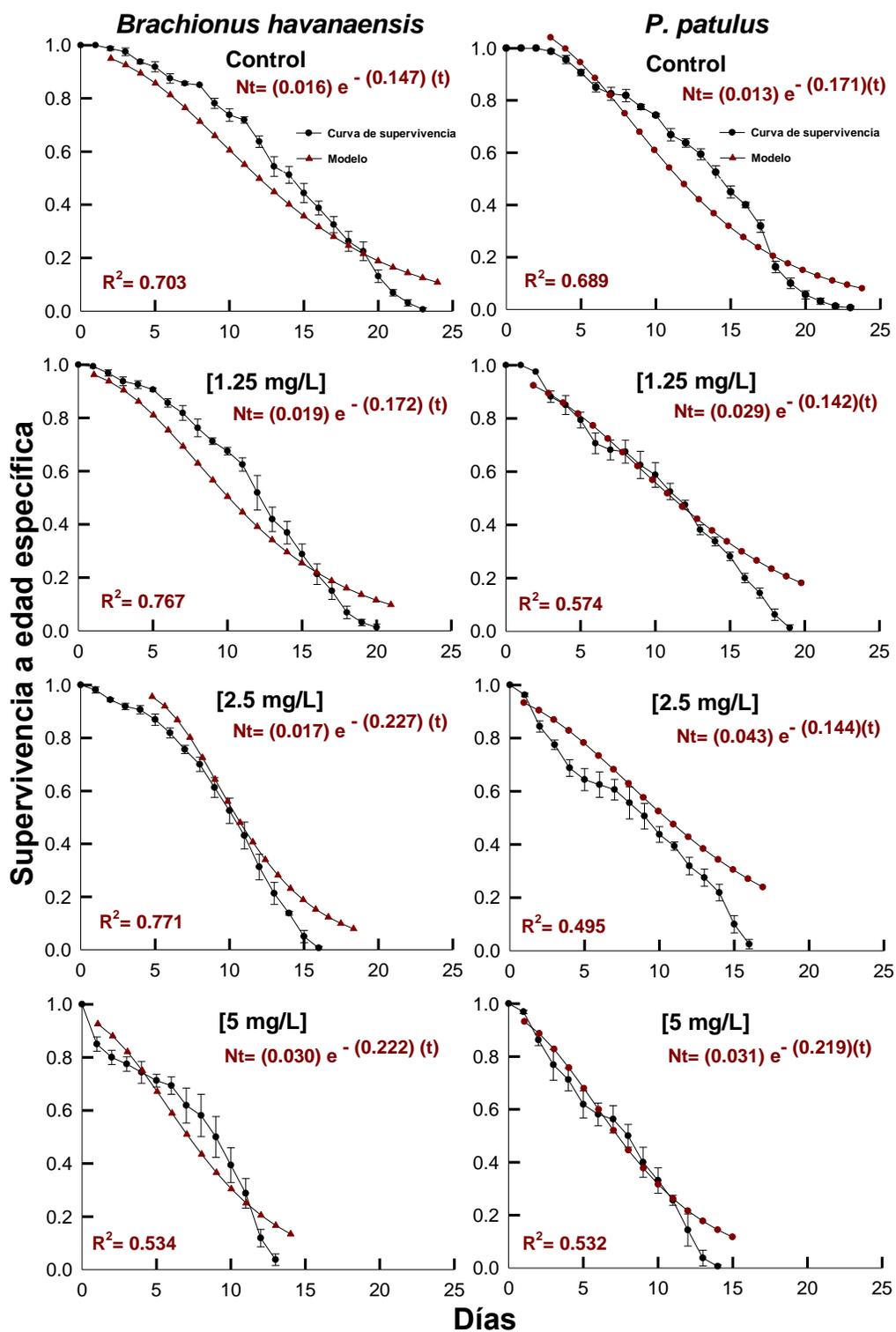


Figura 21.- Curvas de supervivencia (I_x) de las dos especies de brachiópidos expuestas a diferentes concentraciones del dodecil sulfato de sodio. Los valores indican el promedio \pm el error estándar de cuatro repeticiones (línea negra). La línea roja es la proyección de los datos utilizando la ecuación del modelo.

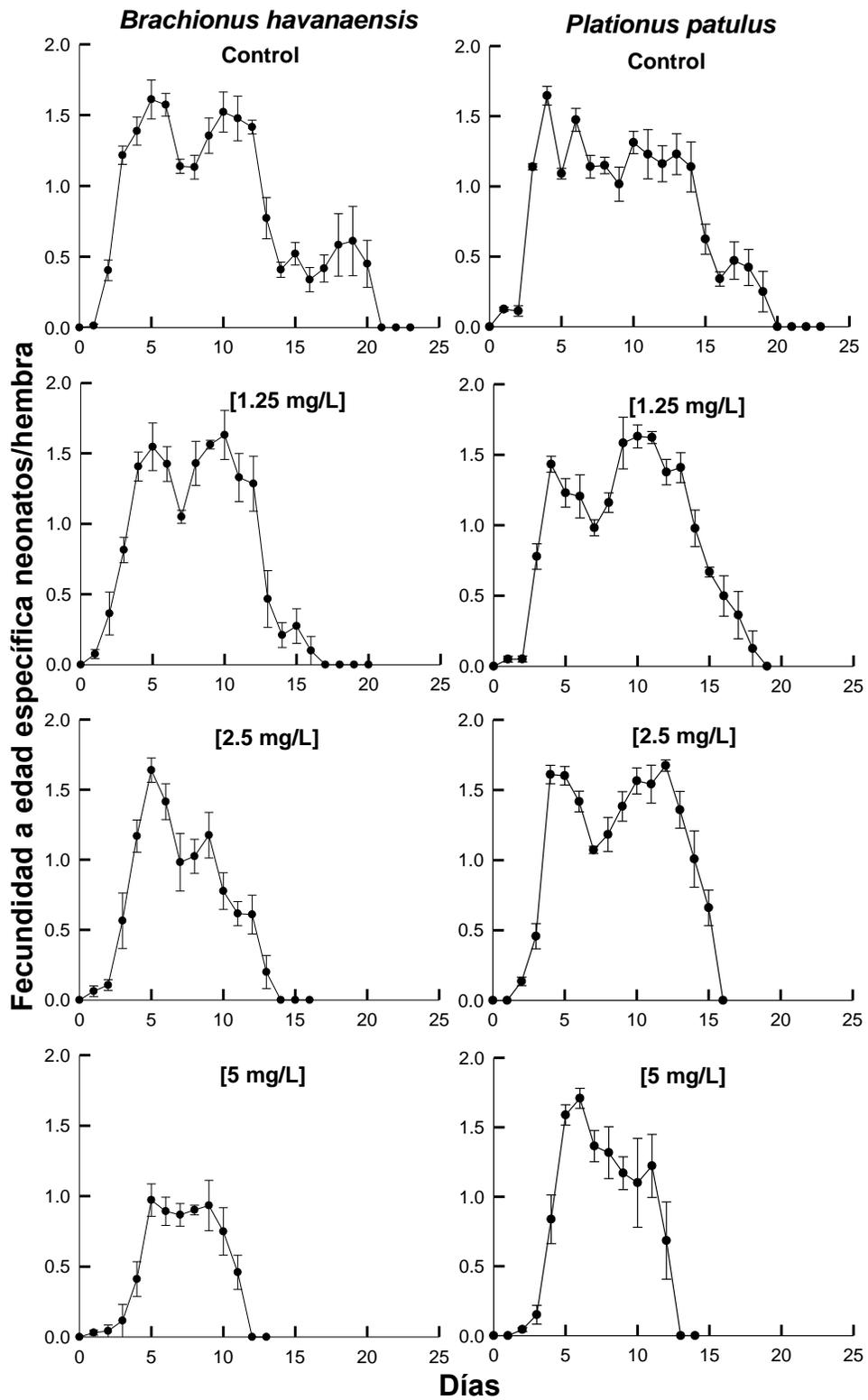


Figura 22.- Curvas de fecundidad (mx) de las dos especies de rotíferos expuestas al surfactante. Los valores indican el promedio \pm el error estándar de cuatro repeticiones.

Las gráficas de los parámetros de tabla de vida en general muestran un decremento en los tratamientos a los que les añadió dodecil sulfato de sodio (Figuras 23 y 24). Hubo diferencias significativas ($p < 0.05$, Tabla 5) en el promedio de vida de *Brachionus havanaensis* respecto al control y entre tratamientos. En *P. patulus* también hubo diferencias significativas ($p < 0.05$, Tabla 5) entre el control y tratamientos solo que las concentraciones de 2.5 y 5 no fueron diferentes entre sí ($p > 0.05$, Tabla 5).

En la esperanza de vida hubo una tendencia exactamente igual que en el promedio de vida para ambas especies denotando las diferencias significativas ($p < 0.05$, Tabla 5) de los tratamientos con el control.

La tasa de reproducción bruta en *B. havanaensis* tuvo diferencias significativas ($p < 0.05$, Tabla 5) con las concentraciones de 2.5 y 5 mg/L, pero no con 1.25 mg/L ($p > 0.05$, Tabla 5). En *P. patulus* únicamente hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$, Tabla 5) con la concentración más elevada de 5 mg/L.

B. havanaensis no tuvo diferencias entre el control y la concentración de 1.25, pero si respecto a 2.5 y 5 mg/L ($p < 0.05$, Tabla 5) para el parámetro de tasa de reproducción bruta. Por otro lado, *P. patulus* tuvo diferencias significativas entre el control y los tratamientos y además entre tratamientos ($p < 0.05$, Tabla 5).

Lo observado en el tiempo generacional de *B. havanaensis* fue que el control no tuvo diferencias con la concentración más baja (0.625 mg/L), pero si con las dos siguientes ($p < 0.05$, Tabla 5). En *Platyonus patulus* el tiempo generacional tuvo diferencias entre el control y la concentración de 5 mg/L ($p < 0.05$, Tabla 5).

El último parámetro evaluado fue la tasa intrínseca de incremento poblacional. *B. havanaensis* no tuvo diferencias significativas con 1.25 pero si con 2.5 y 5 mg/L ($p < 0.05$, Tabla 5). *P. patulus* si tuvo diferencias entre el control y los tratamientos ($p < 0.05$, Tabla 5).

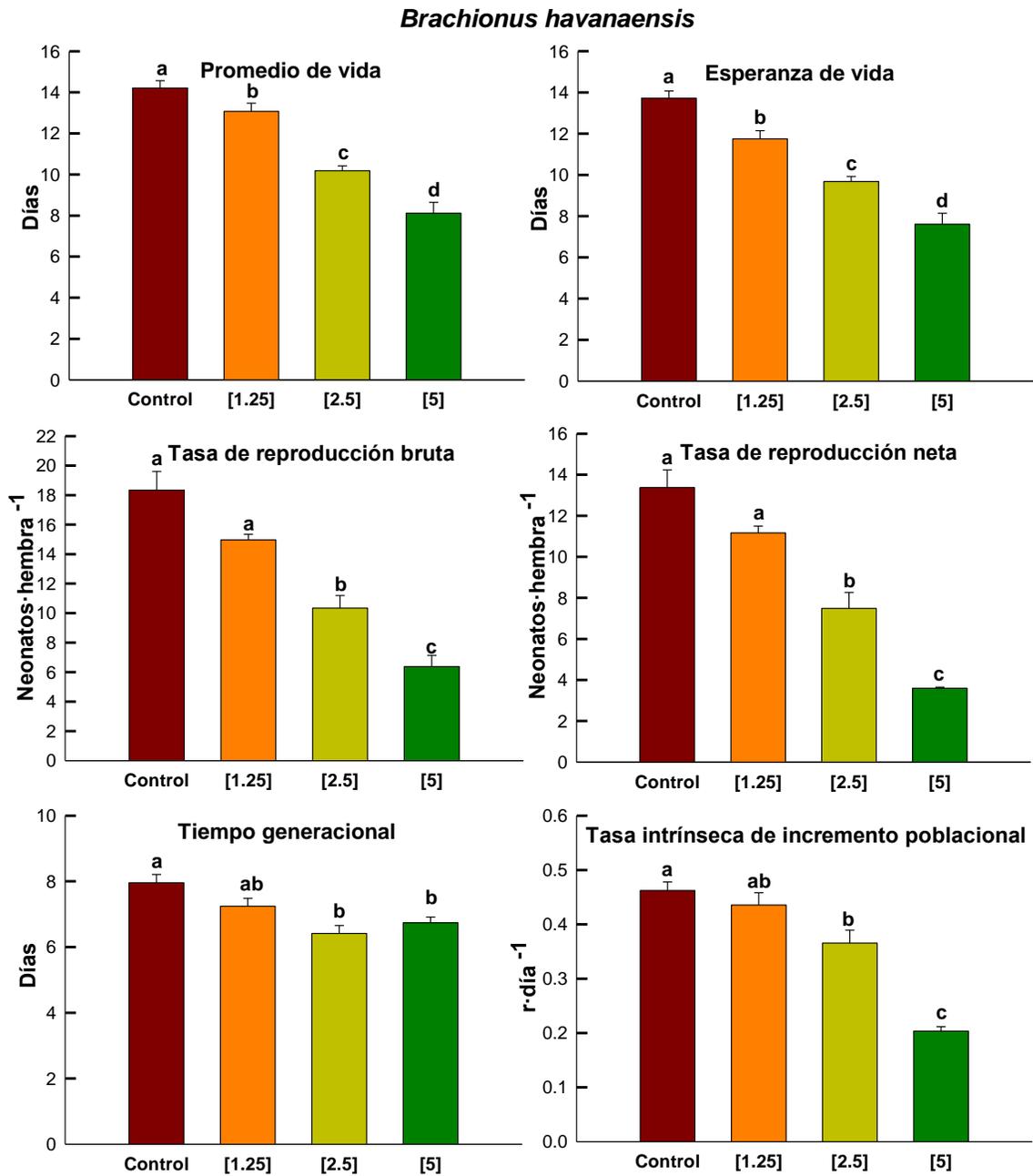


Figura 23.- Parámetros de tabla de vida de *Brachionus havanaensis* expuesto a distintas concentraciones del surfactante dodecil sulfato de sodio. Los valores muestran el promedio de cuatro repeticiones con su error estándar y las letras las diferencias entre tratamientos a través del análisis *post hoc* de Tukey.

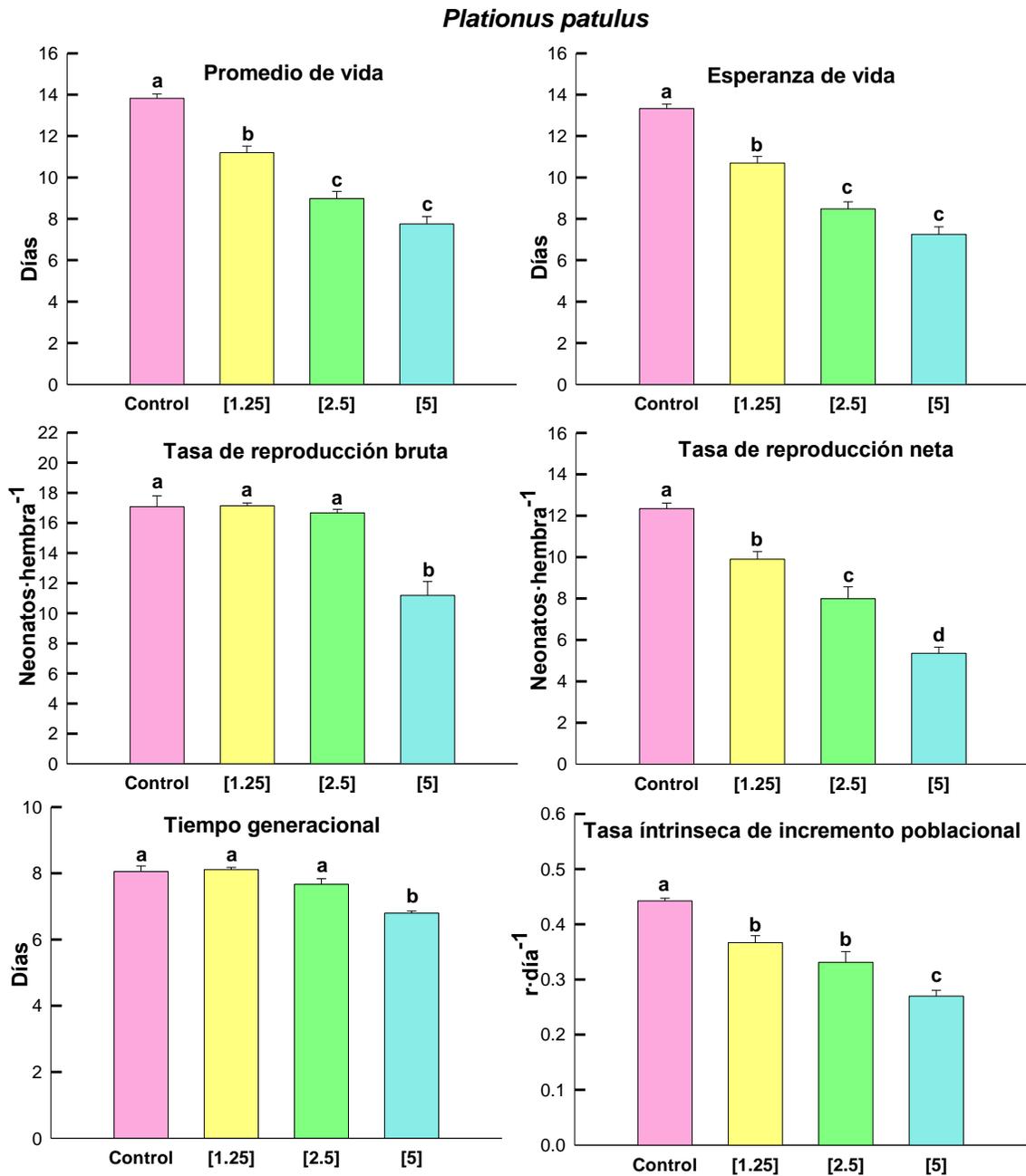


Figura 24.- Parámetros de tabla de vida de *Platonus patulus* expuesto a distintas concentraciones del dodecil sulfato de sodio. Los valores muestran el promedio de cuatro repeticiones con su error estándar y las letras las diferencias entre tratamiento a través del análisis *post hoc* de Tukey.

Tabla 5.- Variables de historia de vida de los rotíferos *B. havanaensis* y *P. patulus* expuestos a concentraciones subletales de DSS. Se denota el error correspondiente para cada tratamiento. Las letras distintas indican las diferencias significativas ($p < 0.05$) mientras que las letras iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0.05$). PV= promedio de vida, ex= esperanza de vida, TRB= tasa de reproducción bruta, TRN= tasa de reproducción neta, TG= tiempo generacional y r= tasa intrínseca de crecimiento poblacional.

Tratamientos (mg/L)	PV	ex	TRB	TRN	TG	r
<i>Brachionus havanaensis</i>						
Control	14.21±0.35 ^a	13.71±0.35 ^a	18.34±1.26 ^a	13.37±0.86 ^a	7.95±0.25 ^a	0.46±0.01 ^a
1.25	13.07±0.39 ^b	11.75±0.39 ^b	14.96±0.38 ^a	11.16±0.34 ^a	7.24±0.23 ^{ab}	0.43±0.02 ^{ab}
2.5	10.18±0.23 ^c	9.68±0.23 ^c	10.33±0.85 ^b	7.48±0.76 ^b	6.41±0.23 ^b	0.36±0.02 ^b
5	8.11±0.52 ^d	7.61±0.52 ^d	6.38±0.76 ^c	3.60±0.05 ^c	6.73±0.17 ^b	0.20±0.008 ^c
<i>Platyonus patulus</i>						
Control	13.82±0.21 ^a	13.32±0.21 ^a	17.07±0.72 ^a	12.33±0.27 ^a	8.05±0.17 ^a	0.44±0.004 ^a
1.25	11.19±0.31 ^b	10.69±0.31 ^b	17.13±0.18 ^a	9.9±0.37 ^b	8.11±0.06 ^a	0.36±0.01 ^b
2.5	8.98±0.34 ^c	8.48±0.34 ^c	16.66±0.24 ^a	7.98±0.57 ^c	7.66±0.17 ^a	0.33±0.01 ^b
5	7.75±0.36 ^c	7.25±0.36 ^c	11.18±0.91 ^b	5.35±0.30 ^d	6.79±0.06 ^b	0.26±0.01 ^c

10. Discusión

La ocurrencia de contaminantes en cuerpos de agua es cada vez más frecuente y afecta a nivel país y mundialmente pues tiene múltiples consecuencias a nivel ecológico y poblacional. Los contaminantes emergentes son nuevos productos que se consideran poco significativos debido a su baja concentración; sin embargo, se introducen constantemente al ambiente (Barceló y López, 2007), además al ser relativamente nuevos carecen de un estatus reglamentario y sus efectos sobre el medio ambiente y a la salud humana se desconocen (Deblonde *et al.*, 2011).

El Estado de México y la Ciudad de México son las entidades federativas más pobladas con 16 y 9 millones de habitantes respectivamente de acuerdo con el censo de población realizado en 2020 (INEGI, 2020). Además, el censo económico apuntó al Estado de México como mayor productor y el que posee el mayor número de unidades económicas (INEGI, 2019; DataMéxico.org, 2022) en fabricación de jabones, limpiadores y preparaciones de tocador y también lidera en fabricación de pinturas, recubrimientos y adhesivos. Debido a esta gran producción y masiva demanda existe la preocupación sobre su presencia cada vez mayor en los cuerpos de agua ya que se les considera sustancias peligrosas y con potencial tóxico debido a que son los contaminantes más detectados en ambientes terrestres y acuáticos (Jardak *et al.*, 2015). Los surfactantes aniónicos son los más utilizados en la industria a nivel mundial ocupando 50% de la producción (Orozco y Zapata, 2018). Por tal razón es de esperarse que surfactantes de tipo aniónico estén presentes en aguas residuales y/o en los cuerpos de agua ubicados en la zona metropolitana y en sus cercanías donde hay diversas industrias, así como asentamientos humanos.

Las aguas residuales domésticas e industriales son las principales fuentes en donde ingresan los surfactantes y la vía primaria para eliminarlas es a través de procesos de coagulación y floculación en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR's). Sin embargo, se sabe que las plantas de tratamiento muchas veces son ineficientes ya que no logran remover la mayoría de los contaminantes presentes en los efluentes (Hernando *et al.*, 2006). Aunado a esto, un tema que preocupa en el Estado de México es que ríos, arroyos y embalses son utilizados

como receptores de descarga de aguas residuales, pues del total anual el 87% se descarga directo en canales y ríos de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA, 2007).

La Norma Mexicana **NMX-AA-039-SCFI-2001** indica cómo realizar el método de azul de metileno para detectar la presencia de tensioactivos aniónicos y señala que la concentración de estos en el agua suele ser menor a 0.1 mg/L. Por otro lado, la Norma Oficial Mexicana **NOM-001-SEMARNAT-2021** establece los límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Indica los valores establecidos para la presencia de algunos contaminantes químicos, biológicos y metales pesados. Ambas normas no establecen cual debería ser la máxima concentración de surfactantes en el ambiente pese a que este tema va tomando fuerza en México y el mundo.

Concentraciones de surfactantes en el mundo han sido recopiladas por *Olkowska et al.* (2022) donde nos muestra que diversas concentraciones de surfactantes aniónicos, catiónicos y no iónicos se hallan en suelo de áreas forestales, urbanas, de agricultura, polvo de calle, sedimentos marinos, de ríos y de lagos en rangos de 0.00008 – 1,500,000 µg/kg. En lluvia de 0.001 – 0.95 µg/L; en nieve de 0.00774 – 0.182 µg/L; agua subterránea 500 – 1,300 µg/L; agua de llave 0.001 -193; agua marina 0.00226 - 911 µg/L; agua de río 0.00001 – 3955; lagos 0.69 - 7.83 µg/L y en aguas residuales 0.0061- 9340 µg/L. Estos datos provienen de países como Alemania, Suiza, Italia, Austria, Francia, Japón, China, Estados Unidos, Canadá y España.

Son escasos los datos de concentraciones en sistemas de agua en América Latina y México, esto puede deberse a que la determinación de surfactantes en diferentes tipos de muestras ambientales expone muchos problemas a la hora de realizarlo pues las muestras tienen una composición compleja, bajas concentraciones de tensioactivos de forma individual, variedad de estructuras químicas de tensioactivos aunado a su naturaleza anfifílica (*Olkowska, 2022*).

Se cree que los tensioactivos son inofensivos porque tienen una alta solubilidad cuando se hallan en agua, por tal motivo los surfactantes aniónicos se consideran biodegradables y no tóxicos (Vázquez *et al.*, 2020). Sin embargo, la literatura indica lo contrario ya que específicamente el dodecil sulfato de sodio tiene baja tasa de biodegradabilidad (aproximadamente de 3-5 días) (Hosseini *et al.*, 2007). Aunado a esto los surfactantes incrementan su toxicidad con el largo de la cadena de carbono. Y eso no es todo, si no que los surfactantes que poseen una cadena lineal (como el SDS) suelen presentar mayor toxicidad que los de cadena ramificada (Kimerle y Swisher, 1977).

Las concentraciones de dodecil sulfato de sodio podrían estar amenazando los cuerpos de agua al igual que a su biota. Para evaluar el impacto de los tóxicos se realizan bioensayos de toxicidad aguda o crónica (Sarma *et al.*, 2017), donde se emplean organismos acuáticos de fácil manejo, ciclo de vida corto, y que tienen una alta sensibilidad los tóxicos como los rotíferos (Snell y Joaquim, 2007). Especies de la familia Brachionidae se han utilizado como organismos de prueba en bioensayos crónicos mostrando sensibilidad en parámetros de tabla de vida (Araujo y McNair, 2007). Habría que añadir que otros dos aspectos importantes a la hora de trabajar con rotíferos; a) que el pequeño tamaño de estos permite evaluar la toxicidad en cantidades muy pequeñas del compuesto de prueba (Snell y Janssen, 1995) y b) que la dinámica poblacional de este grupo está bien caracterizada (Rico-Martínez *et al.*, 2016).

Como ya se mencionó anteriormente la ASTM tiene incluidos a *B. calyciflorus* y *B. plicatilis* como organismos de prueba con su respectiva técnica. *Brachionus havanaensis* es una especie planctónica común en América que ha sido utilizada en bioensayos de toxicidad (Sarma *et al.*, 2008). *Plationus patulus* es una especie comúnmente hallada en México que ha sido utilizada como organismo de bioensayo en la Asociación Americana de Salud Pública (APHA por sus siglas en inglés, 1999). En vista de que *B. calyciflorus* posee la mayoría de las publicaciones (63%) relacionadas con ecotoxicología (Rico-Martínez *et al.*, 2016) en esta investigación se prefirió utilizar estas especies en ensayos agudos, crónicos y análisis morfométricos.

Entre las pruebas agudas, la de concentración letal media es muy usual. *B. havanaensis* tuvo un valor de **CL₅₀, 24h** de 35.55 mg/L y *P. patulus* de 120.14 mg/L. Al consultar la literatura los valores difieren bastante dependiendo de la especie. Para comenzar *Pseudosida ramosa* tuvo **CL₅₀, 48h** de 11.1 mg/L (Freitas y Rocha, 2012). *B. calyciflorus* **CE₂₀, 48h** de 0.77 mg/L y **CE₅₀, 24h** de 1.4 mg/L (Versteeg *et al.*, 1997). El cladóceros *D. magna* **CE₅₀, 24h** de 61.8 mg/L y **CE₅₀, 48h** de 24.1 mg/L en este mismo estudio *D. brasiliensis* **CE₂₀, 24h** de 24.25 mg/L y **CE₅₀, 48h** de 15.4 mg/L (Vieira, 2019). A simple vista puede notarse que los rotíferos reportados en la literatura mostraron mayor sensibilidad; sin embargo, hay que recordar que puede haber distintas respuestas de susceptibilidad entre clones o cepas de la misma especie (Rico-Martínez *et al.*, 2016).

El crecimiento poblacional de rotíferos (así como el de otras especies) muestra una fase inicial de crecimiento, una fase exponencial y una fase de retardo o declive (Krebs, 1985). En ambas especies se observa esta tendencia en los controles, por el contrario, en los tratamientos parece ser que la fase de adaptación se alarga por más tiempo al igual que la fase exponencial e incluso no existe esta fase en la concentración más alta (10 mg/L) de *B. havanaensis* y en las concentraciones de 5,10 y 20 mg/L de *P. patulus* ya que cuando existe una fase de estrés no se presenta tendencia de crecimiento (Ramírez-Pérez y Sarma, 2008). En general las poblaciones de *B. havanaensis* presentan mayor densidad comparándolo con otras especies de la familia Brachionidae bajo las mismas condiciones (Pavón-Meza *et al.*, 2004). A menos que la población se encuentre bajo estrés ésta tendrá un crecimiento deficiente que afectará directamente la densidad poblacional máxima al igual que la tasa intrínseca de incremento poblacional (Gama-Flores *et al.*, 1999).

Aunque los valores de *r* no fueron significativos en la relación huevo-hembra de las especies, la tendencia de la relación es inversa cuando se contrasta con la densidad. Autores como Sarma *et al.* (2005) explican que esta relación es así porque al inicio del crecimiento hay suficiente espacio y recursos no limitados por lo cual los individuos se reproducen, en cambio una vez que hay una densidad alta en la población disminuye la producción de huevos. Esto es correcto para los controles

ya que fueron los que presentaron las más altas densidades, sin embargo, en los tratamientos hubo espacio y alimento disponible así que es probable que el dodecil sulfato de sodio haya provocado estrés a los rotíferos y por ello no hubo una relación significativa en la relación huevo-hembra. Es interesante considerando que otros autores como Luna-Andrade *et al.* (2002) obtuvieron resultados similares, pero sobre rotíferos marinos como *Brachionus plicatilis*; en su investigación ellos encontraron que el control presentó una relación inversa y a los tratamientos a los que se les aplicó cobre no presentaron esa relación y concluyeron que se debió al estrés.

La morfometría es el análisis cuantitativo de la forma y las covarianzas con la forma (MacLeod, 2017). La aplicación en rotíferos durante mucho tiempo han sido simples medidas de largo y ancho de la lórica sobre todo al tratarse del género *Brachionus*, lo cual se conoce como morfometría lineal pues ese es el principio básico donde se traza una línea entre dos segmentos. El desarrollo y adopción de métodos para analizar las coordenadas cartesianas de landmarks anatómicos han incrementado el uso de la morfometría geométrica (Slice, 2007).

El análisis de morfometría lineal ya ha sido aplicado a rotíferos por diferentes autores como Sarma *et al.* (2008) donde analizaron el efecto del cobre y del mercurio sobre *B. havanaensis*. En ese estudio hubo decremento en el crecimiento poblacional al estar en contacto con ambas sustancias, el ancho de los rotíferos se incrementó con el cobre y disminuyó con el mercurio, además en ambos las espinas posterolaterales se redujeron en tamaño. Otro estudio en el que se visualizan claras afectaciones en la morfología es el de Alvarado-Flores *et al.* (2015). Ellos utilizaron vinclozolin (fungicida) sobre *Brachionus calyciflorus* a concentraciones de 0-18 mg/L de acuerdo con sus resultados el compuesto aumentó la producción de machos, hembras amícticas, hembras mícticas, huevos partenogénéticos y huevos sexuales no fertilizados. Además, provocó múltiples anomalías en las hembras en concentraciones de 0.4 a 5.6 mg/L. Destacaron el aumento del vitelario, enanismo, espinas torcidas, apariencia cuadrada del cuerpo, mástax deformado, cutícula deformada, pies unidos a la cabeza, pie vestigial/sin pie, tres dedos en el pie, cuerpo

curvo y espinas dorsales deformadas, así como diferencias en el largo y ancho del cuerpo, por lo que este compuesto tiene un fuerte potencial de disruptor endocrino.

El crecimiento corporal proporcionado de los rotíferos indica que tienen un crecimiento de tipo isométrico. Sokal y Rohlf (1969) señalan que cuando el cociente de regresión es igual a uno, existe un crecimiento de tipo isométrico. La relación largo-ancho de la lórica en la literatura se ha analizado mediante regresión lineal y obteniendo el coeficiente de correlación (r). En este trabajo los valores de r de los controles son cercanos a 1, mientras que los tratamientos el valor es mucho más bajo. En los organismos el tamaño es un aspecto importante ya que su valor y/o los cambios en este afectan el funcionamiento de ellos en cuanto a biomecánica, fisiología, ecología (Vasallo, 2000). No es de extrañarse que la morfología de los rotíferos se modifique cuando están bajo estrés ya sea por factores bióticos o abióticos (García *et al.*, 2007). Otro aspecto afectado fue la morfometría de ambas especies de rotíferos pues el tamaño del cuerpo del individuo se vuelve más pequeño al estar expuesto al estrés de algún tóxico (Sarma *et al.*, 2008).

La supervivencia es uno de los principales atributos en el que los ecotoxicólogos observan el efecto de una sustancia. En este estudio ambas especies de rotíferos tratados con el surfactante disminuyeron en supervivencia como lo demuestra su tasa de mortalidad (Figura 21). Cuando *D. magna* estuvo expuesta a este compuesto se redujo su supervivencia y se observó una relación de interacción con el alimento suministrado (Martínez-Jerónimo, 1994). Se sabe que sustancias tóxicas causan mortalidad desde el inicio y alteran el tipo de curva de supervivencia (Snell y Joaquim-Justo, 2007).

La fecundidad de ambas especies de rotíferos se vio afectada en el presente trabajo pues el periodo reproductivo se redujo al igual que los neonatos por hembra. El dodecil sulfato de sodio también afectó la fecundidad de *P. ramosa* al estar expuesta durante 21 días (Freitas y Rocha, 2012). Los autores indican que las afectaciones principales en el cladóceros fueron envenenamiento directo en la cámara de cría y disminución en la producción de huevos debido al estrés fisiológico.

La tabla de vida de los organismos proporciona información de los patrones de mortalidad y supervivencia, pero además brinda muchos más datos específicos para cada parámetro. Por ejemplo, el promedio de vida en los controles de ambas especies es de ~14 días, cuando aumenta la concentración del surfactante este valor disminuye (Figuras 23 y 24), lo cual claramente nos indica la afectación en la duración de vida de los individuos y lo mismo se podría decir de la esperanza de vida (cuanto tiempo hacia el futuro se espera que un organismo viva) lo que denota un efecto perjudicial en la cohorte de los rotíferos.

El fitness de una población es la capacidad de los individuos de perpetuar sus genes (Pianka, 2011). Por lo tanto, esto está directamente relacionado con los parámetros de tasa de reproducción bruta y neta. En la tasa de reproducción bruta (número promedio de descendientes que produciría un organismo sin considerar el impacto mortalidad) el control presentó un valor de ~18 neonatos para *B. havanaensis* y solo hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) con las concentraciones de 2.5 y 5 mg/L donde este valor estuvo entre 6 y 10 neonatos. En *P. patulus* el valor de tasa de reproducción bruta fue ~17 neonatos y no varió con dos de los tratamientos, pero si con la más alta ya que este valor fue de ~11 neonatos. De manera similar la tasa de reproducción neta (número promedio de crías de edad cero, producidas por un organismo durante toda su vida) o también denominada tasa de reemplazo de la población (Pianka, 2011) fue de ~13 neonatos en *B. havanaensis* y ~12 en *P. patulus* en cambio en los tratamientos de ambas especies los valores disminuyeron. Es muy probable que el dodecil sulfato de sodio afecte directamente la reproducción de los rotíferos y por lo tanto su descendencia.

El tiempo generacional (periodo medio que transcurre entre el nacimiento de los padres y el de sus descendientes) fue de aproximadamente 8 días para ambas especies, este varía un poco en los tratamientos. Caso contrario es el de la tasa intrínseca de incremento poblacional (tasa instantánea de cambio del tamaño de la población por individuo) el cual fue aproximadamente de 4 r/día en los controles y disminuyó en los tratamientos, este atributo (r) se considera como uno de los parámetros más sensibles en estudios demográficos ya que integran supervivencia y reproducción (Stearns, 1992).

En farmacología el dodecil sulfato de sodio se utiliza para administrar fármacos ya que mejora la absorción de sustancias químicas a través de la piel, la mucosa gastrointestinal y otras membranas (Singer y Tjeederma, 1993). La forma en la que el surfactante pudo actuar en los rotíferos fue que se absorbió a las membranas y luego aumentó la permeabilidad del rotífero, pues algo similar se ha reportado en peces afectando sus branquias y alterando sus procesos respiratorios (Mason,1981). Los resultados muestran los efectos negativos que el tensioactivo tuvo sobre los rotíferos, sin embargo, habría que considerar algún estudio de toxicología que integre además la interacción del surfactante con otros componentes químicos que están presentes en la formulación de cualquiera de sus productos, ya que se ha demostrado que los detergentes (formulación completa) fueron más tóxicos que el ingrediente activo aislado (UC-Peraza y Delgado-Blas, 2012). En el presente algunas empresas se han pronunciado a favor del ambiente creando surfactantes biogénicos los cuales al día de hoy no se han considerado totalmente seguros pues algunos como la surfactina pueden tener la habilidad de causar toxicidad en organismos vivos (Vieira *et al.*, 2019).

11. Conclusiones

- La especie *B. havanaensis* mostró mayor sensibilidad al dodecil sulfato de sodio en la prueba aguda y *P. patulus* presentó mayor afectación en la prueba crónica de crecimiento poblacional.
- En la tabla de vida ambas especies parecen tener un comportamiento similar y presentar diferencias significativas entre el control y los tratamientos en la mayoría de las variables.
- Al incrementar la concentración de surfactante en el medio, el efecto aumentó considerablemente así que se considera es denso-dependiente.
- Aparte de los aspectos demográficos, otros aspectos tales como la morfometría y la morfología también resultaron afectados.
- Los resultados mostrados en este trabajo demuestran el potencial tóxico del surfactante aniónico sobre organismos acuáticos. Por tal motivo se sugiere medir las concentraciones de estas sustancias en los cuerpos de agua y monitorear sus efectos a corto, mediano y largo plazo.

12. Literatura citada

- Anastácio, P. M., Holten Lüzhöft, H. -C., Halling-Sørensen, B. y Marques, J. C. (2000). Surfactant (Genapol OX-80) toxicity to *Selenastrum capricornutum*. *Chemosphere*, 40, 835-838.
- Alvarado-Flores, J., Rico-Martínez, R., Adabache-Ortíz, A. y Silva-Briano, M. (2015). Morphological alterations in the freshwater rotifer *Brachionus calyciflorus* Pallas 1766 (Rotifera: Monogononta) caused by vinclozolin chronic exposure. *Ecotoxicology*, 24(4), 915-925.
- Álvarez, M. (2004). La industria de los surfactantes: Tendencias mundiales y perspectivas para Colombia. *Palmas*, 25, tomo I, 340-353.
- American Society of Testing Materials (ASTM) E1440-91. (2012). *Standard Guide for Acute Toxicity Test with the Rotifer Brachionus*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2012. DOI: 10.1520/E1440-91R12. www.astm.org
- American Public Health Association (APHA). (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed. Washington, DC: American Public Health Association.
- Araujo, A. y McNair, J. Individual - and population-level effects of antibiotics on the rotifers, *Brachionus calyciflorus* and *B. plicatilis*. (2007). *Hydrobiologia*, 593, 185–199.
- Argese, E., Marcomini, A., Miana, P., Bettiol, C. y Perin, G. (1994). Submitochondrial particle response to linear alkylbenzene sulfonates, nonylphenol polyethoxilates and their biodegradation derivatives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 13, 737–742.
- Baker y Grant, (2018). *Sodium lauryl sulfate profile*. Active ingredient eligible for minimum risk pesticide use. Integrate Pest Management Program, Cornell Cooperative Extension: Cornell University, Geneva NY.
- Barceló, D. y López, M. J. (2007). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. *Jornadas de presentación de resultados: el estado ecológico de las masas de agua. Panel Científico-Técnico de seguimiento de la política de aguas*, Sevilla.
- Becerril Bravo, J. E. (2009). Contaminantes emergentes en el agua. *Revista Digital Universitaria*, 10 (8), Consultado el 30 de noviembre de 2020 en el portal: <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art54/int54-2.htm>
- Borowitzka, M.A., y Borowitzka, L.J. (1988). *Micro-Algal Biotechnology*. Cambridge University: London.
- Cowan-Ellsberry, C., Belanger, S., Dorn, P., Dyer, S., McAvoy, D., Sanderson, H., Versteeg, D., Ferrer, D. y Stanton, K. (2013). Environmental Safety of the

Use of Major Surfactant Classes in North America. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(17), 1893-1993.

DataMéxico.org. (2022). Consultado el 08 de abril de 2022 en el portal: <https://datamexico.org/es/profile/industry/soap-cleaning-compound-and-toilet-preparation-manufacturing>

Deblonde, T., Cossu-Leguille, C., y Hartemann, P. (2011). Emerging pollutants in wastewater: A review of the literature. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 214(6), 442–448.

Edmondson, W. T. (1968). A graphical method for evaluating the use of the egg ratio for measuring birth and death rates. *Oecologia* 1,1-37. Edser, C. (2006) Latest market analysis. *Focus Surfactants*, 5, 1–2.

Finney, D.J. (1971). *Probit Analysis*. Cambridge University Press: London.

Freitas, E. C. y Rocha, O. (2012). Acute and chronic effects of atrazine and sodium dodecyl sulfate on the tropical freshwater cladoceran *Pseudosida ramosa*. *Ecotoxicology*, 21,1347–1357.

Gama-Flores, J. L., Sarma, S.S.S. y Fernández Araiza, M. A. (1999). Combined effects of *Chlorella density* and methyl parathion concentration on the population growth of *Brachionus calyciflorus* (Rotifera). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 62(6), 769-755.

García, C.E., Chaparro-Herrera, D.J., Nandini, S. y Sarma, S.S.S. (2007). Life history strategies of *Brachionus havanaensis* subject to kairomones of vertebrate and invertebrate predators. *Chemistry and Ecology*, 23(4), 303-313.

García-Gómez, C., Gortáres-Moroyoqui, P. y Drogui P. (2011). Contaminantes emergentes: efectos y tratamientos de remoción. *Revista Química Viva*, 10 (2), 96-105.

Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción+Limpia*, 7 (2), 52-73.

Hernando, M. D., Mezcuca, M., Fernández-Alba, A. R. y Barceló, D. (2006). Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments. *Talanta*, 69(2), 334-342.

Hosseini, F., Malekzadeh, F., Amirmozafari, N. y Ghaemi, N. (2007). Biodegradation of anionic surfactants by isolated bacteria from activated sludge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 4(1), 127-132.

INEGI. (2014). Industria química. Censos económicos 2014.

- INEGI (2019). Censos económicos 2019. Consultado el 08 de abril de 2022 en el portal: <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/>
- INEGI (2020). Censo de población y vivienda 2020. Consultado el 08 de abril de 2022 en el portal: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Resultados_generales
- Islas, D. J., Medina, S. A., Noel, J. y Rodríguez, G. (2010). Propiedades, aplicaciones y producción de biotensoactivos, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 26(1), 65–84.
- Ivanović, T. y Hrenović, J. (2009). Surfactants in the environment. *Arhiv Za Higijenu Rada I Toksikologiju-Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 61, 95-110.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2019). Consultado el 07/02/2020 en el portal: <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM09DF/delegaciones/09013a.html>
- Janssen, C. R., Ferrando-Rodrigo, M. D. and Persoone, G. (1993). Ecotoxicological studies with the freshwater rotifer *Brachionus calyciflorus*. I. Conceptual framework and applications. *Hydrobiologia*, 255, (256), 21-32.
- Jardak, K., Drogui, P. y Daghri, R. (2015). Surfactants in aquatic and terrestrial environment: occurrence, behavior, and treatment processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(4), 3195-3216.
- Jiménez Islas, D., Medina Moreno, S. A. y Gracida Rodríguez, J. N. (2010). Propiedades, aplicaciones y producción de biotensoactivos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26 (1), 65-84.
- Kimerle, R.A. y Swisher, D.R. (1977). Reduction aquatic toxicity of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) by biodegradation. *Water Research*, 11, 225-233.
- Kline, E.R., Figueroa, R.A., Rodgers Jr., J.H. y Dorn, P.B. (1996). Effects of a nonionic surfactant (c14–15 AE-7) on fish survival, growth and reproduction in the laboratory and in outdoor stream mesocosms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 15(6), 997-1002.
- Koste, W. (1978). *Rotatoria. Die Radertiere Mitteleuropas*. Borntraeger: Berlin.
- Krebs, C. J. (1985). Ecology. *The experimental analysis of distribution and abundance*. Harper & Row: New York.
- Lewis, M. (1991). Chronic and sublethal toxicities of surfactants to aquatic animals. A review and risk assesment. *Water Research*, 25 (1), 101-113.

- Luna-Andrade, A., Aguilar-Duran, R., Nandini, S. y Sarma, S. S. S. (2002). Combined effects of copper and microalgal (*Tetraselmis suecica*) concentrations on the population growth of *Brachionus plicatilis* Müller (Rotifera). *Water, Air and Soil Pollution*, 141, 143-153.
- Martínez-Jerónimo, F. y García-González, R. (1994). Effect of food concentration on the chronic toxicity of sodium dodecyl sulphate to *Daphnia magna*. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 3, 247-253.
- Mason, C. (1981). *Biology of freshwater pollution*. Longman: Nueva York.
- MacLeod, N. (2017). Morphometrics: History, development methods and prospects. *Zoological Systematics*, 42(1), 4-33.
- Merck. (2015). *The Merck Index Online*. Royal Society of Chemistry: Cambridge, UK.
- Myers, D. (2005). *Surfactant science and technology*. John Wiley & Sons.
- Nivón Ramírez, D. (2019). *Estudio Teórico-experimental de la formación de agregados en disolución acuosa del dodecil sulfato de sodio*. Tesis para obtener el título de Químico. Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
- Norma Oficial Mexicana, (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
- Norma Mexicana (2001). NMX-AA-039-SCFI-2001. Análisis de aguas - determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-039-1980)
- Olkowska, E., Polkowska, Z. y Namiesnik, J. (2022). Analytics of Surfactants in the Environment: Problems and Challenges. *Chemical Reviews*, 1(111), 5667-5700.
- Orozco M, E. E. y Zapata M., J. D. (2018). *Evaluación de la síntesis de surfactantes a partir de la glucosidación de aceite vegetal de soya*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería Química, Valencia.
- Ospina Chávez, J. A. (2012). *Diseño, síntesis y caracterización fisicoquímica de surfactantes derivados de γ -aminoácidos preparados a partir de (-)-verberona*. Tesis para obtener el título de maestría en Experimentación química. Barcelona.
- Parra, J. G., Array, Y. R., Alcalá, J. A. y Rodríguez, G. (2014). Efecto del dodecil sulfato de sodio (SDS) sobre el espesor de película y la orientación molecular

del agua en los sistemas agua/1-pentanol y agua/1-hexanol. *Faraute*, 9 (1), 1-10.

- Pavón Meza, E. L., Sarma, S. S. S. y Nandini, S. (2004). Combined effects of food (*Chlorella vulgaris*) concentration and temperature on the population growth of *Brachionus havanaensis* (Rotifera: Brachionidae). *Journal of Freshwater Ecology*, 19 (4), 521-530.
- Pianka, E. R. (2011). *Evolutionary Ecology*. Harper and Row: New York.
- Pinheiro, L. y Faustino, C. (2017). Amino acid-based surfactants for biomedical applications. En Najjar, R. (Ed.). *Application and Characterization of surfactants*. InTech: Croacia, 207-232.
- Ramírez-Duarte, W. F., Rondón-Barragán, I. S. y Eslava-Mocha, P. R. (2005). Surfactantes asociados a herbicidas: Efectos sobre organismos acuáticos, *Revista Orinoquia*, 9, (2), 45-59.
- Ramírez-Pérez, T. y Sarma, S.S.S. (2008). Combined effects of heavy metal (Hg) concentration and algal (*Chlorella vulgaris*) food density on the population growth of *Brachionus calyciflorus* (Rotifera: Brachionidae). *Journal of Environmental Biology*, 29(2): 139-142.
- Ramírez Romero, P. y Mendoza Cantú, A. (2008). *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La experiencia en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología.
- Rabinovich, J. E. (1984). Mortalidad y tasas de vida. En: *Introducción a la ecología de poblaciones animales*. Editorial Continental. México. 105-135.
- Ray, S. (2016). Levels of Toxicity Screening of Environmental Chemicals Using Aquatic Invertebrates - A Review. En Larramendy, M. L. y Soloneski, S. (Eds.). *Invertebrates-Experimental models in toxicity screening*, InTech: Croacia.
- Rico-Martínez, R. Arzate-Cárdenas, M. A., Robles-Vargas, D., Pérez-Legaspi, I. A., Alvarado-Flores, J. y Santos-Medrano, G. E. (2016). Rotifers as Models in Toxicity Screening of Chemicals and Environmental Samples. En Larramendy, M. L. y Soloneski, S. (Eds.). *Invertebrates-Experimental models in toxicity screening*, InTech: Croacia.
- Repetto, M. y Sanz, P. (1993). *Glosario de términos toxicológicos*. España.
- Salager, J. L. (1992). *El mundo de los surfactantes*. Ponencia, Cuaderno FIRP S311-A. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química.
- Salager, J. L. y Fernández, A. (2004). *Surfactantes, III. Surfactantes aniónicos*. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería Química.

- Sarma, S. S. S. (2000). The use of rotifers for ecotoxicological studies in Mexico. En Ríos-Jara, Juárez-Carrillo, Pérez-Peña, M., López-Uriarte, E., Robles-Jarero, E. G., Hernández-Becerril D. U., y Silva Briano (Eds.). *Estudios sobre plancton en México y el Caribe (8-11)*. México: Sociedad Mexicana de Planctología y Universidad de Guadalajara.
- Sarma, S. S. S., Gulati, R.D., Nandini, S. (2005). Factors affecting egg-ratio in planktonic rotifers. *Hydrobiologia*, 546, 361–373.
- Sarma, S. S. S., Brena-Bustamante, P. y Nandini, S. (2008). Body size and population growth of *Brachionus patulus* (Rotifera) in relation to heavy metal (copper and mercury) concentrations. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43(5): 547-553.
- Sarma, S. S. S. y Nandini, S. (2017). *Rotíferos mexicanos*. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Iztacala: México.
- SEDEMA. Gobierno del Estado de México. (2007). *Diagnóstico ambiental del estado de México por regiones hidrográficas 2007*. Estado de México.
- SEMARNAT, (2016). Agua. *Informe de la situación del medio ambiente en México 2015. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Singer y Tjeederma (1993). Fate and Effects of the Surfactant Sodium Dodecyl Sulfate. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 133, 95-149.
- Slice, D. E. (2007). Geometric Morphometrics. *Annual Review of Anthropology*. 36, 261–281.
- Snell, T. W. y Janssen, C. R. (1995). Rotifers in ecotoxicology: a review. *Hydrobiologia*, 313/314, 231-247.
- Snell, T. y Joaquim-Justo, C. (2007). Workshop on rotifers in ecotoxicology. *Hydrobiologia*, 593,227–232.
- Sokal, R. R. y Rohlf, F. J. (1969). *Biometry*. W. H. Freeman and Co.: New York.
- Stearns, S. (1992). *The Evolution of Life Histories*. Oxford University Press: New York.
- Stuart, M., Lapworth, D., Crane, E. y Hart, A. (2012). Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. *Science of the Total Environment*, 416, 1-21.
- Stoyanov, S.D., Rehage, H. y Paunov, V.N. (2003). Novel surface tension isotherm for surfactants based on local density functional theory. *Physical Review Letters*, 91, 086102.1-086102.4.
- Tadros, F. T. (2005). *Applied Surfactants: principles and applications*. Federal

Republic of Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

- Tadros, T. F. (2014). *An Introduction to Surfactants*. Berlin: De Gruyter.
- Toro Ibacache, M. V., Manriquez Soto, G. y Suazo Galdames, I. (2010). Morfometría Geométrica y el Estudio de las Formas Biológicas: De la Morfología Descriptiva a la Morfología Cuantitativa. *International Journal of Morphology*, 28(4), 977-990.
- UC-Peraza, R. G. y Delgado-Blas, V. H. (2012). Determinación de la concentración letal media (CL₅₀) de cuatro detergentes domésticos biodegradables en *Laeonereis culveri* (Webster 1879) (Polychaeta: Annelida). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(2), 137-144.
- Ying, G. G. (2006). Fate, behaviour and effects of surfactants and their degradation products in the environment. *Environment International*, 32, 417-31.
- Vasallo, A. I. (2000). Alometría e isometría en varias especies de roedores caviomorfos, con comentarios sobre la estructura del aparato masticatorio del orden rodentia. *Mastozoología Neotropical / Journal of Neotropical Mammalogy*, 7(1), 37-46.
- Vázquez, F. J.; Condomiña, C. B.; Aronzon, C. (2020). Contaminantes ambientales emergentes: Toxicidad del lauril éter sulfato de sodio y el salbutamol sobre larvas de *Rhinella arenarum* y semillas de *Lactuca sativa*. *Perspectivas: Revista Científica de la Universidad de Belgrano*, 3(1), 116-127.
- Vieira Santos, V. S., Silveira, E. y Barbosa Pereira, B. (2019). Ecotoxicological assessment of synthetic and biogenic surfactants using freshwater cladoceran species. *Chemosphere*, 221, 51-525.
- Villavicencio, D. (2009). La innovación en la industria química en México durante la última década. En Villavicencio Carbajal, D. H. y López de Alba, P. L. (coords.). *Sistemas de Innovación en México: regiones, redes y sectores*. México: Plaza y Valdés, 89-116.
- Versteeg, D., Stanton, D., Pence, M. A. y Cowan, C. (1997). Effects of surfactants on the rotifer *Brachionus calyciflorus* in a chronic toxicity test and in the development of QSARS. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16 (5), 1051–1058.
- Warne, M. St. J. y Schifko, A. D. (1999). Toxicity of Laundry Detergent Components to a Freshwater Cladoceran and Their Contribution to Detergent Toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 44, 196-206.
- Yan, H., Guo, X. L., Yuan, S. L. y Liu, C. B. (2011). Molecular dynamics study of the effect of calcium ions on the monolayer of SDC and SDS surfactants at the vapor/liquid interface. *Langmuir*, 27(10), 5762-5771.
- Zelditch, M. L., D. L. Swiderski, H. D. Sheets y W. L. Fink. (2004). *Geometric morphometrics for biologists: a primer*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.