



Universidad Nacional Autónoma de
México



Facultad de estudios superiores Zaragoza

Estudio ecofisiológico del copépodo
Leptodiptomus cf. sicilis a cambios de la
composición iónica y salinidad

TESIS

Que para obtener el título de biólogo presenta: **Ulises
Leonardo Sergio Hernández Isunza**

Director: Dr. Justo Salvador Hernández Avilés.

CDMX, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mis padres, Patricia y Sergio

Uno de mis primeros grandes logros....

At the very first sound

En el primer sonido

There was just light

Solamente había luz

And then, a storm

Y después, una tormenta

Of time and space

De tiempo y espacio

Just came and struck

Solo llegó y golpeó

Created our time

Creó nuestro tiempo

In water life

Vida en el agua

We understand it just only began

Entendimos que solo había comenzado

(Fragmento de canción: From the sky, Intérprete: Gojira, Álbum: From mars to sirius, 2005)

Agradecimientos Institucionales

A mis profesores de la carrera, todos ellos, gracias por compartir su conocimiento conmigo.

A mis sinodales de tesis: Dr. Guillermo Blancas Arroyo, Dr. Justo Salvador Hernández Avilés, M. en C. Eloísa A. Guerra Hernández, Biol. José Luis Guzmán y al Dr. Jorge E. Valdivia Anistro. Gracias por prestarme su tiempo para las correcciones de este trabajo, mejorarlo y hacerlo posible.

Por los recursos financieros otorgados a través del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PE216016) para la realización del trabajo de campo y presentación de resultados obtenidos en eventos académicos.

Agradecimientos personales

Empezaré por todas aquellas personas que me han acompañado hasta este momento y que quizás, por diversas razones o circunstancias he perdido contacto con ellos, sus nombres tal vez no los mencione aquí, pero en mi memoria aun guardo esos buenos momentos. También aclaro que el orden no es equiparable al cariño que les tengo y que si alguno no encuentra su nombre o alias no significa que no lo aprecie de algún modo.

Primero mi familia, mi madre y mi padre por su sustento, aunque a veces sé que no lo merecía, mis hermanas por todo lo que hemos pasado juntos, mis sobrinos a quienes les tengo un cariño muy especial, a mi padrastro y hermanastro, aunque el 99% de las situaciones no coincidamos, ¡muchísimas gracias!

A Valeria quien me dio apoyo en la mayoría de los años de la carrera y con quien compartí momentos inolvidables, por quedarse en esos momentos críticos, de igual manera a su familia de quien recibí apoyo en momentos difíciles.

Mis amigos: Hebor con quien siempre conté y por esos diagramas, Zatan, Jovas, Vicky, Iván, Omar, Chucho, Jebus, El Joy, El asiático del Pato, Frodo, Itzamaray, Ramiro, Compi, Angy, Fernanda, Los altotes: Yahir e Iván, Atari, El Emo gordo, Chakal, Ofir, Lalo, El puchin del Mario, Puas, Mija, Dulce, Eyra, Paco, Monse, Gabi Mantecón, Yazz, Poncho, Claudia, Isis, Kalid, Los nuevos: Moy, Irving y David; y todos aquellos con los que pase momentos agradables en el curso de la carrera, pero quizás no hemos congeniado bastante o los he pasado por alto. ¡¡GRACIAS!! Vamos por más vivencias.

Por último, a mi director de tesis, Dr. Salvador “Chavita”, por su tiempo, paciencia y amistad, a pesar de mis defectos y actitudes; por enseñarme que cada día se puede ser mejor, a no detenerme y que lo más hermoso en la naturaleza son los casos excepcionales.

RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN. Interacción ambiente-organismo.....	9
Adaptaciones frente a los cambios de salinidad, osmorregulación (osmoconformadores y osmorreguladores).....	11
Salinidad y composición iónica, el caso de la cuenca oriental mexicana.....	13
Zooplancton y su importancia, <i>Leptodiatomus cf. sicilis</i> como modelo biológico.....	18
ANTECEDENTES	22
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	27
JUSTIFICACIÓN	28
HIPÓTESIS	29
OBJETIVOS	30
Objetivo general:.....	30
Objetivos particulares:.....	30
ZONA DE ESTUDIO (Cuenca Oriental Mexicana).....	31
MÉTODO	40
Trabajo de campo:.....	40
Cautiverio de los organismos y tratamiento del agua:.....	40

Diseño experimental a largo plazo.....	41
Diseño experimental a corto plazo:	42
Trabajo de gabinete:	43
RESULTADOS	45
Diseño experimental a largo plazo:.....	45
Diagrama de Piper y Schoeller.....	51
Experimento a corto plazo	63
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
CONCLUSIONES	73
REFERENCIAS	74
ANEXO FOTOGRÁFICO	82

RESUMEN

En los lagos Atexcac, La Preciosa, Quechulac y El Carmen pertenecientes a la cuenca endorreica Oriental, se distribuye una especie de copépodo (*Leptodiptomus cf. sicilis*), que habita en los mismos, bajo diferentes condiciones de salinidad y composición iónica. En el lago Atexcac se encuentra una población de esta especie que presenta una adaptación local a una mayor salinidad, por lo que se postula está en un proceso de especiación ecológica. En esta investigación se planteó evaluar experimentalmente la respuesta ecofisiológica de dicha población a diferente salinidad y composición iónica, hipotetizando, que como respuesta a los cambios de ambas condiciones la población presentara una variación diferencial en su supervivencia. Se colectaron especímenes del lago Atexcac por medio de un muestreo vertical y se mantuvieron en cautiverio alimentándolos con alga *Chlorella vulgaris* para utilizarlos posteriormente en los experimentos propuestos. Se realizaron dos diseños experimentales: el primero con una duración de 15 días empleando la combinación del agua del lago Atexcac con la de cuatro lagos con salinidad y composición iónica diferente (Alchichica, El Carmen, La Preciosa y Quechulac) por medio de mezclas con proporciones del 50, 75 y 90 por ciento de estos últimos. De estas combinaciones se cuantificaron el pH, el total de sólidos disueltos y la concentración iónica de cada una, esta última se obtuvo por medio de la fórmula de concentración por volumen a partir de la composición de origen. Para cada tratamiento se colocaron 30 organismos evaluando su supervivencia durante el período referido. En la mayoría de los tratamientos se encontraron diferencias significativas de acuerdo con la prueba de supervivencia de Kaplan–Meier. Finalmente, se determinó que los iones Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y CO_3^{2-} presentaban diferencias significativas por medio del modelo de riesgo proporcional de COX ($p < 0.05$). Siendo los tratamientos con una mezcla al 50% donde se registró una elevada mortalidad atribuible a la precipitación de sales bicarbonatadas por la variabilidad en la composición iónica. El segundo diseño experimental consistió en colocar una muestra con elevada densidad de copépodos en una pecera tipo betera, observando la distribución de los organismos a lo largo de un gradiente de salinidad continuo, provocado por el contacto del agua de los diferentes lagos al momento de mezclarse por difusión. En este experimento se observó la preferencia de los copépodos distribuirse a salinidades mayores a la original a pesar del descenso en su supervivencia. Se concluye que la salinidad y la composición iónica juegan un papel determinante en la supervivencia de *Leptodiptomus cf. sicilis* a pesar de ser considerados como organismos eurihalinos.

INTRODUCCIÓN.

Interacción ambiente-organismo

La interacción dinámica de todos los elementos en un ecosistema hace que los seres vivos dependan intrínsecamente de factores físicos, químicos y biológicos como son la temperatura, presión atmosférica, salinidad, nutrientes o interacciones inter e intraespecíficas, por mencionar algunos, para poder cumplir su ciclo vital. Además, estas interacciones están íntimamente ligadas a las adaptaciones que presenta cada organismo para lograr su supervivencia y a su vez presentan un rango de funcionalidad dependiendo de los niveles de las alteraciones del medio, o bien, los niveles que se presentan en un medio ambiente diferente al entorno nativo del organismo (Hill, 1976). Estas adaptaciones fisiológicas ocurren dentro del tiempo de vida del organismo y normalmente se requiere de horas, días o de meses para ser completadas, estos procesos se denominan como ambientación o aclimatización cuando se trata de un cambio fisiológico, bioquímico o anatómico de un organismo expuesto a una nueva condición ambiental de manera natural, Otro tipo de adaptación fisiológica es la aclimación en donde la única diferencia son los cambios provocados de manera artificial o experimentalmente, ya sea en condiciones de laboratorio o de campo (Prosser, 1978).

Estas adaptaciones fisiológicas permiten la constante actividad biológica de una especie en un rango ambiental tolerable o normal, llamado zona biocinética. Mientras que las adaptaciones de resistencia son las que favorecen la supervivencia en ambientes extremos,

los cuales son referidos como zonas letales o L_{50} . Como lo explica la “Ley de la tolerancia de Shelford” (1913): La existencia y prosperidad de un organismo o una especie en particular dependen del carácter completo de un conjunto de condiciones. La ausencia total o el descenso de ese organismo o de la especie, podrán deberse a la deficiencia o al exceso cualitativo o cuantitativo con respecto a cualquiera de los factores que se acercan a los límites de tolerancia del organismo en cuestión, por lo que a una especie pueden perjudicarla tanto las carencias como los excesos de los factores físicos, químicos o biológicos que condicionan su desarrollo (Figura 1) (Begon *et al.*, 1999).

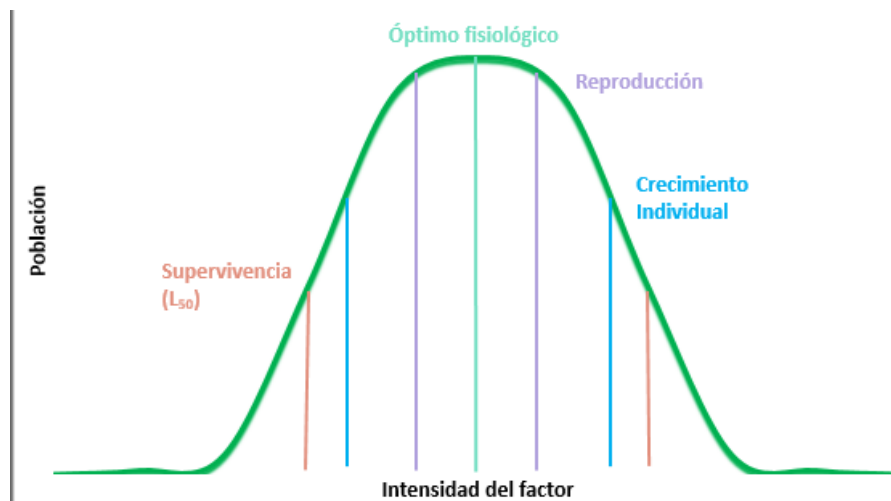


Figura 1. Ley de la tolerancia de Shelford, donde se presenta la respuesta ecofisiológica de una población con respecto a algún factor en el ambiente, así como sus diferentes límites.

Donde el estado fisiológico de los organismos determina el grado de influencia de un ambiente extremo, y el tipo de adaptación compensatoria dentro de la zona biocinética o de óptimo fisiológico. La respuesta de los organismos a las alteraciones del ambiente puede diferir de acuerdo con su estado del ciclo de vida, condición nutricional, sexo, estado de

muda, estacionalidad o una previa exposición al factor ambiental, entre muchos otros factores que pueden actuar de manera separada o de forma sinérgica (Potvin *et al.*, 1990).

Adaptaciones frente a los cambios de salinidad, osmorregulación (osmoconformadores y osmorreguladores)

La manera en que los cambios de salinidad afectan a los organismos está relacionado con el principio de ósmosis, en este proceso se difunde o se promueve el movimiento del agua a través de una membrana semipermeable en una dirección de menor a mayor concentración. Por lo que este proceso se encuentra activo en todas las células, ya que tienen una membrana semipermeable generando una fuerza de presión osmótica entre el interior y el medio externo en el cual se encuentra la célula (Gordon, 1979).

Todo organismo puede ser descrito como una solución acuosa contenida en el interior del cuerpo, así tanto el volumen del organismo como la concentración en su interior permanecen normalmente constantes dentro de límites bastantes estrechos, por lo que la alteración de esta condición puede ser fatal, de esta manera, se dice que los organismos permanecen en un equilibrio osmótico con respecto al agua y los solutos. Para poder lograr este equilibrio los organismos han desarrollado sistemas reguladores que controlan el volumen dentro de ciertos rangos, al conjunto de estas capacidades se le denomina osmorregulación (Lampert y Sommer, 2007). Algunos mecanismos específicos para lograr la osmorregulación de agua y la concentración de solutos, así como de fluidos corporales son:

- Excreción, que puede ser selectiva para solutos o agua.
- Reabsorción selectiva de agua o iones por medio del intestino.
- Absorción o excreción activa de iones específicos a través de todo el epitelio u otros sitios de intercambio, por ejemplo, las branquias.
- Reducción en la permeabilidad de la superficie corporal con la segregación de mucus.

Estos procesos de homeostasis también se dividen en dos mecanismos principales para lograr la osmorregulación, el primero corresponde a los organismos catalogados como osmoconformadores o isosmóticos, los cuales, conservan un gradiente constante de concentración entre los medios internos o externos, en otras palabras, el medio interno y el medio externo se encuentran en equilibrio y siempre a la misma concentración. El segundo mecanismo corresponde a los osmorreguladores, estos organismos conservan algún nivel constante de concentración en alguna región corporal, como la sangre o los fluidos corporales y es independiente de la concentración del medio externo (Jobling, 1995).

Los animales acuáticos que pueden tolerar grandes variaciones en el agua con respecto a la concentración de sales se les determina eurihalinos, mientras que los que tienen límites estrechos o no son capaces de soportar grandes variaciones en la salinidad son llamados estenohalinos (Schimdt-Nielsen, 1976). El detallado nivel celular fisiológico y de mecanismos bioquímicos por el cual varios tipos de organismos acuáticos controlan y responden a los retos osmóticos son variados y todos los organismos acuáticos tienen limitaciones en su habilidad para sobrevivir a cambios en la salinidad. El intervalo de salinidad por el que una especie en particular es capaz de sobrevivir está determinado por

su tolerancia a la salinidad, el cual está íntimamente relacionada con su capacidad de osmorregulación, esto conlleva a un estrés fisiológico que provoca la disminución o la interrupción de funciones metabólicas como son: regulación iónica, rango de respiración y absorción de nutrientes (Reid, 2012).

Salinidad y composición iónica, el caso de la cuenca oriental mexicana

La salinidad es una propiedad química de las aguas domésticas, industriales y naturales. Este parámetro se concibe como una medida de la cantidad total de iones disueltos en un volumen determinado de agua. Dado que la determinación del contenido total de sales requiere de análisis químicos que consumen mucho tiempo, se utilizan en substitución métodos indirectos para estimar la salinidad. Se puede establecer la salinidad de un cuerpo de agua y clasificarlo con base en determinaciones de conductividad, densidad, índice de refracción o velocidad del sonido en agua (APHA, AWWA y WEF, 2005). Así, se utiliza este parámetro para clasificar los sistemas acuáticos de acuerdo con su concentración específica (Cuadro 1). Esto indica que la salinidad es directamente dependiente de la concentración iónica presente en la solución, cada cuerpo de agua natural tiene su propia concentración y composición iónica como es el caso entre el agua de mar y los cuerpos de agua continentales (Cuadro 2). Donde, en aguas continentales la composición iónica depende de factores relacionados con la geología local, el tipo de cuenca, clima y en el caso particular de los lagos volcánicos los procesos relacionados con la erupción, como las deposiciones de lava, exhalaciones de gas y ceniza volcánica (Armienta *et al.*, 2008).

Cuadro 1. Clasificación del agua de acuerdo con su salinidad.

Salinidad (‰)	Clasificación APHA-AWWA-WPCF (2005)	Clasificación de Hammer (1986)
0 – 0.5	Dulce	Dulce
0.5 – 3.0	Salobre oligohalina	Subsalina
3.0 - 10	Salobre mesohalina	Hiposalina
10 – 17	Polihalina de mar	Hiposalina
17 – 30	Oligohalina de mar	Mesohalina
30 – 34	Mesohalina de mar	Mesohalina
34 – 38	Polihalina de mar	Mesohalina
38 – 150	Salmuera	Hipersalina
> 150	Hipersalina	Hipersalina

Cuadro 2. Composición de iones para cuerpos de agua dulce y agua salada (Webber y Thurman, 1991).

iones	Agua Dulce (mg L⁻¹)	Agua de Mar (mg L⁻¹)
CO₃²⁻	58.4	140
SO₄²⁻	12.2	271
Cl⁻	7.8	19,440
Aniones Totales	77.4	22,290
Ca²⁺	15	410
Mg²⁺	4.1	1,300
Na⁺	6.3	10,810
K⁺	2.3	390
Cationes totales	27.7	12,910

Estas diferencias entre salinidades y composiciones iónicas se encuentran en la cuenca oriental mexicana, esta cuenca que es de tipo endorreica y tiene la peculiaridad de que los escurrimientos de agua captada por precipitación no fluyen al mar ni a otra cuenca, sino que por un lado se acumulan, ya sea en el manto freático o en los cuerpos de agua, y por el otro, se evaporan (Alcocer *et al.*, 1998).

En la parte central de la cuenca, que corresponde a la altitud más baja, se forman dos lagunas someras. La primera, llamada “laguna de Totolcingo” (El Carmen) y la “laguna de

Tepeyahualco” (El Seco). Ambas lagunas cubren una superficie aproximada de 290 km². Existen varias hipótesis acerca del origen de las lagunas, la primera pertenece a Knoblich (1978) quien propone que el fondo de las lagunas se encuentra por debajo del nivel medio del manto freático, por lo tanto, su profundidad varía de acuerdo con la fluctuación del nivel de las aguas subterráneas. Por otra parte, Reyes (1979) y Gasca (1981) explican que las lagunas se forman por la acumulación del agua pluvial debido a la presencia de una capa arcillosa impermeable. También, Cruickshank (1992) sugiere que se forman principalmente como resultado del afloramiento del agua subterránea en la época de lluvias del año. Y por último Arredondo-Figueroa (2002) propone la teoría que hace 1.8 millones de años durante la era Cenozoica y el periodo Pleistoceno, la cuenca estaba cubierta por un extenso lago y que actualmente se encuentra reducido en cuerpos de agua someros y de llenado estacional. Dichas lagunas no se forman cada año y se han convertido en cuerpos acuáticos de llenado episódico (Alcocer *et al.*, 1997 y 1998).

Dentro de la misma cuenca también se encuentran seis lagos tipo maar, denominados: Alchichica, La Preciosa (Las Minas), Quechulac, Aljojuca, Tecuitlapa y Atexcac; este último datado con Ar³⁹/Ar⁴⁰ con una edad de 0.33± 0.08 Ma. (Leon, 2016) lo que sugiere su origen en el Pleistoceno medio al tardío por conos de explosión volcánica, esto ocurre cuando entra en contacto el manto freático y el magma y cuya principal fuente de agua es aportada por el manto freático de la misma (Carrasco-Núñez *et al.* 2007). Estos lagos que se encuentran dentro de la cuenca, a pesar de que tiene un origen y características geológicas, edáficas, así como climáticas similares tienen una composición iónica y una salinidad diferente con

concentraciones que fluctúan entre 0.5 y los 10 g L⁻¹ aproximadamente (Cuadro 3) (Barrera-Moreno *et al.*, 2015).

Cuadro 3. Concentración en mg L⁻¹ de iones de cinco lagos de la cuenca oriental mexicana, Mancilla-Villa (2012).

Lagos	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Atexcac	1843.5	91.5	46.5	663.6	602.3	2923	183	2099
Alchichica	2449.5	222	4	469.8	1618.6	3190.5	252.3	857.1
Preciosa	171.4	9.4	13	207.2	129.2	641.7	90.6	518.5
Quechulac	63.5	3.9	8.4	73.5	39.4	96.4	33.6	270.2
El Carmen	63.3	12.1	35.7	23.2	28.8	216.6	0	216.6

Los organismos que habitan dentro de este tipo de ecosistemas salinos en diferentes latitudes están sujetos a una serie de cambios que ocurren de manera natural, como son la desecación, cambios en la salinidad, congelación e inundaciones súbitas, por mencionar algunos de los más importantes, o de manera producida por impacto antropogénico por la extracción de agua del manto freático que incrementa la velocidad de salinización como ocurre en la cuenca oriental, estos factores provocan que dentro de los ambientes salinos se generen procesos de especiación que favorecen altos índices de endemismos (Alcocer, 1997). Uno de estos casos excepcionales que se presenta dentro de la cuenca, es la del copépodo calaniode *Leptodiptomus cf. sicilis* el cual se ha reportado dentro de cuatro lagos: Atexcac, Quechulac, La preciosa y El Carmen (Barrera-Moreno *et al.*, 2015)

Zooplankton y su importancia, *Leptodiaptomus cf. sicilis* como modelo biológico

El zooplankton de aguas interiores está constituido, principalmente por cladóceros, rotíferos y copépodos siendo estos últimos son los predominantes y más diversificadas de los crustáceos acuáticos. Hay aproximadamente 12,000 especies conocidas, de éstos, 7,500 son de vida libre, siendo 1200 propias de aguas continentales. Los copépodos de aguas continentales son menos diversificados que los de agua salada, con cuatro órdenes principales: Calanoida, Cyclopoida, Harpacticoida y Gelyelloida, siendo los Calanoida y Cyclopoida parte del plancton, los Harpacticoida parte de los organismos bentónicos y los Gelyelloida, propios de aguas profundas oceánicas (Defaye, 2011). Su importancia ecológica radica en que constituyen una fracción importante de la biomasa del zooplankton, alrededor del 50%, e inclusive rebasa los niveles del 75%, por lo que, tanto en las aguas marinas como en las epicontinentales son un enlace importante en la red trófica, siendo así relevantes en el flujo de energía y productividad secundaria. Pueden ser utilizados como bioindicadores, siendo conocida la proporción Calanoida/Cyclopoida, donde en general, cuánto mayor sea la cantidad de Cyclopoida, más eutrófico es el medio ambiente. También son usadas en piscicultura algunas especies de Cyclopoida ya testados para su uso en el control biológico de larvas de mosquitos como *Anopheles* y *Aedes*, que son transmisores de enfermedades (Marten, 1994).

El orden Calanoida se caracterizan por tener anténulas largas, de 22 a 25 segmentos, que comúnmente rebasan en extensión el nivel del margen posterior del cefalotórax. Poseen un urosoma (abdomen) relativamente delgado y alargado cuyas somitas generalmente son similares, salvo en el caso del genital, que debido a su segmentación es el más proximal del urosoma (Figura 2). La familia Diaptomidae representan el único grupo del orden cuyos representantes son formas primordialmente dulceacuícolas, viven casi exclusivamente en la zona limnética y son básicamente organismos filtradores y omnívoros que consumen pequeños organismos como rotíferos, e incluso parece que llegan a ser más eficientes que lo ciclopoideos de acuerdo con Lapesa *et al.*, (2004) citado por Elías *et al.*, (2008)

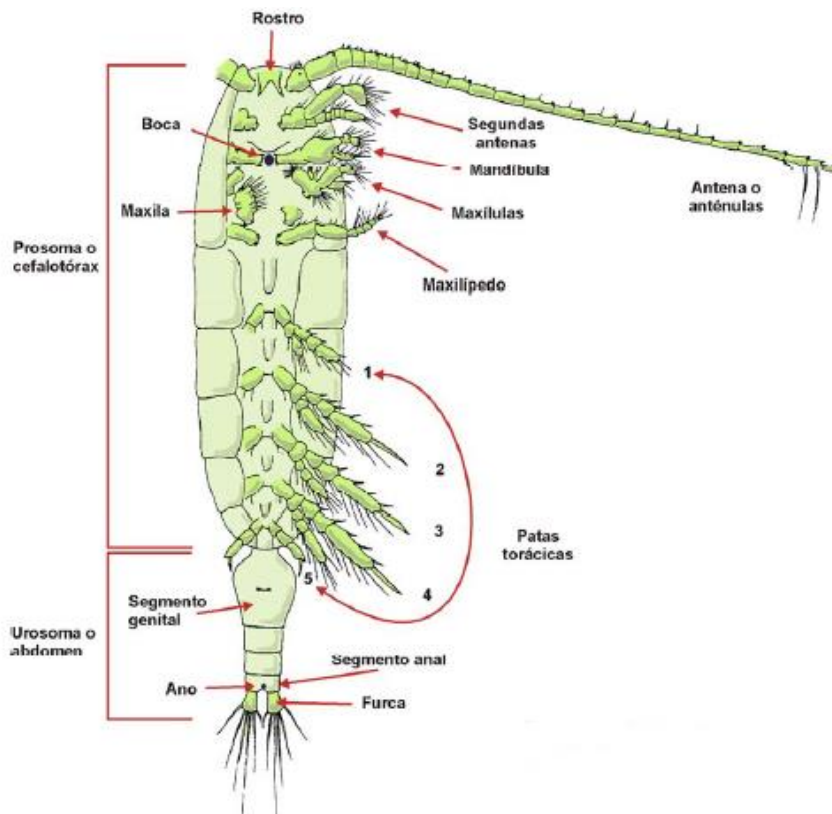


Figura 2. Morfología externa general del orden calanóide (Vives *et al.*, 2007)

La especie *Leptodiptomus cf. sicilis*, tiene una amplia plasticidad ecológica, esto le permite a la especie desarrollarse en un intervalo amplio de salinidad, lo que indica que estos organismos planctónicos son eurihalinos. Sin embargo, en los diferentes ambientes donde habitan, se registran diferencias morfológicas entre las poblaciones (ecofenos) que probablemente tiendan a ser ecotipos. La distribución geográfica de esta especie se ha registrado en cuerpos de agua tanto dulces como salobres, ubicados en la costa este a la oeste de E.U.A, Canadá y del sur de Alaska a Missouri, encontrándolos principalmente en los grandes lagos norteamericanos (Superior, Michigan, Huron, Ontario y St. Claire), entre otros (Robertson y Gannon, 1981; Balcer *et al.*,1984). Y en México se encuentran poblaciones en la cuenca oriental de un copépodo cuya morfología coincide con la del taxón *L. sicilis* de los lagos norteamericanos (Macek *et al.*, 2002).

La morfología que presentan las hembras adultas de *Leptodiptomus sicilis* se distinguen por su urosoma de tres segmentos; aletas metasómicas triangulares y puntiagudas; y el segmento genital sin proyecciones laterales obvias. En el macho maduro, la columna lateral derecha del exópodo de la quinta pata está situada en el centro del segmento, es bastante larga y se proyecta casi perpendicularmente al segmento. Además, las proyecciones en el segmento terminal del exopodio izquierdo son cortas, romas y bien separadas. La antena derecha en el macho tiene un proceso largo y delgado que sale del extremo terminal del tercer segmento desde el extremo distal, y las aletas metasómicas están expandidas y de forma triangular (Figura 3, Cuadro 4) (Forbes, 1882).

Cuadro 4. Clasificación de la especie Forbes (1882).

Reino	Animalia
Filo	Arthropoda
Subfilo	Crustacea
Clase	Maxillopoda
Subclase	Copepoda
Orden	Calanoida
Familia	Diaptomidae
Género	<i>Leptodiaptomus</i>
Especie	<i>sicilis</i>

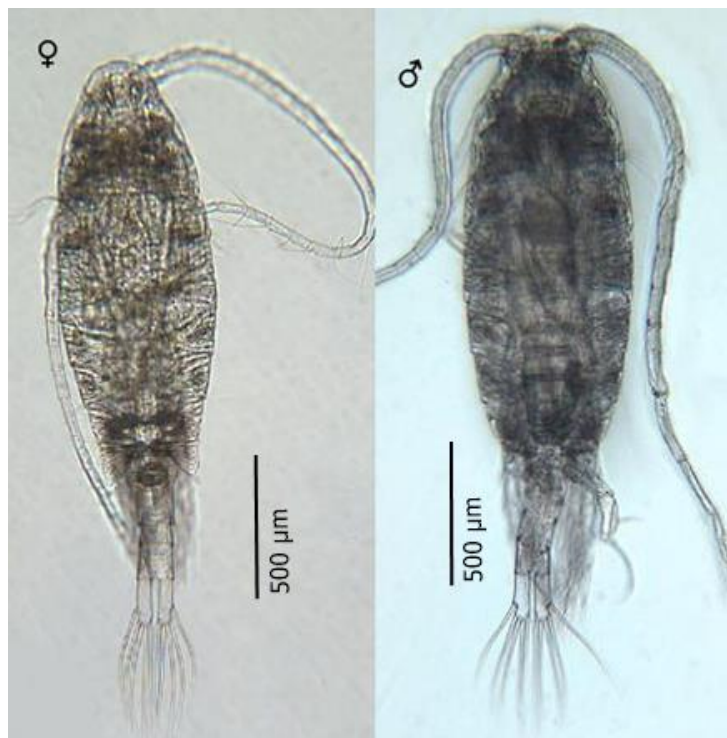


Figura 3. Fotografías de copéodos *L. sicilis* adultos, macho y hembra glsc.usgs.gov/greatlakescopepods.

ANTECEDENTES

Los estudios acerca de cómo afecta un cambio de salinidad en la biodiversidad y la respuesta de los organismos en cuerpos acuáticos son incontables. Sin embargo, se tomarán en cuenta solamente los trabajos más recientes, contemplando las últimas dos décadas. Cabe aclarar que el orden es meramente cronológico y solo se tomó como antecedentes los trabajos que contemplan organismos invertebrados.

Hall y Burns (2001) utilizaron copépodos calanoides de agua dulce del género *Boeckella* provenientes del lago Waihola en Nueva Zelanda, donde se determinó como afectaban los cambios estacionales de salinidad y temperatura a los organismos, se establecieron un rango de salinidad (20 a 3000 mg L⁻¹ Cl) y dos temperaturas (10 y 20 °C). La supervivencia era mayor de 20 días a salinidades ≤ 1000 mg L⁻¹ Cl. Las hembras siempre alcanzaron niveles superiores (86% a 10 °C y 14% a 20 °C) que los machos (43% a 10°C y 0% a 20°C), Se menciona que como el aumento de salinidad no eleva los porcentajes de supervivencia, los organismos no son capaces de tolerar las fluctuaciones estacionales de salinidad que presenta el lago. En conclusión, la habilidad de los copépodos para tolerar el aumento de temperatura está influenciado por las condiciones de salinidad en los ambientes salobres.

Lee y Petersen (2003), examinó el efecto a corto plazo y el desarrollo de la aclimatación en la tolerancia de salinidad en adultos del copépodo *Eurytemora affinis*, un microcrustáceo que habita en ambientes estuarinos salinos, pero se ha reportado que ha invadido ecosistemas de agua dulce, esto, registrado dentro del último siglo. Se usaron cuatro

salinidades (agua dulce, 5, 10 y 27 PSU) en un tiempo de 24 horas. La aclimatación a corto plazo de los adultos no pareció tener un efecto a largo plazo sobre la tolerancia a la baja salinidad, mientras que, en la aclimatación en el desarrollo de una tolerancia baja a un alta, presentó diferencias significativas. Llegaron a la conclusión de que la especie presentaba un componente genético con tolerancia a salinidades bajas, que no es significativo a la respuesta a altas salinidades. Sin embargo, el desarrollo en la aclimatación puede mejorar la supervivencia a mayores salinidades, esto sugiere la importancia de la selección natural durante los eventos de invasión a agua dulce.

Sarma *et al.* (2006) evaluaron los efectos de diferentes concentraciones de sal (NaCl 0 – 4.5 g L⁻¹) bajo condiciones del laboratorio en 10 especies de zooplancton de agua dulce (Rotíferos: *Anuraeopsis fissa*, *Brachionus calyciflorus*, *B. havanaensis*, *B. patulus* y *B. rubens*; cladóceros: *Alona rectángulo*, *Ceriodaphnia dubia*, *Daphnia pulex*, *Moina macrocopa* y *Simocephalus vetulus*). *B. patulus* y *B. rubens* mostrando un desarrollo máximo en su abundancia en un periodo de una a dos semanas, *A. fissa* presentó una fase de latencia de una semana, mientras que *B. calyciflorus* y *B. havanaensis* comenzaron a aumentar su abundancia inmediatamente después del comienzo del experimento. Se redujeron las poblaciones de *A. fissa*, *B. calyciflorus* y *B. havanaensis* en un intervalo de concentración de 1 a 1.5 g L⁻¹ de NaCl o superior y solo se presentó un pequeño efecto en el crecimiento de la población de cladóceros. *M. macrocopa* expresó una mayor tolerancia a cambios en la concentración de NaCl que otras especies de cladóceros lo que le permitió tener un aumento

en la población hasta salinidades de 4.5 g L⁻¹. Se relacionó un mayor crecimiento poblacional de rotíferos que de cladóceros dependiendo de la concentración de NaCl.

Zalizniak *et al.* (2006) realizó una comparación entre las proporciones iónicas que hay en sales de agua de mar y de los cuerpos de agua epicontinentales de Australia. Sugiriendo que las diferentes proporciones iónicas afectaban a los organismos, se utilizaron seis especies de invertebrados: *Paramecium caudatum*, *Hydra oligactis*, *Physa acuta*, *Notalina fulva*, *Micronecta robusta* y *Centroptilum sp.* Y se colocaron en 4 soluciones con diferente composición iónica en comparación de la sal comercial (Ocean Nature), también se estimó el L₅₀ en un periodo de 96 horas. En el estudio no se presentaron diferencias significativas en la respuesta de los invertebrados a las diferentes composiciones iónicas. Sin embargo, en pruebas a los límites sub-letales de larga duración los organismos reaccionaron de manera diferente a las diferentes cargas iónicas, como se presentó en aquellos que pertenecen a ambientes que presentan Ca²⁺ para el cual existen varios mecanismos fisiológicos plausibles. Por lo que este trabajo sugiere que se debe de tomar en cuenta la variación en la proporción iónica en las respuestas subletales de invertebrados no marinos.

Lahdes y Karjala (2007) realizaron un estudio con un rotífero de la especie *Cercopagis pengoi*, procedente del mar Báltico y que se ha registrado su invasión a diferentes cuerpos de agua dulce como el lago Saimaa. En la investigación se usó agua procedente del lago Saimaa enriquecida con diferentes iones, donde se evaluó la supervivencia de *C. pengoi* sin aclimatar a los organismos en un tiempo corto (24 y 56 horas). Resultó una supervivencia mínima en el agua con composición iónica del lago Saimaa (9.51 horas) seguida del agua del

mar Báltico (18.4 horas) y por último el agua enriquecida del lago Saimaa (20.5 horas). Finalmente, de acuerdo con este estudio preliminar la supervivencia de esta especie en ambientes con bajas concentraciones de iones principales es improbable.

Okogwu y Nwani (2009) estudiaron las variables físico-químicas y el zooplancton en el lago Ologe durante la época de lluvias y de estío, se identificaron 21 taxas; protozoaria: 5, Rotifera: 12, Cladocera: 3 y Copepoda: 1, Las especies dominantes de rotíferos fueron *Brachionus falcatus*, *B. patulus* y *Keratella tropica*. Se encontró que los crustáceos solo aparecían en periodos de baja salinidad, también se encontró que la riqueza de zooplancton aumenta su densidad y abundancia durante la temporada de lluvias, esto es atribuible al efecto de dilución que tiene la lluvia, lo que permite que se establezcan especies adaptadas a bajas salinidades, mientras que la ausencia de salinidades fue atribuida a los niveles bajos de oxígeno disuelto ($<1.5 \text{ mg L}^{-1}$). En conclusión, la salinidad es la que provoca cambios fisiológicos en los organismos acuáticos, además induce el cambio en la composición de la comunidad del zooplancton.

Echainz *et al.* (2012) determinó la riqueza, abundancia y biomasa del zooplancton en dos lagos con diferente salinidad, se puso a prueba la hipótesis de que en presencia de peces zooplanctívoros y a concentraciones iguales de nutrientes y clorofila a, los lagos salinos presentarían una biomasa mayor que aquellos que se encontraban a baja salinidad. Dentro de la investigación se contemplaron dos lagos someros de La Pampa, Argentina, siendo uno subsalino y el otro de tipo hiposalino, Al final, el trabajo propone que un zooplanctívoro halotolerante controla el tamaño del zooplancton, debido a que consume a las especies de

mayor tamaño lo que impide un aumento en la biomasa del lago, además de las diferencias en salinidad, el efecto top-down de la cadena alimenticia puede ser un factor que determina la biomasa del zooplancton al solo permitir el desarrollo de especies pequeñas.

Barrera *et al.* (2015) estudió la población del copépodo *L. cf. sicilis* que habita en cuatro lagos de la cuenca oriental mexicana (Uno somero con salinidad variable 1 -10 g L⁻¹ y tres profundos con salinidad constante 0.5, 1.1 y 6.5 g L⁻¹). Propuso dos hipótesis, una que la población pertenece a una especie diferente a la especie *L. sicilis* que habita en los grandes lagos norteamericanos, y dos que hay una divergencia ecológica basada en las diferentes salinidades de la cuenca. En la investigación se menciona que las cuatro poblaciones aún pueden ser consideradas como especies biológicas sencillas, pero que a su vez han desarrollado tres fenotipos diferentes, dos adaptados a salinidades constantes y uno generalista adaptado a fluctuaciones de salinidad. Sin embargo, los fenotipos especializados son poco adecuados para la migración, por lo que el aislamiento pre-zigótico frente a inmigrantes y la inviabilidad se vuelve altamente probable, esto fue respaldado por evidencia molecular que mostró un flujo restringido de genes que es causado por eventos fundadores y patrones de fragmentación alopátrica, este estudio también mostró como la selección divergente puede explicar los patrones de diversificación ecológica en copéodos lacustres.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La alta tasa de desertificación, causada por la rápida absorción del agua que permite el tipo de suelo erosionado y la baja cantidad de lluvias anuales, provoca que este territorio tenga poca presencia de aguas superficiales, predominando el agua subterránea la cual ha sido registrada a profundidades de hasta 2.0 m, esto permite la extracción del líquido por medio de pozos para actividades humanas, como lo es la agricultura (Alcocer,2004). A nivel nacional, en México existe un fuerte contraste en las regiones hidrológico-administrativas del norte y centro con las del sur. Siendo las características con mayores diferencias; la cantidad de agua renovable, la población y la aportación de cada región al producto interno bruto nacional. Todas las discordancias anteriores se presentan en la Cuenca Oriental Mexicana, donde se observa una alta tasa en la producción de producto interno bruto, altos niveles demográficos y una baja cantidad en los niveles de agua potable, además con estos problemas convergen el clima semiarido, el tipo de suelo (rendzina) y las actividades de importancia económica en la región (CONAGUA, 2015).

Todos los problemas anteriores provocan que el efecto de salinización en los lagos, el cual es un fenómeno natural en cuencas endorreicas, se acelere provocando cambios importantes en la estructura física, química de los lagos en la región, afectando a la diversidad biológica acuática, al representar una fuerza de selección determinante, particularmente para el zooplancton que se encuentra en esta zona, el cual es fundamental para los niveles inferiores y superiores dentro de las redes tróficas, lo que asegura el equilibrio ecológico de la región.

JUSTIFICACIÓN

Debido a que *Leptodiatomus cf. sicilis* es una especie que se encuentra distribuida en diferentes lagos de la cuenca oriental y la cual, se ha reportado como eurihalina, se tomó como modelo para lograr describir la respuesta fisiológica de las poblaciones de zooplancton ante el incremento de la salinización y la diferencia en la composición iónica como presión de selección, para esto solo fue considerada la población perteneciente al lago Atexcac, ya que, dentro del lago, es la única especie que lo habita.

HIPÓTESIS

Con base en las referencias de la especie, se infiere que el copépodo de la especie *Leptodiptomus cf. sicilis*, proveniente del lago Atexcac, presentará diferencias en los límites letales de su supervivencia a corto y largo plazo. Se espera que conforme aumente o disminuya la salinidad y se modifique experimentalmente la composición iónica que se encuentra en el lago Atexcac, con la combinación del agua de diferentes lagos de la Cuenca Oriental, la supervivencia de la población en cultivo disminuirá conforme se incremente la salinidad.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Determinar experimentalmente el efecto del cambio tanto en la salinidad como en la composición iónica, los límites letales y la supervivencia del copépodo *L. cf. sicilis* del lago Atexcac.

Objetivos particulares:

- Determinar los límites letales de supervivencia de una población muestral de la especie a diferente composición iónica y salinidad.
- Evaluar si cambios graduales en la variación de la salinidad y composición iónica afectan la respuesta de supervivencia de la especie.
- Establecer que iones presentan una relación directa con la supervivencia de la especie.

ZONA DE ESTUDIO (Cuenca Oriental Mexicana)

La cuenca oriental cuenta con una superficie aproximada de 4,982 km² y es reconocida por el INEGI con el nombre de “Subcuenca de la laguna de Totolcingo”, perteneciente a la cuenca del río Atoyac, dentro de la Región Hidrológica núm. 18 del río Balsas (INEGI, 1984). Se encuentra dentro de las coordenadas 18°57'-19°44'N y 97°10'-98°05'W, y se localiza, por sus características fisiográficas, en la “Provincia Ecológica 57” denominada “Lagos y Volcanes del Anáhuac” (Figura 4) (Alcocer *et al.*, 2004).

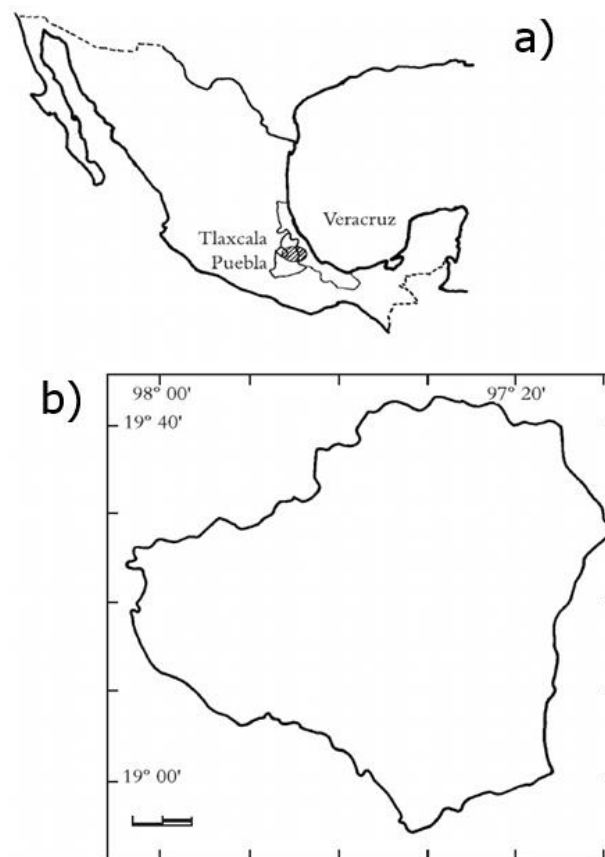


Figura 4. a) Ubicación y b) delimitación de la cuenca oriental en el territorio nacional (Alcocer *et al.* 2004).

Para este estudio se contemplaron solo cinco lagos de la cuenca oriental, Puebla (Figura 5), el primero, de donde son originarios los organismos, llamado lago Atexcac, se encuentra dentro de un cráter, tiene una forma elíptica con un diámetro entre 1150 y 850 m. El borde del cráter tiene un alto perfil con una temperatura que oscila entre los 16 y 22 °C. Además, se estima que el cráter tiene unos 160 m de profundidad en total. con aproximadamente 60 m de depósitos volcánicos no consolidados por encima de la superficie del suelo y la profundidad del lago es de aproximadamente 34 m, con una salinidad de 6.54 g L⁻¹. Cuenta con un área de 0.29 Km² y un volumen de 6.1 x 10⁶ m³ (Figura 6) (Carrasco- Núñez, 2007).



Figura 5. Lagos de la cuenca oriental contemplados para la investigación (Google earth, 2017)

a)



b)



Figura 6. a) Fotografía del lago Atexcac (Hernández-Isunza, 2016) y b) Vista satelital (Google earth, 2017).

El segundo lago llamado “Alchichica” tiene una forma circular, abruptas laderas costeras, un diámetro de 1,8 km, una profundidad máxima de 60 m se encuentra a una altitud de 2350 m sobre el nivel del mar en las coordenadas 19 ° 24.7'N, 97 ° 24.0'W. Este lago es el más salino dentro de la investigación con una salinidad de 7.59g L⁻¹ y un volumen de 69.9 x 10⁶ m³ (Figura 7) (Filonov et al. 2006).

a)



Figura 7. a) Fotografía del lago Alchichica (Hernández-Isunza, 2016)



Figura 7. b) Vista satelital (Google earth, 2017).

El tercer lago tipo maar, llamado “La Preciosa” también conocido como “Las Minas” presenta una forma aproximadamente triangular, debido a una triple explosión, con una longitud máxima de 1.34 Km y una anchura máxima de 920 m, una profundidad máxima de 45 m, área de 0.76 Km², un volumen igual a 16.2×10^6 m³ y una salinidad de 1.1 g L⁻¹ (Figura 8) (Martínez, 2010).

a)



b)



Figura 8. a) Fotografía del lago La Preciosa (Hernández-Isunza, 2016) y b) Vista satelital (Google earth, 2017).

El cuarto lago, llamado “Quechulac” tiene forma elipsoidal con una longitud máxima de 983 m, orientada hacia el sureste-noroeste y se caracteriza por un borde pequeño ubicado en la zona litoral suroriental. Cuenta con un área de 50.6 m² y una profundidad máxima de 40 m, un volumen de 10.9 x 10⁶ m³, siendo este lago el único que se puede considerar con agua dulce ya que cuenta con una salinidad de 0.46 g L⁻¹ (Figura 9) (Arredondo *et al.*, 1983).



Figura 9. a) Fotografía del lago Quechulac (Hernández-Isunza, 2016)



Figura 9. b) Vista satelital (Google earth, 2017).

Por último, el lago Totolcingo, o como es llamada coloquialmente “laguna del Carmen”, debido a su origen el volumen de este lago es variable y dependiente del periodo de lluvias anual y por ende su morfometría como sus características físico-químicas como la salinidad ($1 -10 \text{ g L}^{-1}$) son variables (Figura 10) (Barrera *et al.*, 2015).

a)



b)



Figura 10. a) Fotografía del lago Totolcingo (Hernández-Isunza, 2016) y b) vista satelital (Google earth, 2017).

MÉTODO

Trabajo de campo:

En el lago Atexcac se colectaron copépodos de la especie *L. cf. sicilis*, que es la única especie de copépodos presente en el lago, la captura fue por un arrastre vertical a una profundidad de 18.0 m ya que a esta profundidad había una mayor densidad de organismos durante el periodo de estratificación, se utilizó una red con 160 μm de apertura de malla y 0.33 m x 1.25 m de dimensiones y además se colectó alrededor de cinco litros de agua de cada lago (Atexcac, Alchichica, La preciosa, Quechulac y El Carmen).

Cautiverio de los organismos y tratamiento del agua:

El cautiverio fue implementado por un sistema de peceras utilizando como medio de cultivo el agua del lago Atexcac. La temperatura promedio del agua estuvo determinada por la habitación (19 ± 1 °C) con una diferencia promedio de 3°C en la temperatura de los lagos. También se suministró a los organismos oxigenación continua, pero de baja intensidad con un sistema de conexiones con bombas de aire. En cuanto a la luz, se utilizó un foco de 15 W siendo la iluminación continua pero difusa, presentando una mayor intensidad por efecto de la radiación solar incidente dentro de la habitación en el día. Como alimento se usó un alga clorofita unicelular, *Chlorella vulgaris*. El agua colectada que no se ocupó como medio para el cautiverio se mantuvo en refrigeración, posteriormente fue filtrada y esterilizada por radiación UV (10 W) durante 24 horas para evitar la interferencia de organismos provenientes de otros lagos y se midió los niveles de pH con ayuda de un potenciómetro (pH

meter, ± 0.1), el total de sólidos disueltos (TSD) y la conductividad eléctrica con ayuda de un sensor multiparamétrico (CORNING, $\pm 0.01 \text{ g L}^{-1}$, mS cm^{-1}) a las muestras de cada lago.

Diseño experimental a largo plazo:

Se realizaron mezclas porcentuales (50, 75 y 90 %) en matraces Erlenmeyer de 250 mL, entre el agua previamente esterilizada de los cuatro lagos de la cuenca Oriental (El Carmen, Alchichica, La Preciosa y Quechulac) y el lago Atexcac, dejando como límite un volumen de 200 ml (Figura 11).

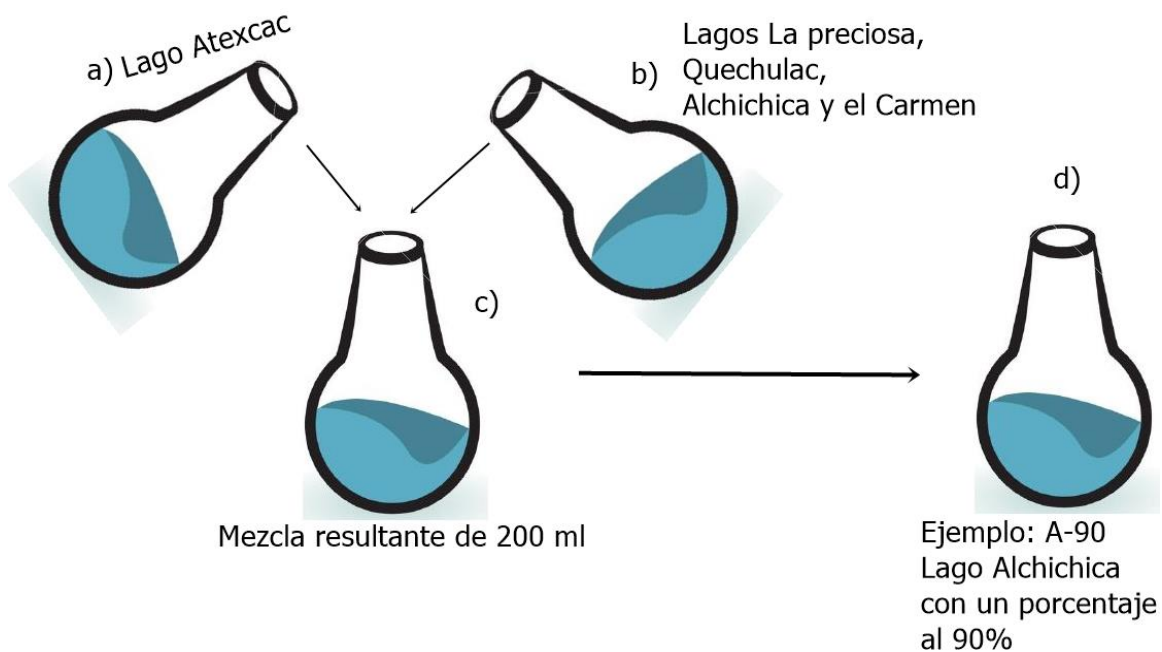


Figura 11. Diagrama ejemplificando las mezclas y el etiquetado del tratamiento A-90

Se estimó para cada mezcla el total de sólidos disueltos, pH y la conductividad eléctrica, el pH con un potenciómetro (PHmeter ± 0.01). En cada mezcla o tratamiento se colocaron 30 individuos, adultos, machos y hembras por tratamiento, seleccionados con base en la descripción de Forbes (1882), capturados al azar con ayuda de una pipeta Pasteur.

Resultando un total de 16 tratamientos más un control que contenía solamente agua del lago Atexcac, con sus respectivas repeticiones. Los experimentos tuvieron una duración de 15 días en las mismas condiciones que los organismos en cautiverio durante este periodo se registraron cada tercer día los organismos supervivientes, realizando conteos con ayuda de un microscopio estereoscópico (Motic, 4X) (Figura 12).

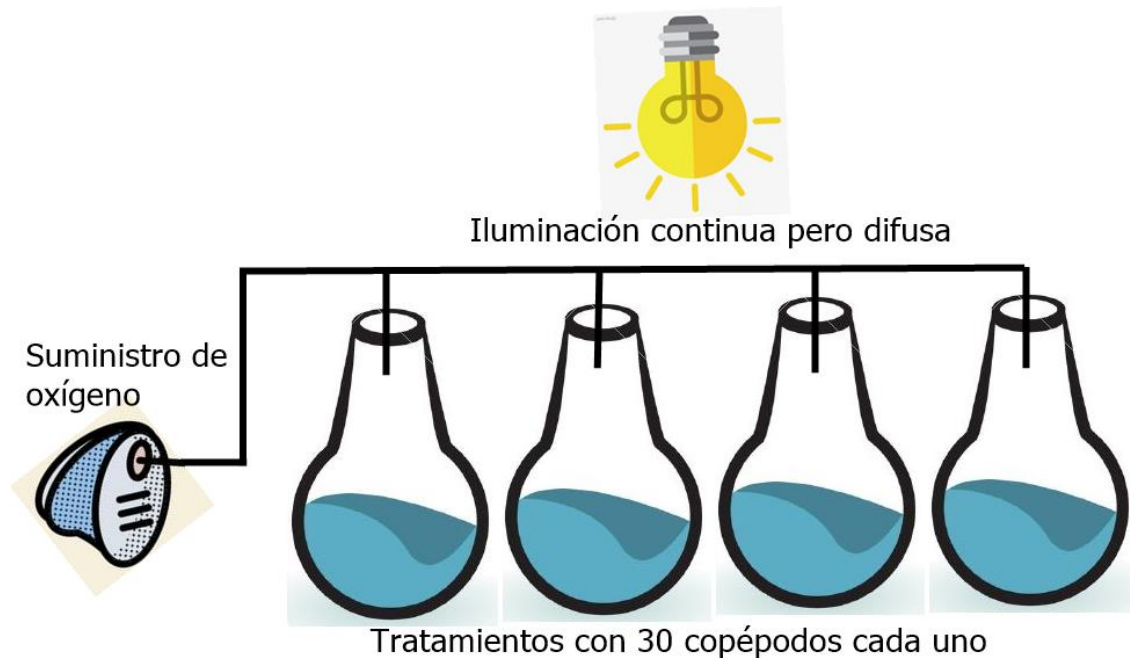


Figura 12. Esquema del diseño experimental a largo plazo

Diseño experimental a corto plazo:

Se evaluó la supervivencia a través de un gradiente de variación de salinidad y composición iónica, para lograrlo, se colocó en una pecera tipo “Betera” de 5 compartimentos, agua de los lagos contemplados, ordenados de menor a mayor salinidad. Para llevar a cabo el experimento se colocó una muestra de copéodos sin alimento en el compartimento que refiere al lago Atexcac y en las cuatro celdas sobrantes, alimento. En este instante aún no

había un contacto directo entre los compartimentos debido a que no se llenó a tope la pecera, por lo que se dejó reposar 24 horas (Figura 13). Después de las 24 horas de reposo, se provocó el contacto del agua que había en todos los compartimentos, vertiendo los volúmenes faltantes de cada compartimento al mismo tiempo, se esperó la distribución de copéodos a lo largo de la pecera, siendo promovida por luz en la parte superior y provocada por la actividad fototrópica positiva de los organismos y el alimento en los cuatro compartimentos sobrantes, durante las siguientes 48 horas y cada 24 horas , se registró la densidad, mortalidad y supervivencia de los copéodos que se encontraban en cada compartimento .



Figura 13. Esquema del diseño experimental a corto plazo

Trabajo de gabinete:

Con los datos obtenidos de todos los tratamientos del experimento a largo plazo se hizo la caracterización de acuerdo con el diagrama de Gibbs para determinar la naturaleza de los lagos y mezclas, posteriormente para determinar la configuración iónica de cada tratamiento se tomaron como base las composiciones iónicas referidas en los estudios de Mancilla-Villa

(2012) esto debido a que la composición iónica es de carácter semiconservativo, a partir de estas concentraciones y volúmenes usados, se realizaron estimaciones y recálculos matemáticos por medio de la ecuación entre concentración sobre volumen ($\frac{C_1}{V_1} = \frac{C_2}{V_2}$) donde C_1 y C_2 corresponden a las concentraciones de cada ion y V_1 y V_2 al volumen utilizado (200 ml). Así solamente se calcularon los iones dominantes en cuerpos de agua naturales (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{1+} , K^{1+} , SO_4^{2-} , Cl^{1-} , CO_3^{2-} y HCO_3^{1-}) y se estimó su relación porcentual.

Con la concentración de cada ion se ubicó a cada tratamiento en el diagrama triangular de Piper y el diagrama de Schoeller para demostrar de manera gráfica la progresión en las concentraciones, esto fue con ayuda de una hoja de cálculo en línea llamada "Hatarichem". También se utilizó la prueba de supervivencia Kaplan-Meier y un modelo de regresión de Cox, con los cuales, se determinó la probabilidad de supervivencia que presentó cada tratamiento y las diferencias de riesgo que presentaba cada parámetro medido y cada ion estimado, por separado (Peat, 2006 y Box, 2008). Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el programa STATGRAPHICS centurión XV versión 15.02.06.

Finalmente, para el experimento a corto plazo solo se registraron los supervivientes, densidad y mortalidad para observar el movimiento de los organismos y su dinámica dentro de un gradiente continuo. Para este experimento no se realizó ninguna prueba estadística.

RESULTADOS

Diseño experimental a largo plazo:

Se registraron los volúmenes, el TSD, la conductividad y el pH resultantes de las mezclas porcentuales entre el lago Atexcac y los demás lagos (La Preciosa, Alchichica, Quechulac y El Carmen) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Volúmenes, TSD, conductividad y pH resultante

Tratamiento	Volumen de agua de Atexcac (ml)	Volumen de agua de los otros lagos (ml)	TSD (g L ⁻¹)	Conductividad (mS L ⁻¹)	pH
Alchichica	0	200	8.22	16.44	9.03
A-90	20	180	7.46	14.58	9.08
A-75	50	150	7.25	14.33	8.88
A-50	100	100	6.6	13.22	8.84
Preciosa	0	200	1.43	2.9	8.69
P-90	20	180	2.08	4.13	8.94
P-75	50	150	3.03	6.23	8.82
P-50	100	100	4.93	9.83	8.8

Cuadro 5. Continuación

Tratamiento	Volumen de agua de Atexcac (ml)	Volumen de agua de los otros lagos (ml)	TSD (g L ⁻¹)	Conductividad (mS L ⁻¹)	pH
Quechulac	0	200	0.55	1.14	8.83
Q-90	20	180	1.15	2.16	8.8
Q-75	50	150	2.31	4.55	8.76
Q-50	100	100	3.43	6.89	8.54
El Carmen	0	200	4.98	9.91	9.11
C-90	20	180	5.37	10.66	9.04
C-75	50	150	5.79	11.64	8.96
C-50	100	100	6.61	13.19	8.83
Atexcac	200	0	6.66	13.17	8.8

Los cálculos y estimaciones matemáticas por medio de la ecuación de concentración por volumen a partir de las concentraciones de cada sistema mencionadas por Mancilla-Villa (2012), para la composición iónica de cada tratamiento expresaron las siguientes concentraciones finales (Cuadro 6).

Cuadro 6. Estimaciones matemáticas para la concentración iónica de cada tratamiento

Tratamiento	Na ⁺ (mg L ⁻¹)	K ⁺ (mg L ⁻¹)	Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ (mg L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)
Alchichica	2449.50	222.00	4.00	469.80	1618.60	3190.50	252.30	857.10
A-90	2388.90	208.95	8.25	489.18	1516.97	3163.75	245.37	981.29
A-75	2298.00	189.37	14.62	518.25	1364.52	3123.62	234.97	1167.57
A-50	2146.50	156.75	25.25	566.70	1110.45	3056.75	217.65	1478.05
Preciosa	171.40	9.40	13.00	207.20	129.20	641.70	90.60	518.50
P-90	338.61	17.61	16.35	252.84	176.51	869.83	99.84	676.55
P-75	589.42	29.92	21.37	321.30	247.47	1212.02	113.70	913.62
P-50	1007.45	50.45	29.75	435.40	365.75	1782.35	136.80	1308.75
Quechulac	63.50	3.90	8.40	73.50	39.40	96.40	33.60	270.20
Q-90	241.50	12.66	12.21	132.51	95.69	379.06	48.54	453.08
Q-75	508.50	25.80	17.92	221.02	180.12	803.05	70.95	727.40
Q-50	953.50	47.70	27.45	368.55	320.85	1509.70	108.30	1184.60
Carmen	63.30	12.10	35.70	23.20	28.80	216.60	0.00	216.60
C-90	241.32	20.04	36.78	87.24	86.15	487.24	18.30	404.84
C-75	508.35	31.95	38.40	183.30	172.17	893.20	45.75	687.20
C-50	953.40	51.80	41.10	343.40	315.55	1569.80	91.50	1157.80
Atexcac	1843.50	91.50	46.50	663.60	602.30	2923.00	183.00	2099.00

A partir de las concentraciones anteriores se obtuvo la relación ponderal de $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ (Cuadro 7) donde la mayoría se acercaron a la unidad, con excepción de lago Quechulac, la laguna “El Carmen” y el tratamiento C-90 que presentaron una relación inferior a 0.90. Estos valores indican que el tipo de agua de los tratamientos corresponde con aguas que tienen escurrimiento subsuperficial lo que provoca que los niveles de TSD sean altos, además la relación ponderal se necesitó para obtener el diagrama de Gibbs (Figura 14). Dentro de este diagrama se puede dividir de manera horizontal, donde los tratamientos que se encontraron en la parte superior correspondieron con procesos de evaporación-cristalización, mientras que en la parte cercana a los 1000 mg L^{-1} predomina el proceso de mineralización de la roca. Todos los tratamientos se manejaron como series experimentales. Por ejemplo, la serie experimental de Alchichica, integra a los tratamientos: Alchichica, A-90, A-75 y A- 50.

Cuadro 7. Relación ponderal de los iones Na^+ y Ca^{2+}

Tratamiento	$\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$
Alchichica	0.99
A-90	0.99
A-75	0.99
A-50	0.98
Preciosa	0.92
P-90	0.95
P-75	0.96

Cuadro 7. Continuación

Tratamiento	Na ⁺ / (Na ⁺ +Ca ²⁺)
P-50	0.97
Quechulac	0.88
Q-90	0.95
Q-75	0.96
Q-50	0.97
El Carmen	0.63
C-90	0.86
C-75	0.92
C-50	0.95
Atexcac	0.97

Destaca el hecho, que, de acuerdo con la salinidad de los cuerpos de agua estudiados, pero sobre todo en función de la relación ponderal Na⁺ / (Na⁺+Ca²⁺) muy alta registrada, todos los sistemas estudiados se encuentran fuera del diagrama propuesto por Gibbs por debajo del margen superior derecho.

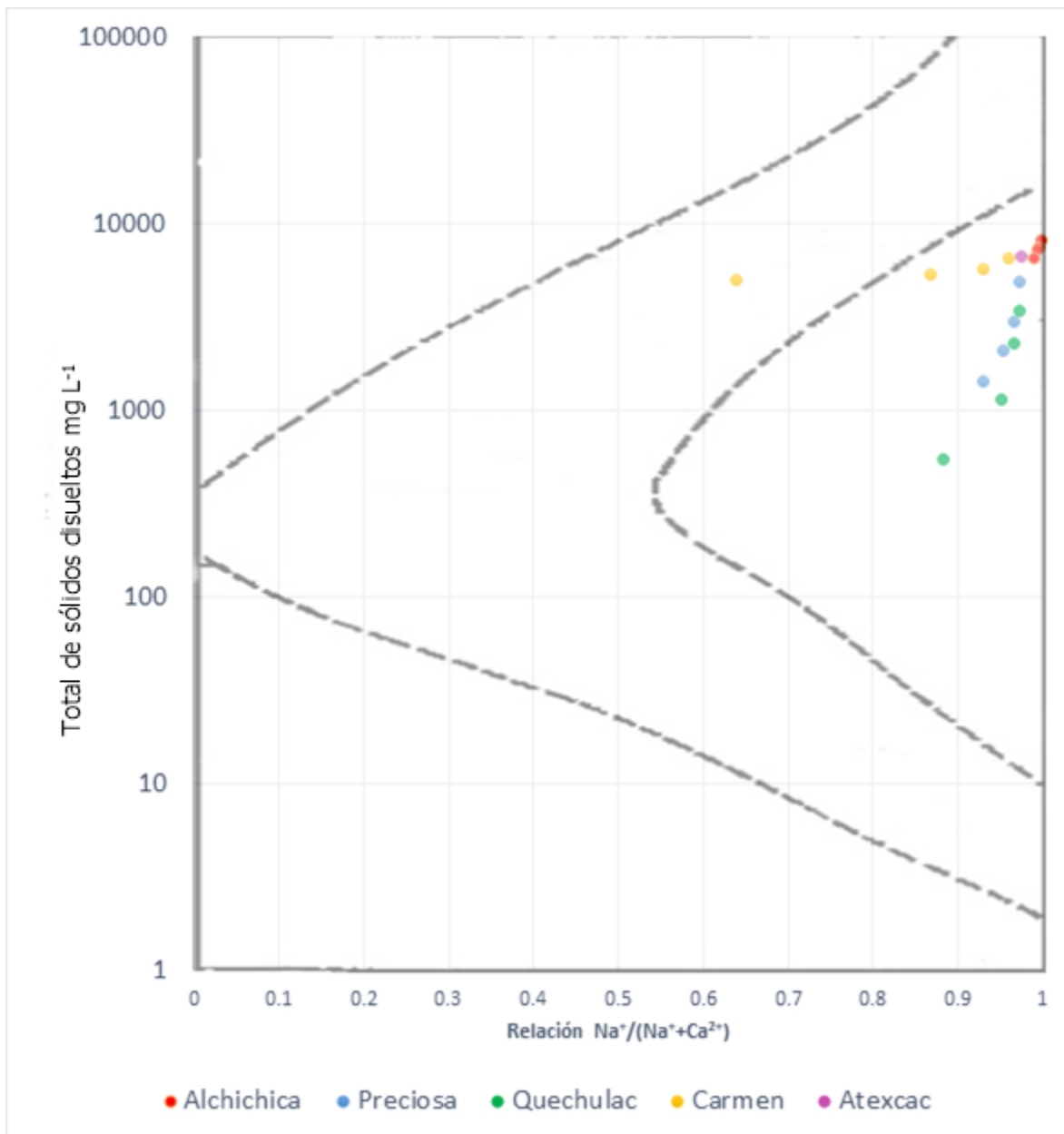


Figura 14. Diagrama de Gibbs obtenido a partir de los lagos y sus mezclas.

Diagrama de Piper y Schoeller.

Se clasificó las proporciones iónicas de los tratamientos de acuerdo con el diagrama de Piper (Figura 15) mientras que los diagramas de Schoeller solo expresaron las concentraciones iónicas referidas en miliequivalentes.

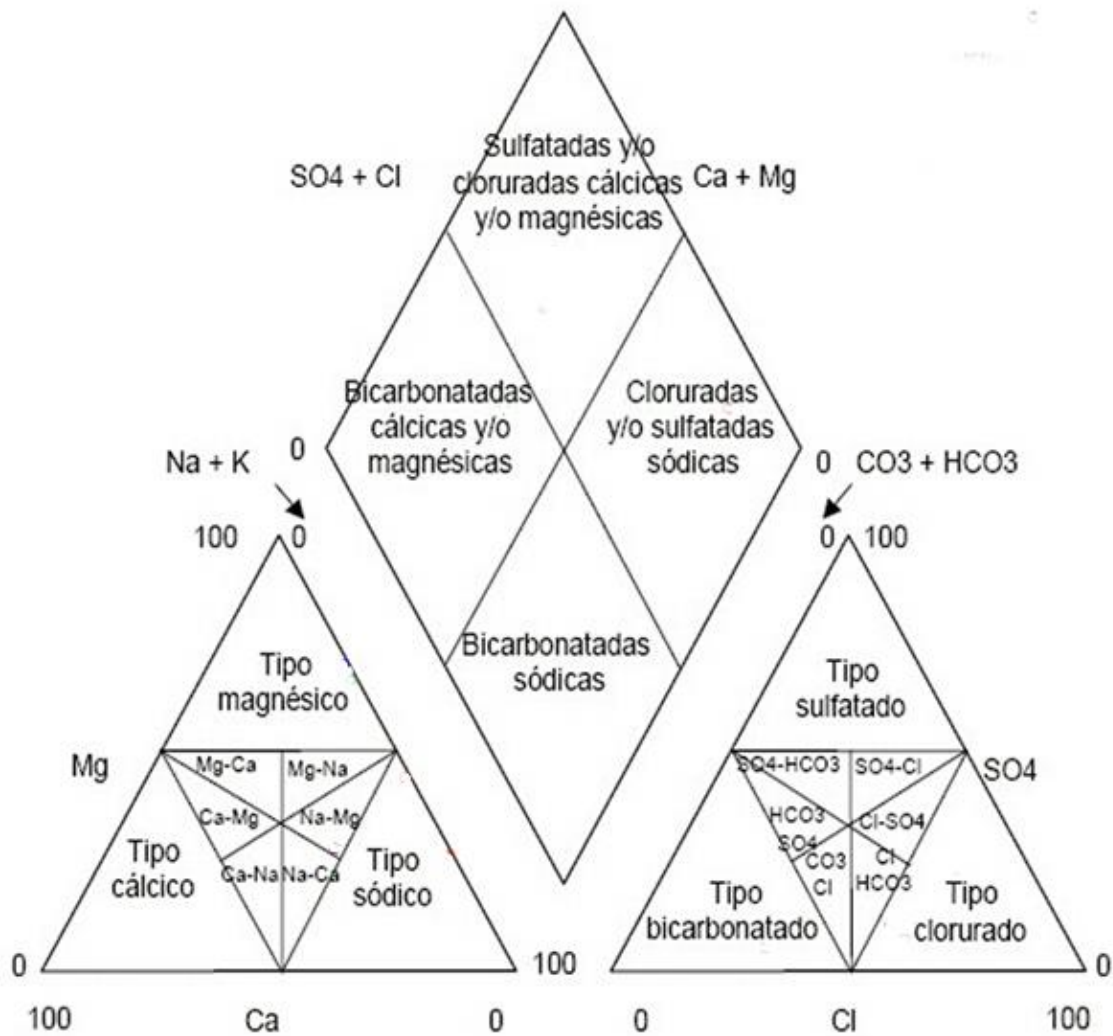


Figura 15. Significado de las diferentes regiones del diagrama de Piper.

Se ubicó al lago Atexcac (Control), en la región derecha del rombo indicando que la alcalinidad no causada por carbonatos excede el 50% y las propiedades químicas están determinadas por álcalis y ácidos fuertes teniendo agua de tipo sódica y clorurada. Para fines comparativos se presentó la ubicación del lago control en todos los diagramas presentados de las series experimentales. La serie experimental de Alchichica se ubicó dentro de las mismas regiones y presentó agua con la misma naturaleza iónica, Sin embargo, hubo diferencias en los porcentajes de Mg^{2+} , SO_4^{2-} y $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ (Figura 16). Dentro del diagrama de Schoeller se mostraron los cambios más relevantes en la concentración iónica, en el lote Atexcac – Alchichica; el ion que presentó un mayor cambio fue el Ca^{2+} , posteriormente los SO_4^{2-} y los HCO_3^- (Figura 17).

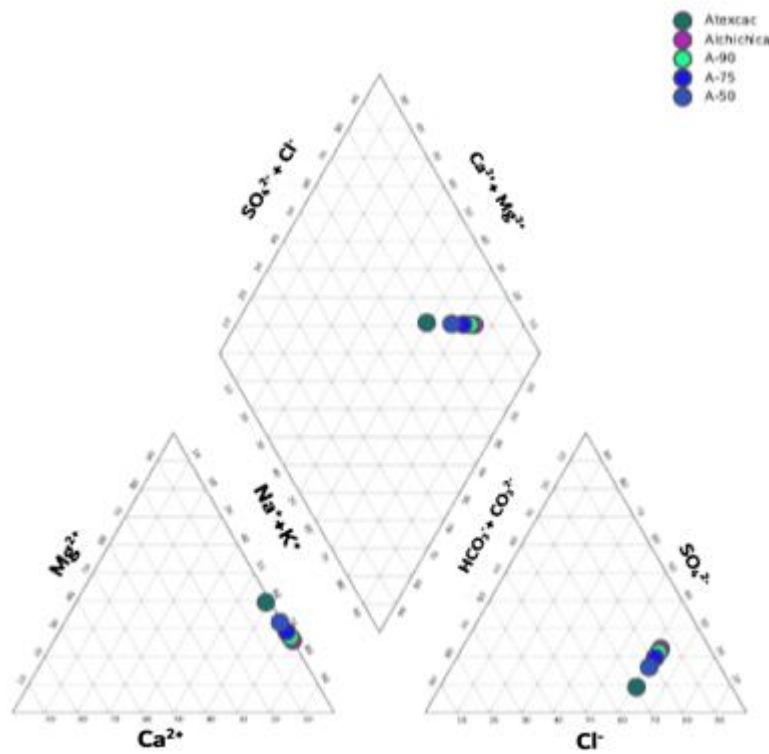


Figura 16. Muestra el porcentaje iónico para Alchichica y su serie de mezclas en el diagrama de Piper.

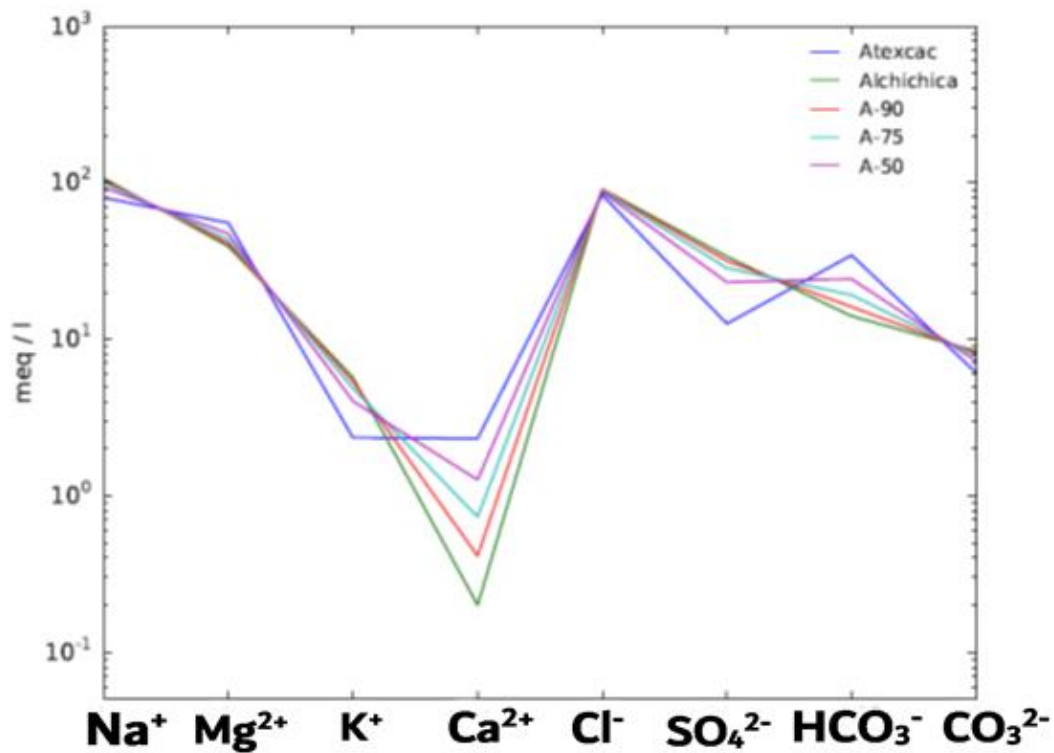


Figura 17. Diagrama de Schoeller para la serie experimental de Alchichica

El lago la Preciosa se encontró dentro de un área de transición dentro del diagrama de Piper, donde ningún par de elementos rebasan el 50%, en el triángulo inferior izquierdo las mezclas presentaron una transición de aguas magnésicas a sódicas, mientras que las variaciones en el triángulo que representa a los aniones fueron mínimas, por lo que no hay gran diferencia en la proporción de estos iones (Figura 18). En el lote del lago la Preciosa de acuerdo con el diagrama de Schoeller se presentó una mayor variabilidad en la concentración de K⁺, Na⁺ y SO₄²⁻ (Figura 19).

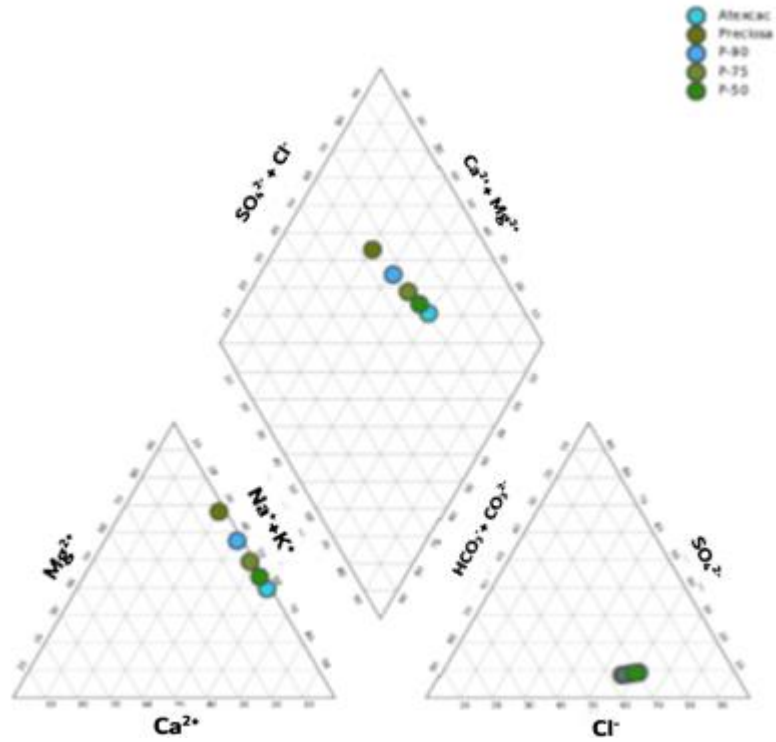


Figura 18. Porcentaje iónico para la serie del lago la Preciosa en el diagrama de Piper.

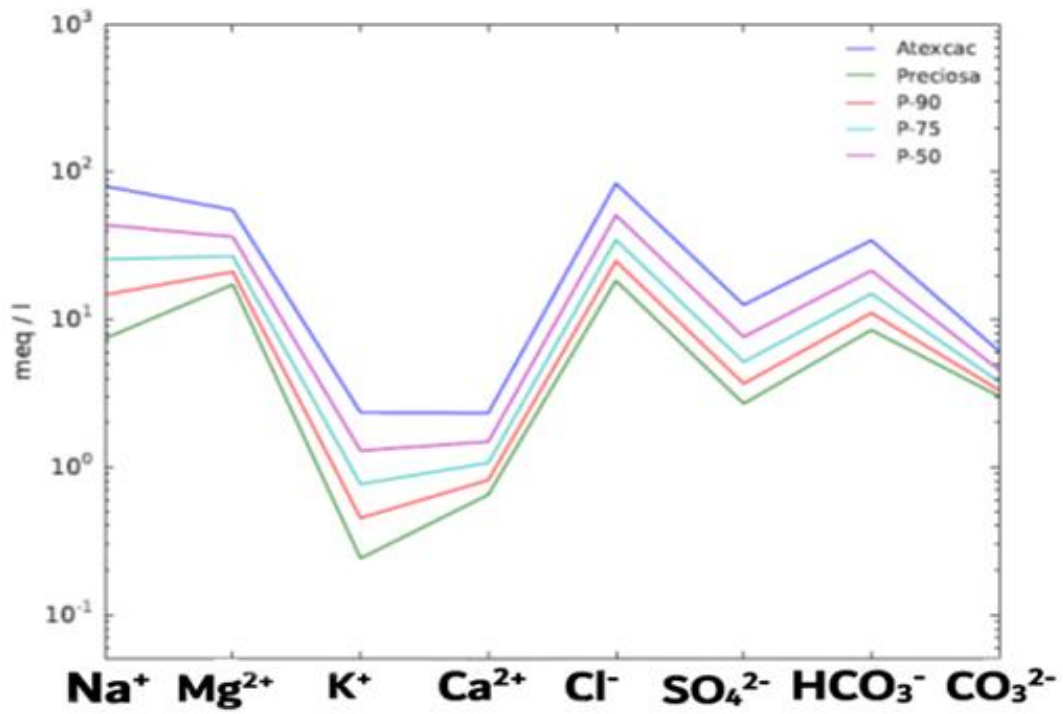


Figura 19. Diagrama de Schoeller para la serie experimental de La Preciosa.

El lago Quechulac se ubicó en la zona del rombo donde la dureza por carbonatos excede el 50%, las propiedades químicas del agua están dominadas por tierras alcalinas y ácidos débiles, a su vez las mezclas de este lote se encontraron dentro de la misma zona donde se encuentra el lago Atexcac, donde la alcalinidad no causada por carbonatos excede el 50% y las propiedades químicas están dominadas por álcalis y ácidos fuertes. En el triángulo izquierdo que representa a los cationes se presentó la misma transición que en el lago la Preciosa, de aguas magnésicas a sódicas. Sin embargo, el triángulo inferior derecho mostró cambios en el porcentaje de Cl^- y HCO_3^- (Figura 20). Para la serie experimental Quechulac la concentración que expresaron todos los iones en el diagrama de Schoeller fue altamente variable, siendo el K^+ , Na^+ y Cl^- los que presentaron un mayor aumento en su concentración. Un comportamiento que se observó es que en salinidades menores siempre habrá una alta similitud en la línea de concentraciones de las mezclas con la del lago Atexcac (Figura 21).

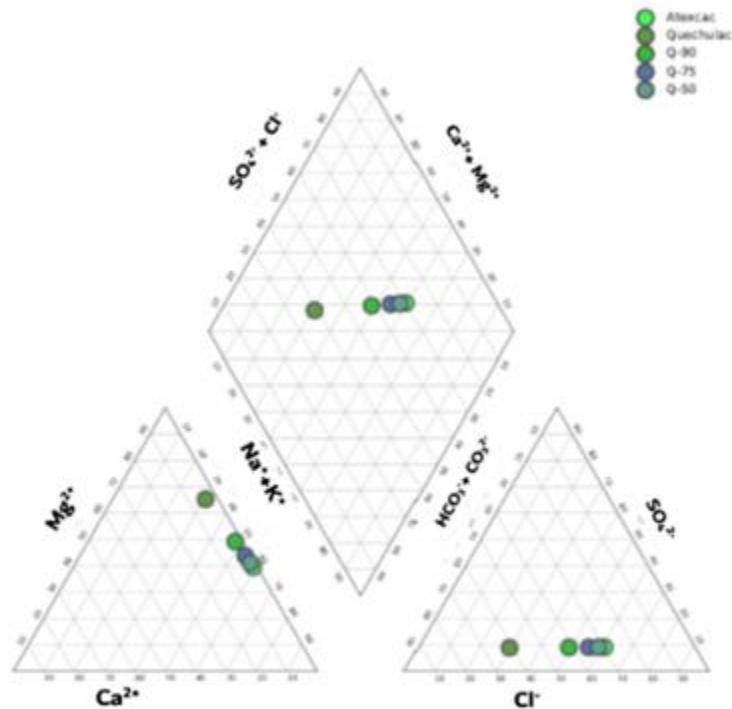


Figura 20. Porcentaje iónico para la serie del lago Quechulac en el diagrama de Piper.

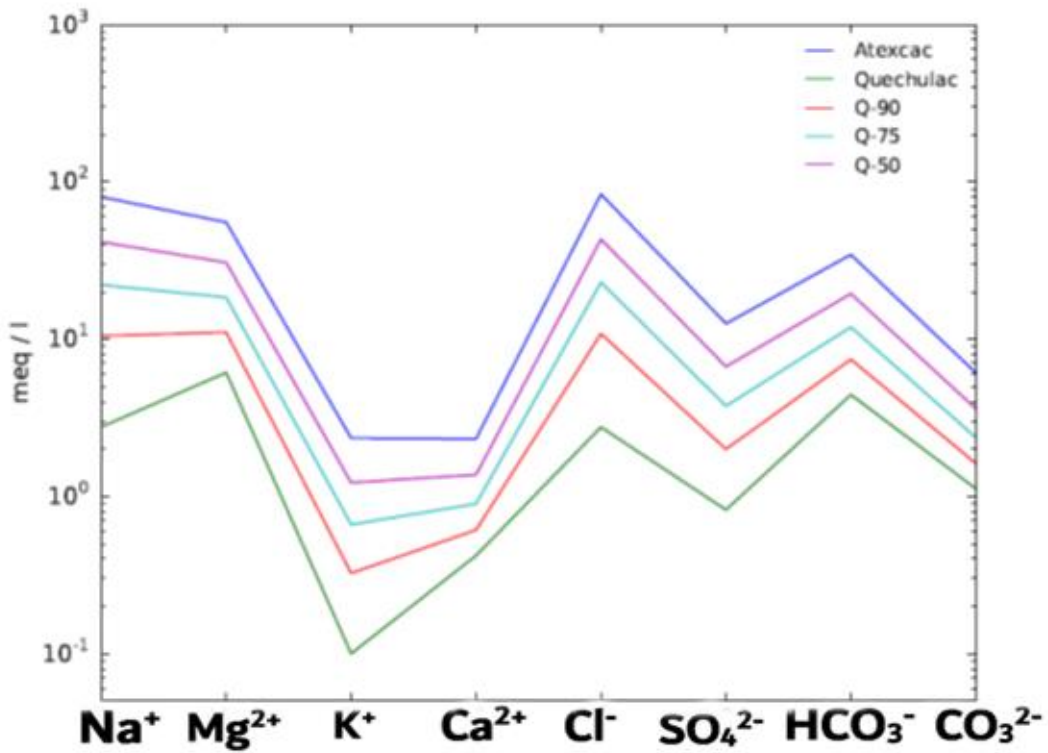


Figura 21. Diagrama de Schoeller para la serie experimental de Quechulac.

Por último, la laguna El Carmen se ubicó dentro de una zona de transición donde ningún par de elementos rebasa el 50%, las mezclas de este lote se ubicaron a una distancia mínima del lago control, el triángulo que representa la proporción catiónica tiene diferencias en cuanto a la proporción de Ca²⁺, el triángulo derecho no presentó grandes cambios en la proporción aniónica (Figura 22). En el diagrama de Schoeller, la serie experimental, solo presentó cambios importantes en las concentraciones de SO₄²⁻, HCO₃²⁻, Na⁺ y Mg²⁺(Figura 23).

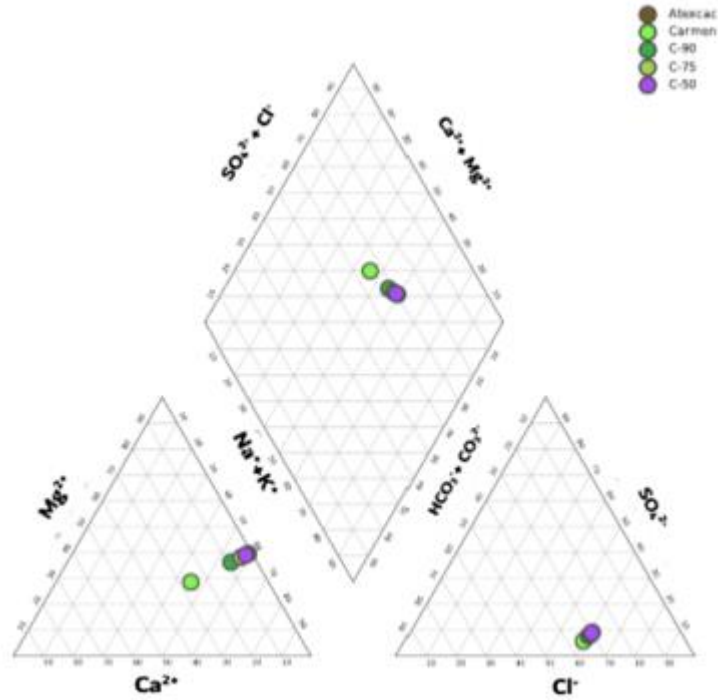


Figura 22. Porcentaje iónico para El Carmen en el diagrama de Piper.

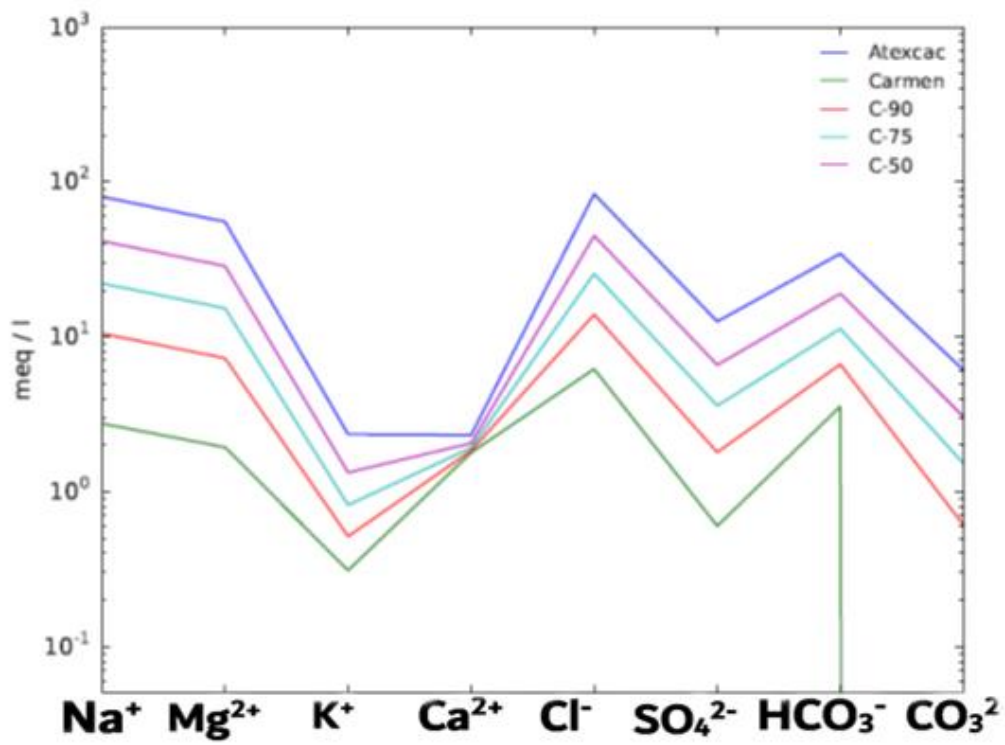


Figura 23. Diagrama de Schoeller para la serie experimental de Quechulac.

Análisis de supervivencia Kaplan-Meier.

Con este análisis estadístico se estimó el tiempo de vida media que presentaban los copépodos en cada tratamiento y el desarrollo de su supervivencia durante los 15 días de experimentación. Para el tratamiento control (lago Atexcac) los copépodos siempre presentaron una supervivencia mayor al 95% en todos los días de experimentación, al igual que en los diagramas de Piper este tratamiento se presentó en todos los diagramas Kaplan-Meier para facilitar su comparación con las diferentes series experimentales. La serie experimental que correspondió a Alchichica no presentó L_{50} con excepción del tratamiento A-50 (Cuadro 8, Figura 24).

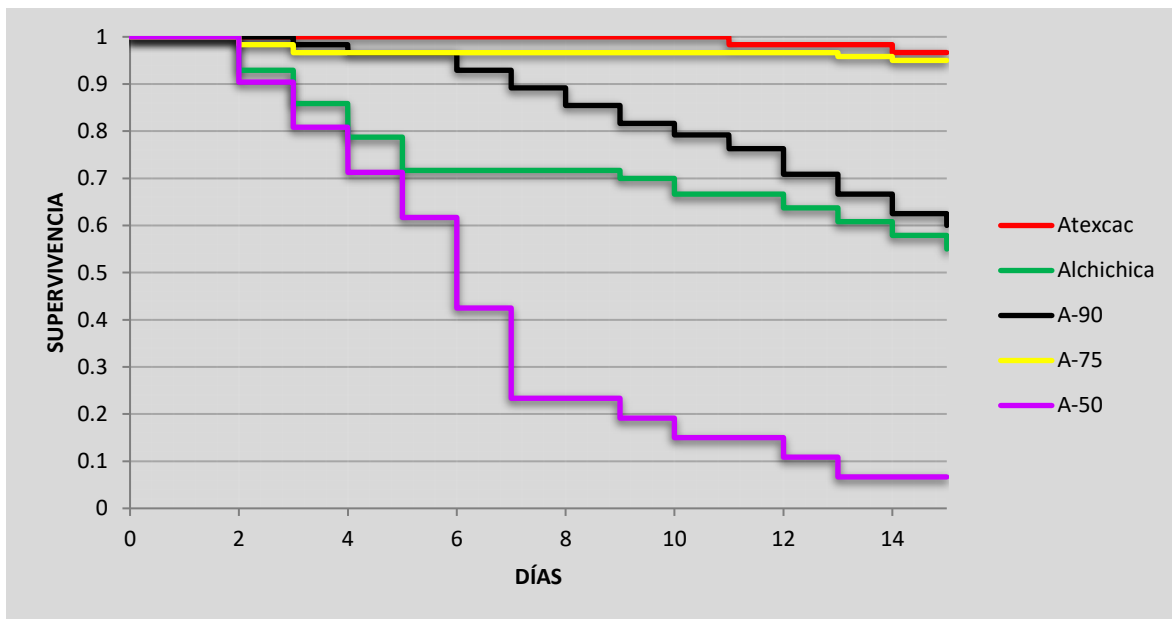


Figura 24. Análisis Kaplan-Meier para la serie de Alchichica.

Cuadro 8. Datos resultantes de la serie del lago Alchichica (NP= L₅₀ no alcanzado).

	Atexcac	Alchichica	A-90	A-75	A-50
TDS (g L⁻¹)	6.66	8.22	7.46	7.25	6.60
L₅₀ (días)	NP	NP	NP	NP	5°
Supervivencia final	0.96	0.55	0.60	0.95	0.06

En la serie que correspondió al lago “La Preciosa” y su tratamiento P-50 presentaron los límites letales a pocos días de llevar a cabo el experimento (4 y 6 días). Sin embargo, el tratamiento P-75 alcanzó casi el 80% de supervivencia final a pesar de presentar una salinidad baja (Figura 25, Cuadro 9).

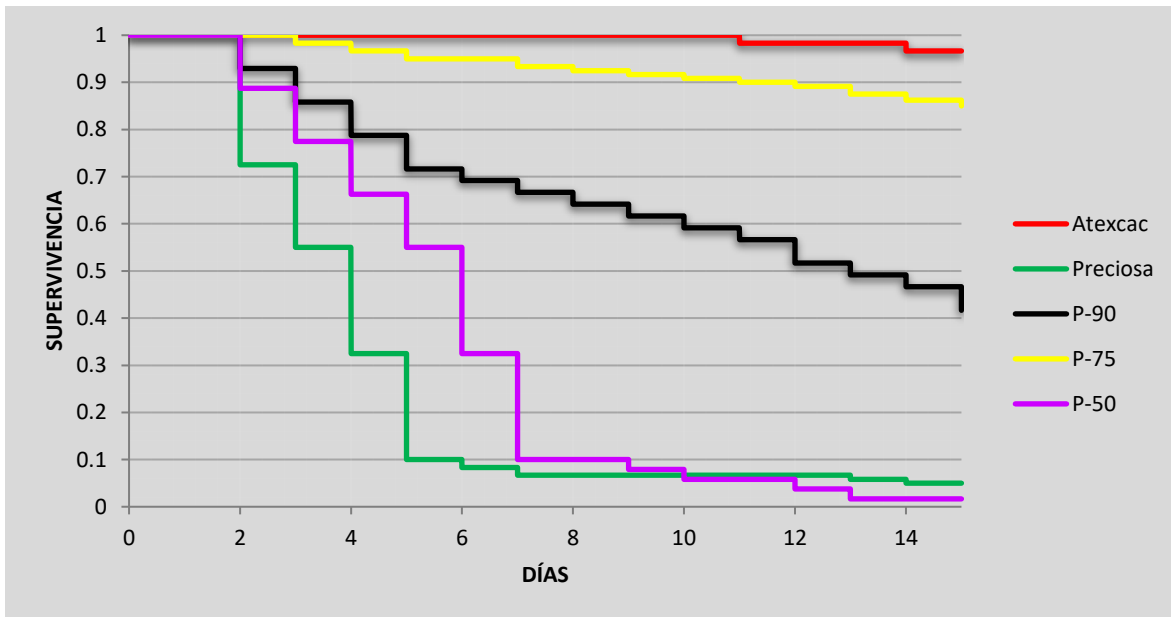


Figura 25. Análisis Kaplan-Meier para la serie de La Preciosa.

Cuadro 9. Datos resultantes de la serie del lago La Preciosa.

	Atexcac	La Preciosa	P-90	P-75	P-50
TDS (g L⁻¹)	6.66	1.43	2.08	3.03	4.93
L₅₀ (días)	NP	4°	13°	NP	6°
Supervivencia final	0.96	0.05	0.41	0.85	0.01

En la serie correspondiente al lago Quechulac de igual manera que el lote anterior solo un tratamiento (Q-75) fue capaz de terminar los 15 días de experimentación, mientras que el resto, presentó un descenso en la supervivencia aproximadamente a la mitad de los días de duración del experimento (Figura 26, Cuadro 10).

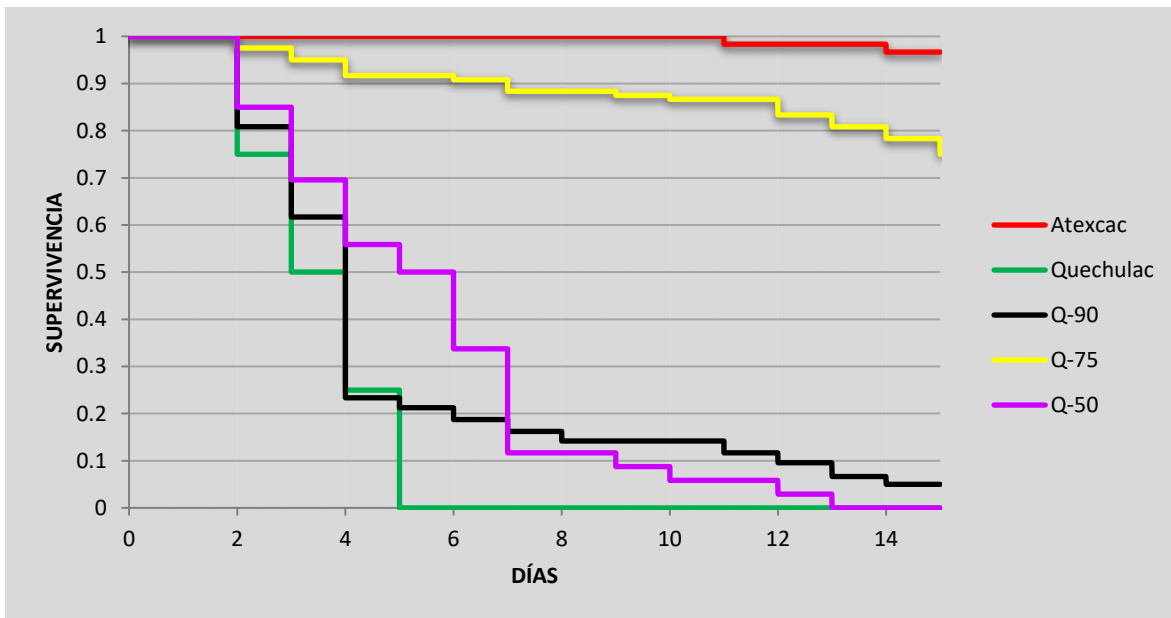


Figura 26. Análisis Kaplan-Meier para la serie de Quechulac.

Cuadro 10. Datos resultantes de la serie del lago Quechulac.

	Atexcac	Quechulac	Q-90	Q-75	Q-50
TDS (g L⁻¹)	6.66	0.55	1.15	2.31	3.43
L₅₀ (días)	NP	3°	4°	NP	5°
Supervivencia final	0.96	0.00	0.05	0.75	0.00

Finalmente, para la serie de “El Carmen” todos los tratamientos, sin excepción alguna alcanzaron los límites letales, pero a diferencia de los dos lotes anteriores, este no presentó niveles de supervivencia igual a 0 (Figura 27, Cuadro 11).

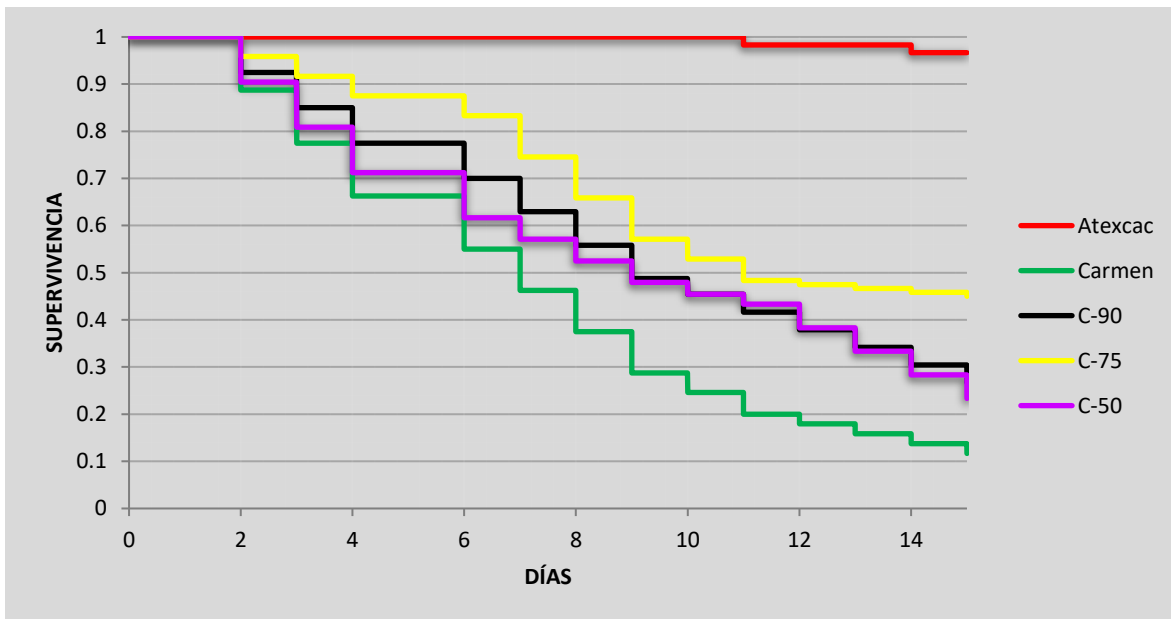


Figura 27. Análisis Kaplan-Meier para la serie de “El Carmen”.

Cuadro 11. Datos resultantes de la serie del lago “El Carmen”.

	Atexcac	El Carmen	C-90	C-75	C-50
TDS (g L⁻¹)	6.66	4.98	5.37	5.79	6.61
L₅₀ (días)	NP	7°	9°	11°	9°
Supervivencia final	0.96	0.11	0.26	0.45	0.23

En el modelo de riesgo proporcional de COX, se relacionó cada parámetro medido y cada ion estimado matemáticamente con los niveles de supervivencia de los tratamientos, de esta manera se determinó que factores representaban diferencias significativas (Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻ y CO₃²⁻ en la supervivencia de los organismos (Cuadro 12)

Cuadro 12. Análisis estadísticos de los modelos de riesgo proporcional COX

Factor	Chi-cuadrada	Df	P-value
TSD	3.593	1	0.0580
Cond	3.405	1	0.0650
pH	0.512	1	0.4741
Ca²⁺	0.000718	1	0.9786
Na⁺	4.708	1	0.03
K⁺	3.614	1	0.0573
Mg²⁺	5.155	1	0.0232

Cuadro 12. Continuación

Factor	Chi-cuadrada	Df	P-value
Cl ⁻	5.310	1	0.0212
CO ₃ ²⁻	4.692	1	0.0303
SO ₄ ²⁻	3.532	1	0.0602
HCO ₃ ⁻	3.473	1	0.0624

Experimento a corto plazo

Durante el experimento a corto plazo se contabilizó la densidad de copépodos inicial en el compartimento, antes de iniciar el experimento fue de 23 org mL⁻¹ en un volumen de 1.2 L, posteriormente en el momento del llenado de la pecera el volumen de cada compartimento cambio a 1.5 L para poder iniciar la mezcla por difusión de las diferentes aguas de los sistemas de estudio. Se observó que si hubo movimiento de los organismos durante la duración del experimento. Así, a las 24 horas la distribución de copépodos tuvo tendencia hacia los dos extremos de la pecera (Figura 28, Cuadro 13). A las 48 horas (tiempo final del experimento) la densidad descendió en salinidades bajas y se observó que una proporción importante de los organismos prefirieron salinidades por encima de 5 g L⁻¹ (Figura 29, Cuadro 14).

Cuadro 13. Resultados de supervivencia en el experimento a corto plazo en las primeras 24 horas.

Compartimiento	Quechulac	La Preciosa	El Carmen	Atexcac	Alchichica
TDS (g L ⁻¹)	2.89	3.00	4.40	5.76	5.97
Densidad (org ml ⁻¹)	5	2.08	5.1	3.6	11.6
Supervivencia (%)	41.6	32	49.12	82.6	83.57



Figura 28. Pecera a las 24 horas. (El tamaño del organismo corresponde con la densidad de organismos).

Cuadro 14. Resultados de supervivencia a las 48 horas.

Compartimiento	Quechulac	La Preciosa	El Carmen	Atexcac	Alchichica
TDS (g L ⁻¹)	3.42	3.63	4.22	4.91	5.08
Densidad (org ml ⁻¹)	4.25	4.16	3.58	16.40	27.83
Supervivencia (%)	13.72	12.50	30.23	62.60	38.32



Figura 29. Pecera a las 48 horas.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores obtenidos de conductividad y principalmente TSD se usaron para la determinación en la concentración de sales, el intervalo resultante (0.50 a 8.20 g L⁻¹) propone que la salinidad que se encuentra en cada lago está determinada por factores geológicos, la morfología y morfometría del mismo cuerpo de agua, de esta última destacan el área superficial, el volumen y la profundidad (Armienta *et al.*, 2008).

El pH de los tratamientos fluctuó entre 8.5 y 9.1, por lo que se caracterizaron como alcalinos, con predominancia de las formas bicarbonatadas. En el momento de realizar las mezclas porcentuales, además de registrar cambios en el total de sólidos disueltos, también se encontraron variaciones en las unidades de pH de cada uno de los tratamientos (Cuadro 5). En general, se observó con la mezcla de los tratamientos una disminución del pH con respecto a los originales, aunque esta solo se dio un cambio en las decimas o en las centésimas. También de acuerdo con el sistema buffer del agua (Monte, 2016) los niveles de bicarbonatos están en una abundancia máxima lo que podría provocar la precipitación de sales por un proceso de sobresaturación, hay que aclarar que suceden procesos parecidos al agua de mar. Sin embargo, estos cuerpos de agua presentan una salinidad de tipo atalashalina aunado a la condición alcalina, a lo que se atribuye los bajos niveles de supervivencia en los tratamientos A-50, P-50, Q-50 y C-50 como resultado también del cambio más drástico en la composición iónica original, al no predominar ninguna de las características de las aguas combinadas (Figuras 24 a 27).

Con respecto a los cálculos matemáticos con los cuales se determinó la concentración de cada ion y en comparación con el trabajo de Mancilla-Villa (2012). Se encontró que los cationes en los lagos cráter, siguieron el orden de abundancia: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, mientras que los aniones, para los lagos Alchichica, Atexcac y La Preciosa, por lo general su orden de abundancia fue: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-}$ y para el lago Quechulac fue: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-}$. Las comparaciones demuestran que los iones más abundantes de los lagos-cráter fueron Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y HCO_3^- . Donde la composición aniónica en términos de una mayor abundancia de bicarbonatos con respecto a los SO_4^{2-} .

Estas diferencias en la concentración de los iones son provocadas por dos factores intrínsecamente ligados entre sí, el tipo de origen de los lagos y la evolución hidrogeoquímica de cada uno, Hardie-Eugster (1970) explica cómo evoluciona la precipitación de sales en un sistema acuático y cuáles son las diferentes vías que determinan la composición iónica de diferentes cuerpos de agua (Figura 30). Además, estos procesos también han sido descritos por Tóth (1995) donde explica de manera más compleja como el proceso de continuidad hidráulica en cuencas sedimentarias provoca contrastes bruscos, tanto en la temperatura como en la composición química.

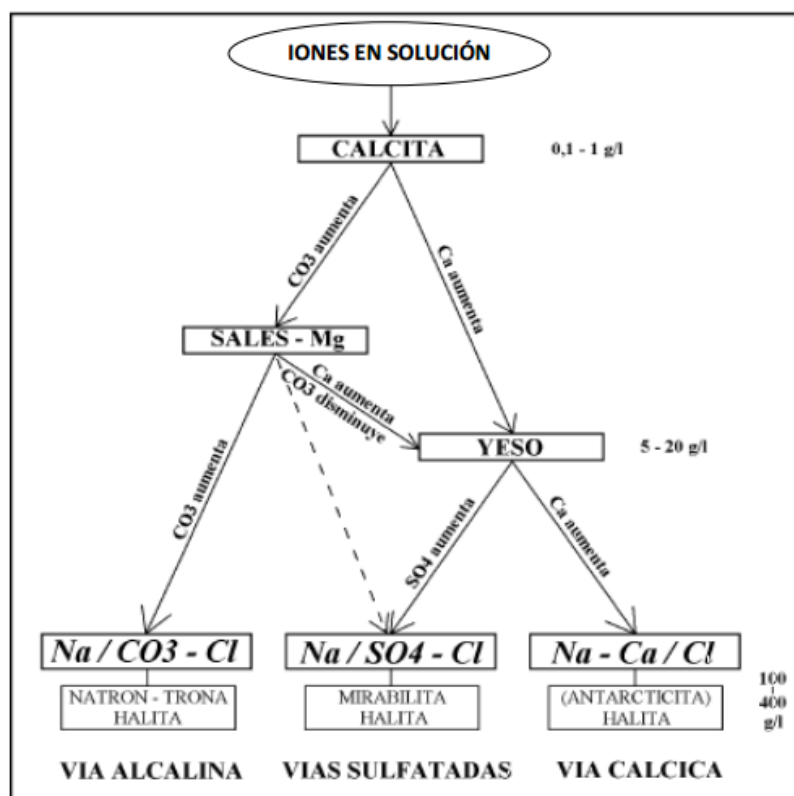


Figura 30. Modelo de evolución geoquímica de Hardie-Eugster

Dentro del diagrama de Gibbs la distribución de los cuerpos de agua estudiados no se encuentra dentro del modelo de boomerang propuesto, con excepción de la laguna “El Carmen”. La mayoría de los tratamientos se encuentran en la parte superior del diagrama, lo que indica que predominan los procesos de evaporación-cristalización en la zona, sin embargo, el tratamiento correspondiente al lago Quechulac, ubicado en la parte inferior, indicando un efecto de dilución de sales. Comparado los lagos de la cuenca oriental mexicana con los trabajos de Kilham (1990) sugiere que los sistemas lacustres estudiados se asemejan más a cuerpos acuáticos africanos, que corresponden con ambientes donde predomina el ion sodio. Sin embargo, también es importante recalcar que el clima y el tipo de suelo que predominan en la región provocan estas grandes diferencias en cada lago. Dentro de los

diagramas de Piper y Schoeller solamente se buscó presentar las diferencias mencionada anteriormente de una manera gráfica, donde los diagramas de Piper tienen un acomodo porcentual, mientras que los de Schoeller presentaron las concentraciones de cada ion en meq L⁻¹.

Dentro del análisis de supervivencia, en comparación con el trabajo de Hall y Burns (2001), la especie *L. cf. sicilis* no presentó supervivencia a salinidades ≤ 1 g L⁻¹ lo que sugiere que la especie que habita dentro del lago Atexcac no presenta adaptaciones a ambientes de agua dulce, Los tratamientos que más se aproximan a esta concentración de sales corresponden al lago “La Preciosa” y P-90 que expresaron un nivel de supervivencia de 7 y 41% de probabilidad, mientras que el tratamiento del lago Quechulac con una salinidad de 0.5 g L⁻¹ presentó una supervivencia nula a partir del quinto día.

En el estudio no se aplicó la aclimatación gradual de los organismos en las diferentes salinidades de cada tratamiento, si no que fueron cambios súbitos, por lo que no se puede demostrar que una aclimatación paulatina sea benéfica como es mencionado en la investigación de Lee y Petersen (2003), esto al menos, para la supervivencia del copépodo *L. cf. sicilis*, ya que debido a que se buscaba ver el efecto conjunto del cambio en la salinidad y la composición iónica no fue posible lograr una secuencia paulatina de aclimatación. Sin embargo, se presentaron supervivencias por encima del 75%, como es el caso de los tratamientos A-75, P-75 y Q-75 con salinidades de 7.25, 3.03 y 2.31 g L⁻¹ respectivamente, lo que indica su rápida capacidad de osmorregulación a cambios de salinidad, asociado con una elevada plasticidad ecológica.

Al comparar los resultados de supervivencia obtenidos durante los 15 días no se presentaron diferencias en el efecto a largo plazo con el ion Ca^{2+} como lo propone Zalizniak (2006) para las seis especies de invertebrados contemplados en su investigación. Debido a que en los lagos y por ende en los tratamientos experimentales, la proporción y la variación de este ion fue baja; con excepción del tratamiento del lago Alchichica y sus mezclas correspondientes, donde las concentraciones de Ca^{2+} variaron de 4 a 25 mg L^{-1} . Este mismo autor menciona que las bajas concentraciones de calcio tienen efectos adversos en cuanto a la toxicidad de metales traza los cuales necesitan concentraciones mínimas (0.01 mg L^{-1}) para tener importantes resultados en la supervivencia de los organismos.

Con este estudio se demostró que la composición iónica provoca cambios en la supervivencia, tal es el caso de los tratamientos de la laguna del Carmen y sus respectivas mezclas (C-90, C-75, y C-50) con salinidades de 5.37, 5.79 y 6.61 g L^{-1} respectivamente, que son cercanas a la salinidad que presentó el lago Atexcac (6.66 g L^{-1}). Con base en esto se esperaba que en los experimentos se hubiera expresado una supervivencia similar al control (98%), pues se ha reportado para el zooplancton perteneciente al lago Ologe que la salinidad por si misma provoca cambios fisiológicos importantes que influyen en su supervivencia (Okogwu y Nwani, 2009). Sin embargo, para el presente estudio el límite letal de los tratamientos se presentó en la segunda semana de experimentación, lo cual se debió al cambio en la composición iónica como se observa en los diagramas de Schoeller (Figuras 17, 19, 21 y 23), donde para los tratamientos del Carmen se presentó una mayor variación en los iones Na^+ , Mg^{2+} y CO_3^{2-} , sugiriendo que estos iones tienen repercusión directa en la

supervivencia de la especie. Esto se confirmó posteriormente con la prueba de riesgo proporcional de Cox, donde los únicos iones que presentaron diferencia significativa fueron el Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y CO_3^{2-} con valores de P de 0.03, 0.023, 0.021 y 0.03 respectivamente.

El trabajo que más se asemeja a la investigación presente y quizás el más importante como referencia pertenece a Barrera *et al.*, (2015) ya que utiliza la misma especie de copépodos pertenecientes a la misma zona de estudio. Sin embargo, de acuerdo con sus objetivos usaron como medio sales de acuario donde predomina el NaCl, modificando la concentración salina en sus tratamientos, pero no la composición química de los mismos. Así en sus resultados con tres salinidades (1.3, 3.8 y 6.5 g L⁻¹) donde reportan niveles de supervivencia de supervivencia del 65, 60 y 97% respectivamente, sin llegar a los límites letales. La discrepancia de los resultados entre supervivencia presentada en el diseño experimental del trabajo con el de estos autores, se atribuye a que la composición iónica de los sistemas es determinante para la supervivencia y el establecimiento de la especie, y en un segundo plano dependen las variaciones de salinidad.

La especie *L. sicilis* originalmente es considerada como euhrialina, al reportarse presente en los lagos Quechulac de agua dulce, La Preciosa de tipo subsalino, Atexcac hiposalino y El Carmen de salinidad variable; así como en los grandes lagos norteamericanos de agua dulce (Balcer et al. 1984); es decir en cuerpos acuáticos que tienen diferente salinidad, donde las poblaciones presentes realizan todas sus funciones vitales. Sin embargo, al medir la sobrevivencia de la población de Atexcac en los lagos de la cuenca oriental, se registró el 50% de la misma en la Preciosa (subsalino) y de 0% en Quechulac (agua dulce). Esto haría

suponer que es una especie diferente o bien la misma con una adaptación local o en proceso de especiación tal como lo sugieren Barrera et al., (2015), sobretodo a una condición de mayor salinidad, Aunado a que la divergencia genética reportada en copépodos lacustres de la cuenca oriental apoya la teoría de que la especie *L. cf. sicilis* del lago Atexcac presenta una divergencia ecológica y está en proceso de especiación tal como lo sugieren los mismos autores.

Otro aspecto relevante de la especie es que no presenta depredadores directos (peces) en el lago, por lo que la red trófica del lago Atexcac al ser simplificada, no tiene ninguna influencia en la supervivencia de la misma, como sucede en los lagos hiposalinos de la Pampa Argentina, donde la presencia de zooplactívoros tienen grandes repercusiones en la supervivencia de los copépodos (Echainz *et al.*, 2012). De donde deriva el hecho de que *L. cf. sicilis* está sujeta a una presión de selección química producida por el efecto de salinización y cambios en la composición iónica.

En el caso del experimento a corto plazo en un gradiente continuo de variación de salinidad se registraron no solo bajos niveles en la densidad de *L. cf. sicilis* sino también de supervivencia a bajas salinidades. Lo que sugiere que efectivamente la especie presenta una adaptación fisiológica a condiciones hiposalinas. Dentro de este experimento se logró encontrar una distribución de organismos muy similar a lo que indica la ley de tolerancia de Shelford al menos solo para adultos (Figuras 28 y 29, Cuadros 13 y 14). Lo cual coincide con la respuesta de supervivencia de un rotífero invasor (*Cercophagis pengoi*) en un gradiente continuo de salinidad en el mar Báltico, donde esta disminuye a una menor

salinidad (Lhades y Karjala, 2007). A pesar de ser un organismo diferente del zooplancton, resulta interesante su respuesta fisiológica ante este factor, sobre todo porque las características de salinidad del mar Báltico se asemejan a las del lago Atexcac, incluso en ambos sistemas se reporta la presencia de la cianobacteria filamentosa *Nodularia spumigena* (Macek *et al.*, 2007).

En la presente investigación, destaca el hecho de que la población de *L. cf. sicilis* de lago Atexcac, lograron sobrevivir a diferentes salinidades, pero sus límites letales se vieron directamente afectados por la composición iónica presente. Aspecto, que puede generar un debate sobre el papel que desempeña está en términos de la sobrevivencia de la especie, y si además puede considerarse como un factor de selección en los procesos evolutivos en cuencas de tipo endorreico, ya que sufren modificaciones en la sucesión química iónica asociada con el proceso de salinización (Tóth, 1995).

Aún quedan bastantes interrogantes en cuanto a la regulación iónica de estos organismos acuáticos, así como determinar el comportamiento de cada ion en el metabolismo de los mismos, su concentración en la hemolinfa, así como los procesos metabólicos y moleculares asociados con cambios en la composición iónica y la salinidad, y las respuestas fisiológicas que presentan estos en diferentes estadios con los parámetros químicos analizados. En este estudio se demostró que la composición iónica es relevante en la supervivencia de los copépodos en su etapa adulta y que la condición eurihalina de los organismos depende tanto de la concentración salina como de la naturaleza iónica de las aguas, lo que implica un proceso de adaptación fisiológica local de los organismos a cambios en las mismas.

CONCLUSIONES

- Los límites letales para *Leptodiptomus cf. sicilis* en la etapa adulta, se asociaron con las proporciones iónicas a exposición directa en los diferentes tratamientos experimentales, por lo que se rechazó la hipótesis nula de que la variación de la salinidad era la principal determinante de los niveles de supervivencia de la especie.
- En el experimento del gradiente continuo de salinidad, la mortalidad de los copépodos siguió un patrón típico de una curva de supervivencia hacia las 48 horas de exposición, asociado con la disminución paulatina del gradiente de salinidad con respecto al tiempo. Donde el óptimo fisiológico correspondió con el lago de origen y se presentó una disminución con tendencia gaussiana hacia menores y mayores concentraciones de sal, destaca el hecho de que este patrón evidentemente también estuvo influenciado por la composición iónica de cada lago.
- La relación química entre los aniones y cationes (Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y CO_3^{2-}) desempeñaron un papel importante en la supervivencia de *Leptodiptomus cf. sicilis* en los diferentes tratamientos experimentales. Siendo los aniones los que presentaron una mayor repercusión para esta especie de acuerdo con el modelo de regresión de COX.
- La condición eurihalina de *Leptodiptomus cf. sicilis* no fue del todo comprobada en los experimentos dada la evidente mortandad presentada por los organismos en un período de tiempo relativamente corto en los diferentes tratamientos y en el gradiente de salinidad continuo, destacando que la salinidad y principalmente la composición iónica son factores determinantes en la respuesta ecofisiológica de la especie, que también pueden favorecer procesos de adaptación local e incluso especiación en los lagos donde se distribuyen.

REFERENCIAS

- J. Alcocer (1997) Biodiversidad y lagos salinos. CONABIO. *Biodiversitas* 16 (1): 7-14
- J. Alcocer, O. Escolero y L. Marin (2004) *Problemática del agua de la cuenca oriental, estado de Puebla, Veracruz y Tlaxcala*. México. 23 pp.
- J. Alcocer, A. Lugo, M. Sánchez, M. Chávez y E. Escobar (1998) *Threats to the saline lakes of the Oriental basin, Mexico, by human activities*. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, 26 (1): 1383-1386.
- APHA- AWWA y WEF (American Public Health Association/American Water Works Association and Water Environment Federation). (2005) *Standard method for examination of water and wastewater*, 21st. ed. Washington. U.S.A.
- A. Armienta, G. Vilaclara, S. Cruz-Reyna, S. Ramos, N. Cenicerros, O. Cruz, A. Aguayo y F. Arcega-Cabrera (2008). *Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178 (1): 249-258.
- J. Arredondo-Figueroa (2002) *Los axalapascos de la Cuenca Oriental, Puebla*. en: G. De la Lanza y J. L. García(compiladores). *Lagos y presas de México*. Ed. AGT, D. F, 81-107 pp.
- J. Arredondo-Figueroa, E. Borrego, R. Castillo y M. Valladolid (1983). *Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la cuenca oriental, Puebla, México*. *Biótica*. 8(1): 37-47.

- M. Balcer, N. Korda y S. Dodson (1984). *Zooplankton of the Great Lakes*. Univ. Wisconsin Press, 174 pp.
- O. Barrera-Moreno, J. Ciros-Pérez, E. Ortega-Mayagoitia, J. Alcántara-Rodríguez y E. Piedra-Ibarra (2015) From local adaptation to ecological speciation in copepod populations from neighboring lakes. *PLoS ONE* 10(4): e0125524. doi:10.1371.
- M. Begon, J. Harper y C. Townsend (1999). *Ecología individuos, poblaciones y comunidades*. Barcelona. España. Editorial Omega. 1148 pp.
- E. Box, J. Stuart y G. Hunter (2008) *Estadística para investigadores, Diseño innovación y descubrimiento*. Editorial Reverte. 639 pp.
- G. Carrasco-Núñez, M. Ort y C. Romero (2007) Evolution and hydrological conditions of a maar volcano (Atexcac crater, Eastern Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 159(1): 179-197.
- C. Cruickshank (1992) Relación entre las aguas superficiales y subterráneas en una cuenca. *Ingeniería Hidráulica en México*. 7(1): 53-63.
- D. Defaye, E. Suárez-Moráles y J. Von-Vopel (2011) *Studies on freshwater copepoda: a volume in honour of Bernard Dussart*. Koninlijke Brill NV. Leiden, Netherlands. 574 pp.
- S. Echaniz, A. Vignatti, G. Cabrera y S. Paggi (2012) Zooplankton richness, abundance and biomass of two hypertrophic shallow lakes with different salinity in central Argentina. *Instituto Virtual da Biodiversida de Campinas, Brasil. Biota Neotropica*. 12(2): 1-8.

- M. Elías, E. Suárez, M. Gutiérrez, M. Silva, J. Granados y T. Garfias (2008) Cladocera y Copepoda de las aguas epicontinentales de México. UNAM, Facultad de estudios superiores Iztacala ISBN: 978-970-32-4852-0, 321 pp.
- A. Filonov, I. Tereshchenko y J. Alcocer (2006), Dynamic response to mountain breeze circulation in Alchichica, a crater lake in Mexico, Geophysical Research Letters. 33, L07404, doi:10.1029/2006GL025901
- Forbes S. (1882) On some Entomostraca of lake Michigan and adjacent waters. The American Naturalist.16(1): 640-649.
- A. Gagneten (1999) Estrategias de historia de vida de copépodos marinos y dulceacuícolas, con especial referencia al estado de diapausa. Universidad nacional del litoral. Argentina. Revista FABICIB. 3(1): 173-182.
- A. Gasca (1981) Algunas notas de la génesis de los lagos-cráter de la cuenca de Oriental. Puebla-Tlaxcala-Veracruz. Departamento de Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Colección Científica Prehistoria 98, México, 55 pp.
- M. Gordon (1979) Fisiología animal: Principios y adaptaciones al medio ambiente. Editorial Continental, México. 715 pp.
- C. Hall y C. Burns (2001) Effects of salinity and temperature on survival and reproduction of *Boeckella hamata* (Copepoda: Calanoida) from a periodically brackish lake. Departmen of zoology, University of Otago, N.Z. Journal of plankton research. 23(1): 97 – 103.

- U. Hammer (1986) Saline lake ecosystems of the world. Dr. W. Junk Publishers. Boston. 616 pp.
- L. Hardie y H. Eugster (1970) The evolution of closed-basin brines. *Miizeral. American Society for Mass Spectrometry.* 3(1): 273 -290
- R. Hill (1976). *Comparative Physiology of Animals.* Edit. Harper and Row Publishers. 656 pp.
- P. Hochachka y G. Somero (1973) *Strategies of Biochemical Adaptation.* Edit. Cambridge University Press. 358 pp.
- M. Jobling (1995) Fish bioenergetics. *Oceanographic Literature Review* 9(42): 785
- P. Kilham (1990) Mechanisms controlling the chemical composition of lakes and rivers: Data from Africa. *American society of limnology and oceanography.* 35(1): 80-83
- K. Knoblich (1978) La cuenca de El Seco/Oriental. Una reserva de agua subterránea natural para el futuro. *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala.* 231-234 pp.
- O. Lahdes y L. Karjala (2007) Implications of water ionic composition for invasion of euryhaline species in inland waters – an experimental study with *Cercopagis pengoi* from the Northern Baltic Sea. Finnish Institute of Marine Research, P.O. Box 2, FI-00561 Helsinki, Finland
- W. Lampert y U. Sommer (2007). *Limnoecology.* Oxford University Press Inc., New York. 285 pp.

- C. Lee y C. Petersen (2003) Effects of developmental acclimation on adult salinity tolerance in the freshwater- invading copepod *Eurytemora affinis*. *Physiological and Biochemical Zoology: Ecological and Evolutionary Approaches*, 76(3): 296-301.
- L. León (2016) Estratigrafía y evolución del volcán tipo maar (axalapazco) Aljojuca, Puebla. Tesis para obtener el grado de maestra en ciencias de la tierra. Centro de geociencias campus Juriquilla. 168 pp.
- M. Macek, G. Vilaclara, A. Lugo y J. Alcocer (2002) Lago de Atexcac. En: De la Lanza-Espino G., García-Calderón J. (editores). *Lagos y presas de México*. AGT. 199–212 pp.
- R. Mancilla-Villa (2012) Índices de salinidad y calidad de las aguas de Tlaxcala, Puebla y Veracruz. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. México. Colegio de postgraduado campus Montecillo. 208 pp.
- G. Marten, S. Bordes y M. Nguyen (1994) Use of cyclopid copepods for mosquito control. *New Orleans. Hydrobiology* 292(1): 491 – 496.
- M. Martínez (2010) Efecto de cladóceros y copépodos sobre el fitoplancton de lago Preciosa, Puebla, Tesis para obtener el título de maestra en ciencias. Posgrado en ciencias del mar y limnología. UNAM. 53 pp.
- I. Monte (2016) Agua, pH y equilibrio químico: entendiendo el efecto del dióxido de carbono en la acidificación de los océanos. SEP, México, 96 pp.
- O. Okogwu y C. Nwani (2009) Variations in zooplankton in response to physicochemical changes in a tropical coastal lagoon. *Journal of ecophysiology and occupational health*. 9(1):67-75.

- J. Peat y B. Barton (2006) Medical statistics. A guide to data analysis and critical appraisal. Blackwell publishing. 363 pp.
- C. Potvin, M. Lechowicz y S. Tardif (1990) The statistical analysis of ecophysiological response curves obtained for experiments involving repeated measures. *Ecology*. 71(4): 1389 – 1400.
- L. Prosser (1978). *Comparative Animal Physiology*. Edit. Saunders College Publishing, 3a. edic. 966 pp.
- F. Reid (2012). The role of osmotic stress (salinity shock) in protecting the great lakes from Ballast-associated aquatic invaders. Technical report, prepare for the U.S. Saint Lawrence seaway development corporation, U.S. Department of transportation. Ann Arbor, Michigan. 31 pp.
- M. Reyes (1979) Geología de la cuenca de Oriental. Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. Departamento de Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Colección Científica Prehistoria 71, México, 62 pp.
- A. Robertson y E. Gannon (1981) Annotated checklist of the free-living copepods of the great lakes. *Journal of the great lakes research*. 7(4): 382-393.
- D. Robertson (1949) Ionic regulation in some marine invertebrates. *Journal of experimental biology*. 26(1): 182-200.
- S. Sarma S., Nandimi J., Morales-Ventura I., Delgado-Martínez y L. Gonzalez-Valverde (2006) Effects of NaCl salinity on the population dynamics of freshwater zooplankton (rotifers and cladocerans). *Aquatic ecology*. 40(1):349–360.

- K. Schimdt-Nielsen (1976) *Fisiología animal: adaptación y medio ambiente*. Barcelona, España. Editorial Omega. 499 pp.
- SEMARNAT / CONAGUA (2015) *NUM3RAGUA*. México. 91 pp.
- V. Shelford (1913). *Animal communities in temperate America, as illustrated in the Chicago region: A study in animal ecology*. Chicago: Universidad de Chicago. 368 pp.
- INEGI (1984) Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, Ciudad de México, E14-2. esc. 1: 250,000.
- INEGI (1984), Carta Hidrológica de Aguas Superficiales. Veracruz, E14-3, esc. 1: 250,000.
- INEGI (1984) Carta Hidrológica de Aguas Superficiales. Orizaba, E14-6, esc. 1: 250,000.
- J. Tóth (1995) Hydraulic continuity in large sedimentary basins. University of Alberta, Canada. *Journal of hydrogeology*. 3(4): 4-16.
- M. Valencia, I. Cerón y C. Cardona (2012) Cálculo de la solubilidad del dióxido de carbono en sistemas iónicos acuosos. *AVANCES Investigación en Ingeniería*. 9(1): 82-86.
- F. Vázquez-Gutiérrez y P. Ramírez-Gracia (1988) Contribuciones al estudio limnobotánico de la zona litoral de seis lagos cráter del estado de Puebla. En: *Anales del instituto de ciencias del mar y limnología*. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. 16(1): 1-16.

- F. Vives y A. Shmeleva (2007). Crustacea, Copépodos marinos I. Calanoida. En: Fauna Ibérica, vol. 29. Ramos, M., *et al.* (editores.). Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid. 1156 pp.
- H. Webber y V. Thurman (1991) Marine biology. Scott, Foresman and Company. USA. 424 pp.
- L. Zalizniak, B. Kefford y D. Nuggeoda (2006) Is all salinity the same? The effect of ionic compositions on the salinity tolerance in five species of fresh water invertebrates. Marine and freshwater research. 57(1): 75 – 82.

ANEXO FOTOGRÁFICO



Fotografía 1. Lago Atexcac



Fotografía 2. Lago Alchichica



Fotografía 3. Lago La Preciosa



Fotografía 4. Laguna "El Carmen"



Fotografía 5. Atexcac (interior)



Fotografía 6. Lago Quechulac



Fotografía 7. Alchichica interior



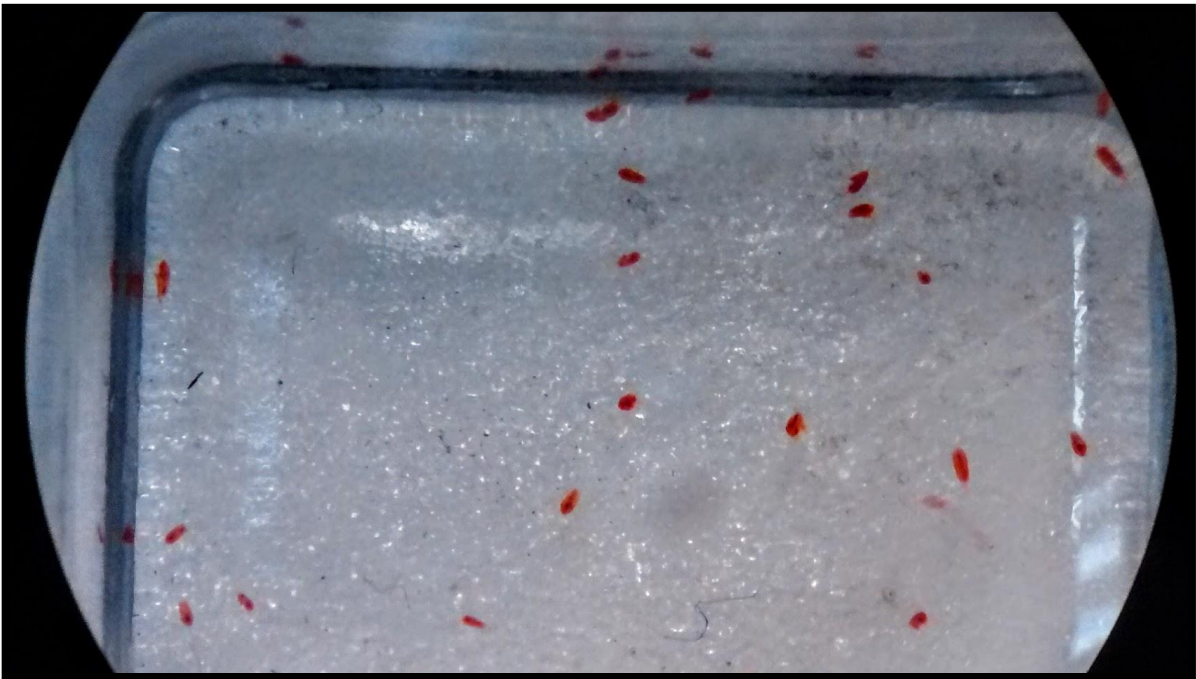
Fotografía 8. Laguna "El Carmen" (interior)



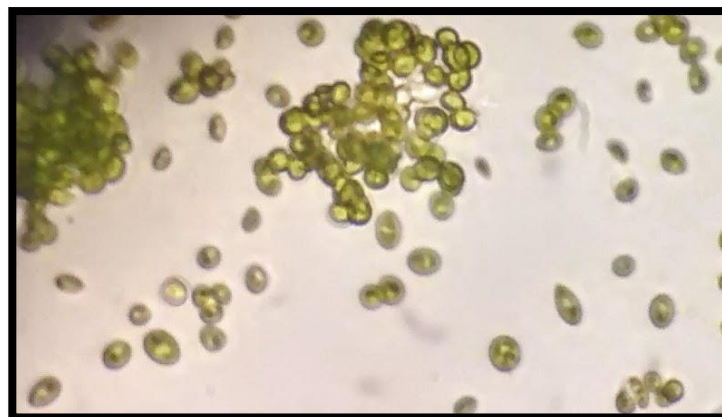
Fotografía 9. Red para el muestreo vertical



Fotografía 10. Conductímetro usado para la estimación de TDS y conductividad.



Fotografía 11. Muestra de copéodos después del cautiverio (4X).



Fotografía 12. Alga *Chlorella vulgaris*, utilizada como alimento de los copéodos (10X)



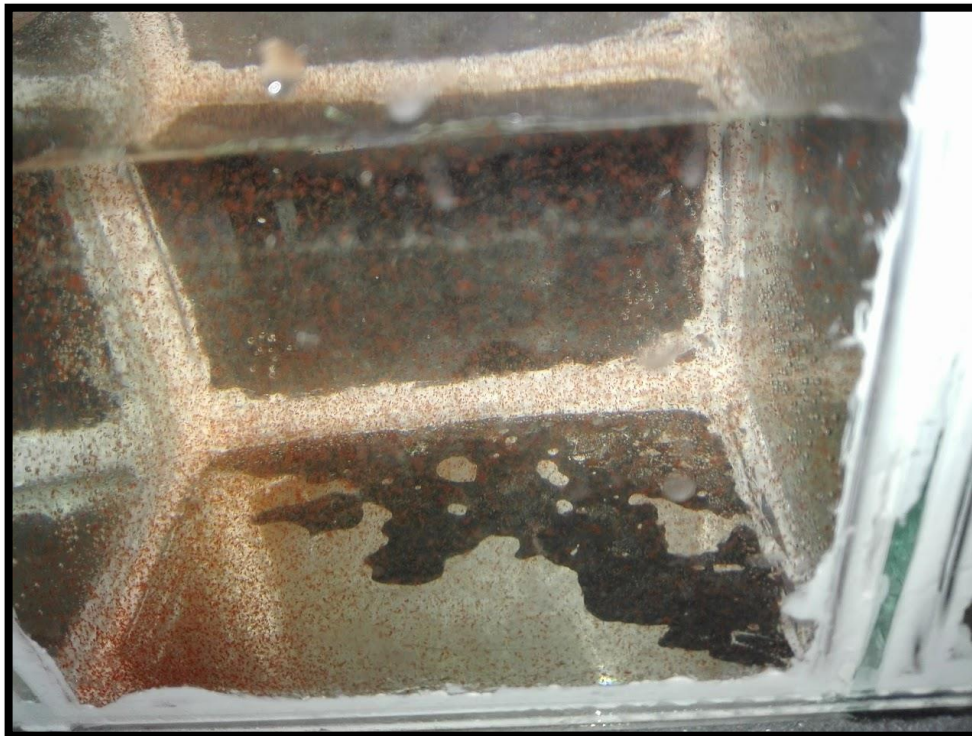
Fotografía 13. Conjunto de copéodos y diferentes estadios, del lado izquierdo una larva naupli, se logra apreciar la diferencia de tamaño entre los sexos, siendo las hembras de un tamaño mayor (10X).



Fotografía 14. Segunda foto comparativa entre un macho y una hembra de la especie *L. cf. sicilis*.



Fotografía 15. Diseño experimental a corto plazo



Fotografía 16. Muestra sobresaturada de copépodos en el experimento a corto plazo.