



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Especies de zooplancton presentes en agua
contaminada con arsénico en Matehuala, San
Luis Potosí, México.**

Tesis que presenta

Yadira Jazmín Mendoza Chávez

Para obtener el grado de

Maestra en Geociencias Aplicadas

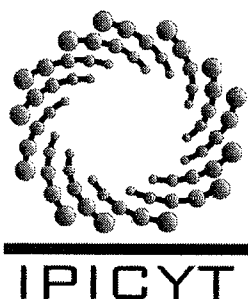
Directora de la Tesis:

Dra. Nadia V. Martínez Villegas

Co-Director de la Tesis:

Dr. Adrián Cervantes Martínez

San Luis Potosí, S.L.P., 19 de Diciembre de 2016



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis ***“Especies de zooplancton presentes en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí, México”*** presentada para obtener el Grado de Maestra en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Yadira Jazmín Mendoza Chávez** y aprobada el **diecinueve de diciembre del dos mil dieciséis** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas
Codirectora de la tesis

Dr. Adrián Cervantes Martínez
Codirector de la tesis

Dr. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre
Miembro del Comité Tutorial

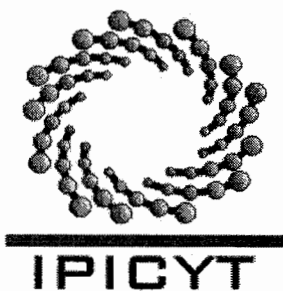


Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Hidrogeoquímica y el Laboratorio de Petrofísica y Geología Aplicada, ambos de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., así como en el Laboratorio de Limnología Tropical de la Universidad de Quintana Roo, Unidad Cozumel, bajo la dirección de los Dres. Martha Angélica Gutiérrez-Aguirre, Adrián Cervantes-Martínez y Nadia V. Martínez Villegas. Financiada con fondos de los proyectos SEP-CB-2012-183025 y Royal Society NA140182.

La autora agradece el apoyo técnico de la M.C. Ma. del Carmen Rocha Medina del Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LANBAMA), la M.C. María Mercedes Zavala Arriaga del Laboratorio de Petrofísica y Geología Aplicada, la M.C. Ana Iris Peña Maldonado y el Dr. Héctor Gabriel Silva Pereyra del Laboratorio de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN) y a la Dra. O. Araceli Patón Soberano del Laboratorio de Biología Molecular, por las facilidades otorgadas para realizar los análisis experimentales de agua y tejido animal.

Durante la realización del trabajo la autora recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (575862) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 021 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 19 días del mes de diciembre del año 2016, se reunió a las 09:05 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre	Presidente	UQROO
Dr. Adrián Cervantes Martínez	Secretario	UQROO
Dr. Luis Felipe Cházaro Ruiz	Sinodal	IPICYT
Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó la C.

Yadira Jazmín Mendoza Chávez

sobre la Tesis intitulada:

Especies de zooplancton presentes en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí, México

que se desarrolló bajo la dirección de

Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas
Dr. Adrián Cervantes Martínez (UQROO)

El Jurado, después de deliberar, determinó

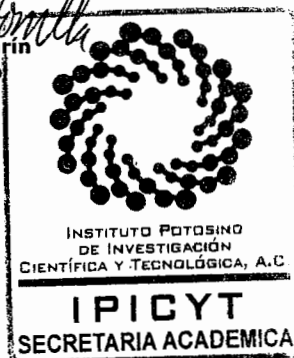
APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 11:40 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 19 días del mes de diciembre de 2016.


Mtra. Ivonne Licette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico



Agradecimientos

La realización de este trabajo de investigación fue posible gracias a la colaboración de muchas personas, a las cuales de manera personal quiero externar mi eterno agradecimiento.

Primeramente, a *Dulce, Irene y Ernesto*, mi familia, por darme el apoyo moral necesario para no vencerme en momentos de dificultad.

A la *Dra. Nadia*, por el conocimiento compartido, la paciencia y la confianza que siempre me demostró, apoyándome siempre en lo académico y en lo personal, más que una forma de trabajo, las enseñanzas que aprendí con ella son para toda la vida.

A los *Dres. Adrián y Marthita*, extraordinarias personas que me mostraron un mundo desconocido, al cual ahora le tengo cariño, por el tiempo brindado al desarrollo del proyecto y su hospitalidad en Cozumel, por cierto, a Luis Uc por el gran apoyo en el muestreo y trabajo de laboratorio en la UQRoo.

A los seres maravillosos que conocí en el Laboratorio de Hidrogeoquímica: *Antonio, Andrea, Esther, Christian, Rodrigo, Martín, Dalia, Margaret, Esaú, Elena* y bueno, a mi amigo de años, *Gerardo*, quiénes siempre tuvieron palabras de aliento, me brindaron apoyo con su tiempo y conocimiento, y por supuesto, a *Gaby Pérez*, por la paciencia y siempre tener la solución adecuada.

A mis compañeros y amigos: *Martha, Vichy, Uriel, Mauricio, Luz, Ángeles, Raúl, Selene, Christian, César, Jorge*, por su apoyo y buena vibra siempre.

A la familia Jaramillo Loredó, por acompañarme con tanto cariño en este camino.

A Diego, por creer en mí.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos Institucionales	iii
Acta de Examen	iv
Agradecimientos	v
Contenido.....	vi
Índice de Tablas	viii
Índice de Figuras	ix
Anexos	xii
Glosario.....	xiii
Resumen.....	xv
Abstract	xvii
Perspectiva, hipótesis y objetivos	xix
Hipótesis	xx
Objetivos	xx
Capítulo 1. Agua: importancia y distribución.....	1
1.1 Hidrósfera y distribución del agua en la Tierra	2
1.2 Agua dulce: importancia y reservorios	3
1.3 Calidad del agua en la actualidad.....	4
1.3.1 Eutrofización de las aguas superficiales.....	6
Capítulo 2. Bioindicadores	7
2.1 Cadena Trófica.....	8
2.2 Criterios para la elección de bioindicadores.....	9
2.2.1 Criterios para peces	10
2.2.2 Criterios para moluscos.....	10
2.2.3 Criterios para insectos acuáticos	10
2.2.4 Criterios para plancton.....	10
Capítulo 3. El zooplancton como bioindicador de calidad de agua.....	12

3.1 Rotífera.....	13
3.2 Cladóceras.....	14
3.3 Copépodos.....	16
3.4 Importancia paleoecológica del zooplancton.....	19
Capítulo 4. Arsénico.....	21
4.1 Arsénico y toxicidad.....	22
4.2 Normatividad respecto al arsénico.....	27
Capítulo 5. Incorporación del arsénico en la cadena trófica.....	31
5.1 Bioconcentración.....	32
5.2 Bioacumulación.....	33
5.3 Biomagnificación.....	33
Capítulo 6. Materiales y métodos.....	35
6.1 Ubicación y características de las muestras.....	36
6.3 Determinación de la concentración de zooplancton.....	39
6.2 Determinación de arsénico en agua y zooplancton.....	39
6.5 Preparación de muestras biológicas para análisis MEB y TEM.....	40
6.5.1 Procedimiento del Tren de Secado.....	40
Capítulo 7. Resultados y discusión.....	42
7.1 Parámetros de agua y concentraciones de arsénico.....	43
7.2 Abundancia de zooplancton.....	46
7.3 Especies de zooplancton.....	48
7.4 Arsénico y zooplancton.....	52
7.5 Bioconcentración de arsénico en organismos.....	60
7.5.1 Factores de Bioconcentración (FBC).....	62
Conclusiones.....	64
Referencias.....	66
Anexo 1 Ponencia en el IV Seminario en Manejo de Recursos Naturales, con el título “Especies de zooplancton presentes en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí, México”.....	72

Índice de Tablas

Tabla 1 Valores para los límites máximos permisibles de arsénico en la descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Tomada de (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1996).	28
Tabla 2 Límites máximos permisibles de arsénico en la descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Tomada de CE-CCA-001/89, (Diario Oficial de la Federación, 1989).	29
Tabla 3 Ubicación de los puntos de muestreo, para las dos campañas de muestreo.	36
Tabla 4 Características de los recipientes contenedores de muestras de agua.....	38
Tabla 5 Temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), alcalinidad, salinidad y concentraciones de arsénico en muestras de agua para los muestreos 1 (M1) y 2 (M2).	44
Tabla 6 Sitio, lugar, grupo especie y abundancia de zooplancton identificadas en muestras recolectadas en la campaña de muestreo 1.	49
Tabla 7 Sitio, lugar, grupo especie y abundancia de zooplancton identificadas en muestras recolectadas en la campaña de muestreo 2.	50
Tabla 8 Factores de bioconcentración de arsénico de los organismos analizados.....	63

Índice de Figuras

Figura 1 Distribución del agua en la Tierra. Tomado de USGS, 2016.....	3
Figura 2 Anatomía de un rotífero: A, vista dorsal. B, vista lateral. C, sección transversal. Tomado de Ruppert and Barnes, 1996.....	13
Figura 3 A, Hembra de un cladóceros, <i>Daphnia pulex</i> , vista lateral. B, vista central de <i>Daphnia</i> . C, <i>Chydorus gibbus</i> , un cladóceros más redondeado que <i>Daphnia pulex</i> . Tomado de Ruppert and Barnes, 1996.	15
Figura 4 A, un copépodo ciclopoideo, <i>Macrocyclops albidus</i> (vista dorsal). B, un copépodo calanoideo típico, <i>Calanus</i> (vista central) mostrando los apéndices. C, <i>Pseudocalanus</i> , (vista ventral) mostrando apéndices. Tomado de Ruppert and Barnes, 1996.	17
Figura 5 Estadios inmaduros del copépodo <i>Oithona hebes</i> : (a) nauplio y (b) copepodito. Tomado de Zoppi, 2012.	18
Figura 6 (A) Diatomea, (B) Ostrácodo, (C) Radiolario, (D) Esponja, (F, G) Foraminífera y (H) Cocolitóforo. Tomado de Microfossil Groups, 2016. Micropalaeontology.	20
Figura 7 Diagrama Eh-pH para especies acuosas de arsénico a 25 °C y sus respectivos diagramas de especiación de As Tomado de (Brookins, 1988; Lillo, 2003; Smedley and Kinniburgh, 2002)	23
Figura 8 Especies de arsénico más comunes en muestras biológicas y medioambientales. Tomado de García, 2013.	25
Figura 9 Metilación del arsénico tomada de Caumette et al., 2012c.	26

Figura 10 Representación gráfica de los conceptos de bioconcentración, bioacumulación y biomagnificación.....	34
Figura 11 Mapa de la zona de estudio y sitios elegidos para realizar las campañas de muestreo.....	37
Figura 12 Proceso de tren de secado.....	41
Figura 13 Concentraciones de arsénico en muestras de agua mostrando que éstas sobrepasan el límite máximo permisible de arsénico en cuerpos de agua naturales para mantener el equilibrio ecológico (Diario Oficial de la Federación, 1989) y las concentraciones letales de arsénico para zooplancton según Chen et al., 1999a.....	46
Figura 14 a) Concentración de zooplancton por punto de muestreo y grupo para la campaña de muestreo 1. b) Concentración de zooplancton por punto de muestreo y grupo para la campaña de muestreo 2. c) Concentración de zooplancton por grupo y sitio de muestreo para campaña de muestreo 1. d) Concentración de zooplancton por grupo y sitio de muestreo para la campaña de muestreo 2.	48
Figura 15 Ejemplares de zooplancton del grupo copépoda mostrando a) una hembra de la especie <i>Paracyclops chiltoni</i> encontrados en el sitio 1 (Club de Tiro), b) un macho de la especie <i>Paracyclops chiltoni</i> encontrados en el sitio 1 (Club de Tiro), c) un nauplio de copépodo encontrado en el sitio 2 (Abrevadero) y d) un copepodito encontrado en el sitio 3 (Laguna).	52
Figura 16 Abundancia de zooplancton en función de las concentraciones de arsénico, donde los números del 1 al 5 indican los sitios de muestreo: 1 (Club de Tiro), 2 (Abrevadero), 3 (Laguna), 4 (Presa) y 5 (Canal).....	54

Figura 17 Abundancia de zooplancton por sitio, para la campaña de muestreo 1.....	57
Figura 18 Abundancia de zooplancton por sitio, para la campaña de muestreo 2.....	58
Figura 19 Abundancia de cada especie de zooplancton encontrada para M1 y M2 y concentración de arsénico encontrada en el sitio de su recolección.....	60
Figura 20 Bioconcentración de arsénico en distintos organismos colectados y concentración de arsénico en el agua en que habitan. a) Peces, b) Zooplancton, c) Insectos y d) Caracoles.....	62

Anexos

Anexo 1 Ponencia en el IV Seminario en Manejo de Recursos Naturales, con el título “Especies de zooplancton presentes en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí, México”	72
Anexo 2, Memorias del “IV Seminario en Manejo de Recursos Naturales: Conservación y Manejo de la Biodiversidad”	73
Anexo 3 Constancia de participación en el “IV Congreso Interdisciplinario de Posgrados, IPICYT”, con la presentación del cartel titulado “Zooplancton presente en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí”	74
Anexo 4 Constancia de participación en el “V Congreso Interdisciplinario de Posgrado, IPICYT”, en la modalidad Presentación oral de IPITESIS, con el título “Arsénico y zooplancton: concentraciones letales o nuevos organismos bioindicadores”	75

Glosario

Bivalvo: Generalmente dos conchas que cubren y protegen el cuerpo blando de un molusco.

Cilios: Prolongaciones celulares cortas (2-10 μm), siempre numerosos, que constituyen un sistema de movimiento en que las funciones de sostén y de movimiento se hallan integradas en un armazón tubular.

Diversidad: Tipo y número de especies que viven en un sitio dado. La propia existencia de una amplia variedad de especies u otros rangos de plantas, animales y microorganismos en una comunidad natural o hábitat.

Endemismo: Carácter de las especies de seres vivos que tienen una distribución geográfica limitado, reducido y que no se encuentra de forma natural en ninguna otra parte del mundo.

Especie: Grupo de individuos que se reproducen entre sí, tiene un antecesor común y están aislados de otros grupos desde el punto de vista reproductor; unidad taxonómica inferior al género y designada con los nombres genérico y específico.

Eutrófico: Propiedad de las aguas de lagos, con buena cantidad de nutrientes y escasa cantidad de oxígeno.

Heterótrofos: Tipo de metabolismo que requiere de materia orgánica previamente elaborada para realización de sus funciones.

Micrófagas: Dícese del animal que se nutre de presas o partículas alimenticias microscópicas.

Oligotrofia: Propiedad de las aguas de lagos, con escasa cantidad de sustancias nutritivas y poca producción de fitoplancton.

Protistas: Constituyen el tercer reino de los microorganismos. Entre ellos se encuentran todos los unicelulares típicos de los reinos animal y vegetal.

Sucesión: Proceso gradual por el cual cambia la composición de especies en una comunidad.

Taxón: Grupo de organismos emparentados, que en una clasificación dada han sido agrupados, asignándole un nombre en latín, una descripción si es una especie, y un tipo.

Resumen

El arsénico es un contaminante del agua que causa daños a la salud de los organismos acuáticos. El límite máximo permisible de arsénico en agua para la protección de la vida acuática en la normativa mexicana es de 0.2 mg/L. Por otro lado, se ha reportado la concentración letal de arsénico de 3 mg/L, en zooplancton expuesto en pruebas de laboratorio (Chen et al., 1999a). Por lo que surge la pregunta ¿hay presencia de zooplancton en aguas altamente contaminadas? En Matehuala, San Luis Potosí, México, se han reportado concentraciones de arsénico, en aguas superficiales, de hasta 158 mg/L, pero se desconoce la existencia de zooplancton. El objetivo de este estudio fue: i) determinar concentraciones de arsénico en muestras de agua de Matehuala, ii) cuantificar e identificar a las especies de zooplancton presentes en cuerpos de agua de Matehuala y iii) cuantificar la bioconcentración de arsénico en los organismos del zooplancton. Para dicho efecto, se recolectaron 10 muestras de agua en el área de estudio-en recipientes de plástico para ser transportados al laboratorio y determinar arsénico por espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo óptico (ICP-OES). Adicionalmente, se colectaron 10 muestras de zooplancton filtrado a 4.5 µm, que se fijaron, en alcohol concentrado, para la cuantificación y determinación de especies. Finalmente, se recolectaron 5 muestras de zooplancton, 4 muestras de peces, 2 muestras de insectos y 1 muestra de caracoles, todos filtrados a 4.5µm, para determinar la bioconcentración del contaminante en éstos, previa digestión con HNO₃ y H₂O₂. Las concentraciones de arsénico en agua de Matehuala variaron desde los <0.01 mg/L hasta los 53.23 mg/L. En total, se encontraron 10 especies de zooplancton. En agua con niveles de arsénico menores a los 0.2 mg/L, se encuentran: *Eucyclops sp.* y *Macrocyclus albidus* del grupo Copépoda, *Alona cf. setulosa*, *Chydoridae* y *Simocephalus punctatus*, del grupo Cladóceras, además de algunos individuos del grupo Rotífera. Mientras que *Macrocyclus albidus*, *Chydoridae*, *Paracyclops chiltoni* y *Eucyclops chihuahuensis* del grupo Copépoda, *Latonopsis australis*, *Pleuroxus quasidenticulatus* y *Acanthocyclops sp.* del grupo Cladóceras y algunos individuos del grupo Rotífera, fueron encontrados en agua contaminada con arsénico (>0.2 mg/L). La bioconcentración de arsénico fue de 746.2 mgAs/kg para el grupo

copépoda recolectado en muestras de agua con concentraciones de arsénico de 5.33 mg/L. Las concentraciones de arsénico en agua reportadas en este estudio son hasta 17 veces superiores que las reportadas como letales para zooplancton y ocasionan una alta bioconcentración de arsénico en zooplancton, comparada con los valores reportados en la literatura de 32 mgAs/kg en zooplancton expuesto a 0.2 mgAs/L en agua.

En el acuífero de Matehuala hay niveles de arsénico que exceden la normativa mexicana para la protección de la vida acuática, no obstante, existe presencia de zooplancton y bioconcentración de arsénico. Los resultados de este estudio contribuyen a la identificación de las especies de zooplancton que habitan en sistemas acuáticos de Matehuala y evidencian tanto especies de zooplancton habitando en agua altamente contaminada con arsénico como especies de zooplancton que podrían utilizarse como bioindicadores regionales de calidad del agua. Los resultados de esta tesis evidencian organismos de relevancia biológica y social, sensibles a la contaminación por arsénico que podrían probarse como indicadores de calidad el agua en San Luis Potosí y el resto del país, en lugar de *Daphnia Magna*, especie exótica, que se utiliza actualmente en México como indicador calidad el agua.

Palabras clave: agua contaminada, arsénico, zooplancton, bioconcentración, bioindicador, Matehuala.

Abstract

Arsenic is a water pollutant that causes damage to the health of aquatic organisms. On one hand, the maximum permissible limit of arsenic in water for the protection of aquatic life in Mexican regulations is 0.2 mg/L. On the other hand, lethal concentration of 3 mg/L for zooplankton exposed to arsenic have been reported in laboratory tests (Chen et al., 1999). Therefore, the question arises: is zooplankton exists in highly polluted waters? In Matehuala, San Luis Potosi, Mexico, arsenic concentrations, up to 158 mg/L, have been reported in surface water, but the existence of zooplankton is unknown. The aim of this study was: i) to determine arsenic concentrations in surface water samples in Matehuala, ii) to quantify and identify zooplankton species present in Matehuala water bodies and iii) to quantify the bioconcentration of arsenic in zooplankton organisms. To this effect, 10 water samples were collected in the study area and placed in plastic containers to be transported to the laboratory and determine arsenic concentrations by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-OES). In addition, 10 samples of zooplankton, filtered to a 4.5 μm mesh, were collected in alcohol to quantify organisms and identify species. Finally, 5 zooplankton samples, 4 fish samples, 2 insect samples and 1 snail sample, all of them filtered at 4.5 μm , were collected to determine the bioconcentration of the contaminant in the latter, after digestion with HNO_3 and H_2O_2 . Results show that arsenic concentrations in surface water in Matehuala ranged from <0.01 mg/L to up to 53.23 mg/L. In total, 10 species of zooplankton were found. In water with levels of arsenic less than 0.2 mg/L, among which are: *Eucyclops sp.* and *Macrocylops albidus* of the group Copepod, *Alona cf. Setulosa*, *Chydoridae* and *Simocephalus punctatus*, from the Cladocera group, as well as some individuals from the Rotifera group. Whereas *Macrocylops albidus*, *Chydaridae*, *Paracyclops chiltoni* and *Eucyclops chihuahuensis* of the group Copepod, *Latonopsis australis*, *Pleuroxus quasidenticulatus* and *Acanthocyclops sp.* Of the Cladocera group and some individuals of the Rotifera group were found in water contaminated with arsenic (> 0.2 mg / L). Arsenic bioconcentration for the Copepoda group, collected water samples containing 5.33 mgAs/L, was 746.2 mg/kg. Arsenic concentrations in water reported in this study are up to 17 times higher than those

reported as lethal to zooplankton and cause high bioconcentration of arsenic in zooplankton, compared with the values of 32 mgAs/kg in zooplankton exposed to 0.2 mgAs/L in water reported in the literature.

In Matehuala aquifer there is arsenic levels that exceed Mexican requirements for the protection of aquatic life, however, there is presence of zooplankton and bioconcentration of arsenic. The results of this study contribute to the identification of zooplankton species living in Matehuala aquatic systems and evidence both zooplankton species inhabiting water highly polluted with arsenic, as well as zooplankton species that could be used as regional bioindicators of water quality. The results of this thesis show organisms of biological and social relevance, sensitive to arsenic contamination that could be tested as indicators of water quality in San Luis Potosí and the rest of the country, instead of *Daphnia Magna*, an exotic specie that is used currently in Mexico as a water quality indicator.

Key words: polluted water, arsenic, zooplankton, bioconcentration, biomarker, Matehuala.

Perspectiva, hipótesis y objetivos

En el ánimo de la sociedad existe una preocupación que recientemente se ha hecho presente debido a la disminución de la calidad del recurso agua. En raras ocasiones se piensa que los ríos y los lagos son también el hábitat de una gran diversidad de organismos acuáticos. No obstante, resulta por demás interesante saber que hay una gran variedad de organismos que no se pueden ver a simple vista dentro del agua, debido a que son microscópicos, pero tienen un papel fundamental en hacer del sistema acuático un lugar habitable para el resto de las especies. Dentro de estos organismos se encuentra el fitoplancton y el zooplancton (Zambrano, 2007).

El fitoplancton es la base de la cadena alimenticia en el mar y en otros cuerpos acuáticos, por lo cual se le considera como uno de los principales productores primarios (Alonso-Rodríguez et al., 2004). Por otro lado, el zooplancton está constituido por un grupo de animales acuáticos que, aunque son incapaces de contrarrestar las corrientes, tienen la capacidad de suspenderse en el agua debido a que cuentan con estructuras especializadas para la natación. Todos los organismos considerados dentro del zooplancton son heterótrofos (De la Lanza et al., 2000) y sus hábitos alimenticios son altamente diversos. Dentro del zooplancton de agua dulce encontramos a una gran diversidad de animales; sin embargo, en los sistemas continentales, los tres grupos dominados por diversidad, abundancia y biomasa son los rotíferos, los cladóceros y los copépodos (Cervantes Martínez et al., 2012). Dichos organismos se han reportado en agua contaminada con arsénico (citado), pero ¿qué tan contaminada? En un estudio realizado por Caumette et al., (2011), se reporta presencia de zooplancton en agua con concentraciones de 0.04 mg/L mientras que Chen et al., (1999a), reporta concentraciones letales de arsénico de 3 mg/L.

En el estado de San Luis Potosí, México, de acuerdo con estudios realizados por Martínez-Villegas et al., 2013, se han encontrado altas concentraciones de arsénico en agua, en una surgencia de agua ubicada en la ciudad de Matehuala, que, a su vez, abastece de agua a un complejo hidráulico artesanal que descarga en una laguna artificial que tiene uso recreativo. Dentro de esta área, en específico, en el lugar llamado Club de Tiro, se han encontrado concentraciones de hasta 158mg/L (Martínez-Villegas et al., 2013). Después de conocer las concentraciones letales de arsénico en zooplancton se espera que difícilmente se encuentre zooplancton en nuestra área de estudio. Por lo anterior, esta investigación radica en verificar la presencia de zooplancton en agua no contaminada y contaminada con arsénico en Matehuala y, en caso de existir, determinar las especies presentes de zooplancton en ambientes acuáticos tanto contaminados con arsénico como libres de contaminación y, para ésta última condición, determinar la concentración del arsénico en dichos microorganismos.

Hipótesis

Basado en estos argumentos, la hipótesis de esta tesis es:

En el agua contaminada con altos niveles de arsénico en Matehuala no habita zooplancton.

Objetivos

El objetivo general de esta tesis es verificar la presencia de zooplancton en agua no contaminada y contaminada con arsénico y en caso de existir; determinar las especies presentes de zooplancton en ambiente acuático tanto contaminado con arsénico como libre de contaminación y determinar la concentración del arsénico en dichos microorganismos.

Los objetivos específicos son:

- ✓ Determinar concentraciones de arsénico en muestras de agua.
- ✓ Determinar abundancia de zooplancton.
- ✓ Identificar especies de zooplancton.
- ✓ Medir la bioconcentración de arsénico en el zooplancton.

Capítulo 1. Agua: importancia y distribución

El agua tiene diversas propiedades únicas derivadas de la estructura que tiene su molécula (Desonie, 2008). Una molécula muy simple formada por dos átomos de hidrógeno unidos en forma covalente con un átomo de oxígeno, es muy importante en nuestro planeta. Hay una inmensa cantidad de agua en nuestro planeta; sin embargo en su mayoría no se encuentra disponible para la mayoría de los usos (Pérez-Salazar, 2014).

1.1 Hidrósfera y distribución del agua en la Tierra

La hidrósfera es una masa de agua dinámica que está en movimiento continuo, evaporándose de los océanos a la atmósfera, precipitándose sobre la Tierra y volviendo de nuevo al océano por medio de ríos. El océano global es, por supuesto, el rasgo más destacado de la hidrósfera, mismo que cubre casi un 71 % de la superficie terrestre, hasta una profundidad media de unos 3 800 metros y representa alrededor del 97 % del agua en la Tierra. Sin embargo, la hidrosfera incluye también el agua dulce que se encuentra en torrentes, lagos y glaciares. Aunque estas últimas fuentes constituyen tan solo una diminuta fracción del total, son mucho más importantes de lo que indica su escaso porcentaje, ya que proporcionan vital líquido para la vida en la Tierra. Los torrentes, glaciares y aguas subterráneas son responsables de esculpir y crear muchos y variados paisajes de nuestro planeta (Tarbuck and Lutgens, 2005).

El volumen total de agua que hay en la Tierra es de 1386 millones de km³, la mayor parte en estado líquido mientras que en estado sólido sólo hay 25 millones de km³. Este volumen de agua está repartido en dos tipos (USGS, 2016):

- i) Agua salada: la contenida en los océanos y los mares. Se llama así porque tiene un gran contenido en sales, sobre todo sal común (cloruro de sodio). Numéricamente esto indica que casi el 97 % del volumen total de agua es agua salada, como se observa en la *Figura 1*.
- ii) Agua dulce: se encuentra en ríos, lagos, hielos y aguas subterráneas. Tiene menos contenido en sales. Siendo el agua dulce menos del 3 % restante del volumen total del agua en el planeta.

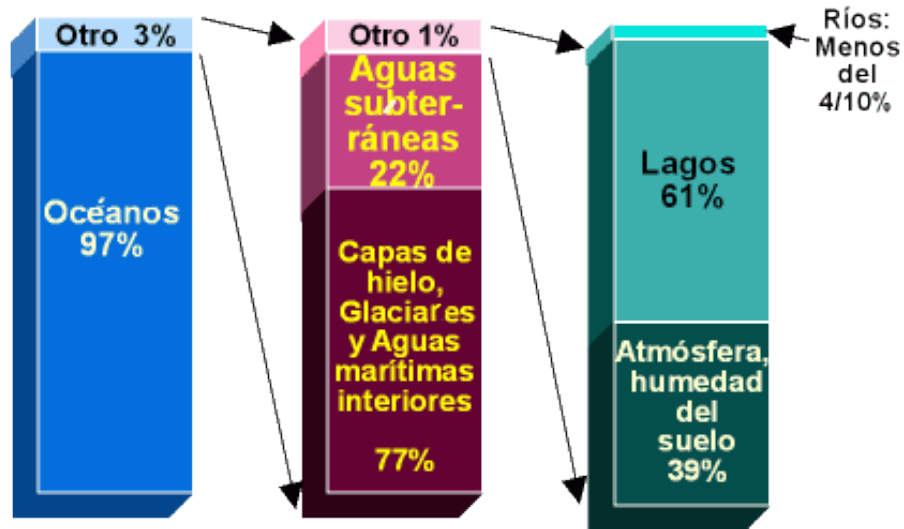


Figura 1 Distribución del agua en la Tierra. Tomado de USGS, 2016.

1.2 Agua dulce: importancia y reservorios

Del casi 3 % de agua dulce presente en la Tierra, aproximadamente un 2 % está contenido en glaciares, y menos del 1 % es mayormente agua subterránea, con una pequeñísima fracción para ríos y lagos en el mundo. Sin embargo, el agua dulce es esencial para la vida (Skofronick-Jackson, 2016). Los cuerpos de agua continental son de varios tipos incluyendo flujos de agua, lagos, reservorios y agua subterránea. Todos están inter-conectados por el ciclo hidrológico con muchos cuerpos de agua intermedios, tanto naturales como artificiales, humedales, pantanos y acuíferos aluviales, tienen características de que son intermediarios hidrológicos entre estos ríos, lagos y aguas subterráneas (Bartram and Ballance, 1996).

En el ciclo hidrológico, una proporción importante de la precipitación pluvial regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración, mientras que el resto

escurre por ríos y arroyos delimitados por las cuencas, o bien se infiltra en los acuíferos. Las cuencas con unidades naturales del terreno, definido por la existencia de una división de las aguas debida a la conformación del relieve.

Para propósitos de administración de las aguas nacionales la Comisión Nacional del Agua, ha definido 731 cuencas hidrológicas. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas y a su vez se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas. En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos (CONAGUA, 2013).

Anualmente México recibe 1 489 mil millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 71.6 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.2 % escurre por los ríos o arroyos y el 6.2 % restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua de los países vecinos, el país anualmente cuenta con 471.5 mil millones de metro cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA, 2013).

1.3 Calidad del agua en la actualidad

La calidad del agua abarca varias características del agua, desde el sabor y color hasta la temperatura y pureza. Se han encontrado diferentes niveles de calidad de agua a nivel regional y a través del mundo, basados en la tecnología disponible y los recursos económicos. La calidad del agua puede variar, dependiendo de su uso: alta calidad es necesaria para agua potable, mientras que niveles bajos es a veces aceptable para propósitos de irrigación, así como en reutilización de aguas residuales. El uso del agua también afecta la calidad del agua, degradando su pureza por medio de contaminación o cambios de pH (Moore, 2007).

Es esencial que todos los datos hidrológicos disponibles sean incluidos en una evaluación de la calidad del agua debido a que la calidad del agua se ve

profundamente afectada por la hidrología del cuerpo de agua. La información mínima requerida es la variación estacional de la descarga de los ríos, los regímenes térmicos y mezcla de lagos, así como el régimen de recarga y el patrón de flujo subterráneo de las aguas subterráneas (Bartram and Ballance, 1996).

El agua en su estado natural no es pura. El agua naturalmente adquiere suciedad, minerales y partículas a medida que fluye por el suelo. Mucha de la contaminación que amenaza el suministro de agua hoy es antropogénica, es decir, generada por los seres humanos y no por procesos naturales. La industria, la agricultura y la sobrepoblación han contribuido a la contaminación mundial del agua (Moore, 2007).

Una referencia ampliamente utilizada en México para evaluar la calidad del agua se refiere a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89, con base en éstos, los cuerpos de agua se pueden calificar como aptos, o no, para ser utilizados como (Martínez-Villegas et al., 2016):

- Fuente de abastecimiento de agua potable,
- En actividades recreativas con contacto primario,
- Para riego agrícola,
- Para uso pecuario,
- En la acuicultura, o
- Para la protección de la vida acuática.

Estos criterios deben reflejar con precisión los últimos conocimientos científicos relativos al tipo y alcance de los efectos identificables en la salud y el ambiente que se pudieran esperar de la presencia de contaminantes en cuerpos de agua, incluidos los acuíferos. Además, debían incluir los últimos conocimientos relativos a la concentración y la dispersión de contaminantes, o sus productos derivados, a través de procesos biológicos, físicos y químicos. Por último, señalar los efectos de los contaminantes en las comunidades biológicas, la productividad y la

estabilidad, incluyendo información sobre los factores que afectaban las tasas de eutrofización y sedimentación orgánica e inorgánica. Esta información podría ser útil para formular estándares basados en consideraciones de impactos en la calidad del agua (Martínez-Villegas et al., 2016).

1.3.1 Eutrofización de las aguas superficiales

La eutrofización es el enriquecimiento de las aguas superficiales con nutrientes para las plantas. Si bien la eutrofización se produce en forma natural, normalmente está asociada a fuentes antropogénicas de nutrientes. El “estado trófico” de los lagos es un concepto fundamental en la ordenación de los mismos. Significa la relación entre el estado de nutrientes en un lago y el crecimiento de la materia orgánica en el mismo (Ongley, 1997). El contenido de materia orgánica de un agua es hasta cierto límite bueno, ya que favorece la existencia de los seres vivos. El problema se presenta cuando hay un exceso de nutrientes, ya que entonces se produce un crecimiento excesivo de plantas y otros organismos que consumen oxígeno y que al morir se pudren disminuyendo drásticamente la calidad del agua (Murillo et al., 2010).

Para evaluar el proceso de eutrofización se contemplan diferentes estrategias que van desde la inspección visual hasta técnicas de vanguardia, como el método isotópico de marcaje con isótopos radiactivos, además de la tecnología de información satelital. Todos ellos tan importantes como funcionales (Moreno et al., 2010).

Capítulo 2. Bioindicadores

El uso de información biológica en la toma de decisiones en la calidad del agua se ha incrementado a partir de los años setenta en diversos países, sobre todo como una herramienta analítica para dar información de la estructura y función de las comunidades biológicas presentes o sobre el cambio de condiciones pasadas (De la lanza et al., 2000).

2.1 Cadena Trófica

No todos los seres vivos tienen el mismo tipo de alimentación. Atendiendo a esta característica podemos hacer grupos dentro del ecosistema a los que llamamos niveles tróficos (tropos = alimentación). Se distinguen los siguientes (Borrego et al., 1994):

- a) Productores, constituyen el primer nivel. Son aquellos capaces de fabricar el alimento que necesitan partiendo de la luz y de las sustancias inorgánicas. Ellos sirven de alimento a los otros niveles. Son las plantas verdes y las algas.
- b) Consumidores, son los que consumen alimentos producidos directa o indirectamente por las plantas verdes y algas. Dentro de éstos existen varios subgrupos:
 - I. Consumidores primarios. Son los herbívoros y el zooplancton vegetariano, que se alimentan directamente de los productores.
 - II. Consumidores secundarios. Son los carnívoros y el zooplancton no vegetariano, que se alimentan de consumidores primarios.
 - III. Consumidores terciarios. Son los superpredadores.
- c) Descomponedores, organismos que se alimentan transformando la materia orgánica de cadáveres y restos vegetales y animales en materia mineral. De esta manera, permiten el retorno de los elementos minerales al suelo o al agua, para ser de nuevo incorporados por los productores. Son las bacterias y los hongos los que forman este nivel.

Actualmente algunos países han adquirido esta metodología biológica para su legislación de la calidad del agua, previo análisis. Se señalan los siguientes beneficios de los bioindicadores (De la lanza et al., 2000):

1. Los datos biológicos son fácilmente accesibles como los químicos y físicos.
2. La información puede expresarse numéricamente.
3. Existen conceptos biológicos que, propiamente aplicados, proveen información mejor que otros descriptores para cierto tipo de contaminación.

4. La colección y evaluación de información biológica pueden realizarse por grupos industriales u otros ajenos a la biología.

2.2 Criterios para la elección de bioindicadores

Puesto que no todas las variables biológicas pueden servir para un programa de monitoreo, su elección debe evaluarse y verificarse contra un número de requerimientos y sopesar diferentes aspectos. La mayoría de evaluaciones y monitoreos mejoran esto seleccionando los indicadores específicos, según las necesidades. Esto se resuelve definiendo las características de un indicador para un propósito dado. En forma general se toman los siguientes criterios (De la lanza et al., 2000):

1. Relevancia biológica, ya que es importante el mantenimiento del balance de la comunidad.
2. Relevancia social en el sitio que habita.
3. Sensible a estresores, es decir, no presentar respuestas a una variedad extrema natural.
4. Ampliamente aplicable a muchos estresores y sitios.
5. Que tenga un diagnóstico a un estresor particular que causa el problema.
6. Medible, operacionalmente definido y medible a través de procedimientos estándar y de un bajo error.
7. Interpretable, distinguirse en forma aceptable de lo no aceptable, desde el punto de vista científico y legal.
8. Costo efectivo, barato en su medición y que prevea de una mayor información por unidad de esfuerzo.
9. Integrativo, que sume información de muchos indicadores no medidos.
10. Disponibilidad de datos históricos para definir la variabilidad inactiva, tendencias y posibilidad de las condiciones aceptables y no aceptables.

2.2.1 Criterios para peces

Los peces son usados como organismos indicadores en programas de monitoreo biológico por las siguientes características: la información de sus ciclos de vida es muy completa para algunas especies, las comunidades de peces generalmente incluyen una gran variedad de especies, las cuales representan una variedad amplia de niveles tróficos, en los que se incluyen alimento tanto de origen acuático como terrestre y los peces son relativamente fáciles de identificar en el campo y manipular para su transporte (Aguilar, 2005).

2.2.2 Criterios para moluscos

El listado de los criterios para seleccionar moluscos indicadores se describe a continuación, se requiere: que sean especies endémicas a ciertos cuerpos de agua, que sean especies que aunque no sean exclusivas de un cuerpo de agua, las poblaciones desaparezcan de los sitios donde se vierten sustancias químicas y que sean especies que acumulan en su interior metales o sustancias químicas (Roldán Pérez, 1999).

2.2.3 Criterios para insectos acuáticos

Los insectos pueden ser un indicador de calidad de agua si son biológicamente relevantes en el balance y equilibrio de las comunidades, dada su importancia ecológica como alimento para vertebrados, peces, aves y anfibios, así como en la transferencia de energía por su dispersión, deriva, emergencias en el ciclo de los nutrientes, si son socialmente relevantes dado que algunas especies resultan atractivas para su conservación en áreas naturales protegidas, como especies endémicas. Y si son especialmente sensibles a la contaminación de una respuesta rápida con cambios en la estructura de la comunidad, sucesión de especies, bioacumulación, efectos mutagénicos y extinción (Barba-Álvarez et al., 2013) .

2.2.4 Criterios para plancton

De acuerdo con sus ciclos vitales cortos, las algas microscópicas del fitoplancton reflejan fluctuaciones ambientales ya que responden rápidamente a los cambios que pueden ocurrir en las masas de agua por procesos naturales o por las actividades humanas, que además de modificar la estructura de sus comunidades, repercute inevitablemente en el interés hidrológico, náutico y económico en estos ambientes en un tiempo relativamente corto, sobre todo por su papel de productores primarios (De la lanza et al., 2000).

Entre estos microorganismos se presentan aquellos que son altamente variables, con muchas variedades y formas. De acuerdo con lo anterior, con la finalidad de aclarar su sistemática, varios autores concluyen que corresponden a sinónimos de una especie nominal. Sin embargo, algunas investigaciones muestran que esta variación es indicativa de la existencia de diversas razas genéticamente distintas como resultado de fluctuaciones ambientales particulares. En este último caso, si esos taxa se examinan como cosmopolitas diferenciados, entonces cualquier cambio físico o químico en las masas de agua pueden reconocerse con efectos significativos (De la lanza et al., 2000).

Capítulo 3. El zooplancton como bioindicador de calidad de agua

El zooplancton está constituido por un grupo de animales acuáticos que, aunque son incapaces de contrarrestar las corrientes, tienen la capacidad de suspenderse en el agua debido a que cuentan con estructuras especializadas para la natación. Todos los organismos considerados dentro del zooplancton son heterótrofos (De la Lanza et al., 2000) y sus hábitos alimenticios son altamente diversos, presentan ciclos de vida muy cortos, tasas de reproducción altas y en general son muy pequeños, estas características los hacen idóneos como organismos bioindicadores y para estudios ecotoxicológicos (Conde-Porcuna et al., 2004). Dentro del zooplancton de agua dulce encontramos a una gran diversidad de animales; sin embargo en los sistemas continentales los tres grupos dominados por diversidad, abundancia y biomasa son los rotíferos, los cladóceros y los copépodos (Cervantes Martínez et al., 2012). A continuación, revisaremos cada uno de estos grupos con mayor detalle.

3.1 Rotífera

Los rotíferos (filo Rotífera) son animales diminutos que habitan en agua dulce, en océanos y en suelos húmedos. Su tamaño varía desde unos 50 μm hasta 2 mm y aunque son más pequeños que muchos protistas, son multicelulares y tienen sistemas de órganos especializados, un canal alimentario, un tubo digestivo con boca y ano separados (Figura 2). El movimiento del cuerpo de un rotífero distribuye el líquido por todo el cuerpo, haciendo circular los nutrientes y los desechos en estos pequeños animales. La palabra rotífero, derivada del latín "que posee ruedas" y hace referencia a la corona de cilios que atrae una corriente de agua dentro de la boca. En la parte posterior de la boca se encuentra el tracto digestivo llamado faringe que posee mandíbulas que trituran el alimento, en especial, microorganismos suspendidos en el agua (Campbell and Reece, 2007). Como se observa en la Figura 2, el tronco representa la mayor parte del cuerpo.

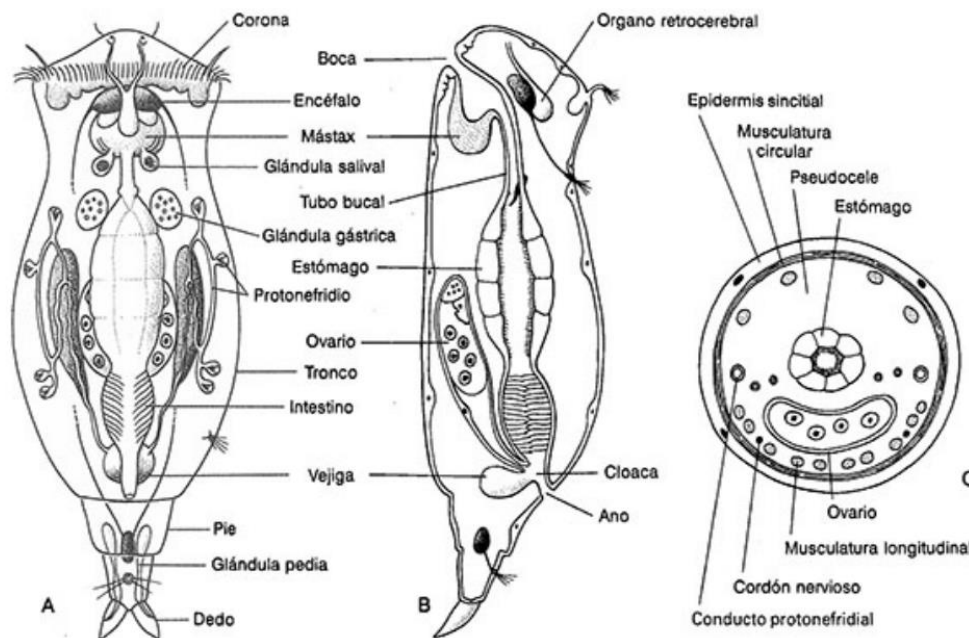


Figura 2 Anatomía de un rotífero: A, vista dorsal. B, vista lateral. C, sección transversal. Tomado de Ruppert and Barnes, 1996.

La porción terminal del cuerpo, o pie, es mucho más estrecha que la región del tronco, el extremo del pie suele tener de una a cuatro proyecciones llamadas

dedos. En algunos rotíferos el pie sirve como órgano de fijación, en estos grupos el pie contiene glándulas pedías, que desembocan al exterior en los extremos de los dedos o en otras partes del pie. Los rotíferos generalmente carecen de cutícula, sin embargo la epidermis está reforzada por una red intracelular densa de fibras proteínicas de tipo actina (Ruppert and Barnes, 1996).

Los rotíferos tienen formas de reproducción poco comunes. Algunas especies están constituidas sólo por hembras que producen más hembras a partir de huevos no fecundados; esta forma de reproducción se llama partenogénesis (Campbell and Reece, 2007). En México se han registrado alrededor de 300 especies dulceacuícolas de rotíferos, agrupadas en dos subclases, 26 familias y alrededor de 60 géneros (Cervantes Martínez et al., 2012). Los géneros con mayor cantidad de especies en nuestro país son *Lecane*, *Brachionus*, *Trichocerca*, *Lepadella* y *Cephalodella*.

Debido a que los rotíferos juegan un papel importante en la cadena trófica y a que son relativamente fáciles de cultivar en laboratorio (Thorp and Covich, 2010), los rotíferos han sido utilizados como buenos indicadores en estudios ecotoxicológicos de la calidad del agua en ambientes naturales (Alayo and Iannacone, 2002; Halbach, 1984; Janssen et al., 1994; Snell and Janssen, 1995).

3.2 Cladóceros

Los cladóceros son quizá el grupo más famoso en zooplancton, ya que son los conocidos comúnmente como "pulgas de agua". Estos organismos se alimentan de fitoplancton, y por lo general son la bisagra más importante entre la producción primaria (las algas) y los consumidores mayores (los peces) (Zambrano, 2007).

Los cladóceros han heredado de sus antepasados un cuerpo débil, segmentado, cubierto con un caparazón bivalvo de quitina con unos cuantos pares de apéndices, antenas, mandíbulas y cinco o seis pares de miembros torácicos, como se ilustra en la Figura 3.

Los cladóceros son en su mayoría de forma oval, pero muchos son esféricos (Smirnov, 2014). Con ayuda de los cladóceros se puede diagnosticar el estado del lugar donde habitan, existiendo grupos propios de aguas ricas en oxígeno, por ejemplo, *Daphnia magna*, *D. pulex*, *D. longispina*, *D. Strauss*, como también otros que predominan en ambientes eutróficos como lo son: *Moinarectirostris*, *M. macrocopa*, *M. brachiata* y *M. affinis* (Torreñera and G. J., 1989).

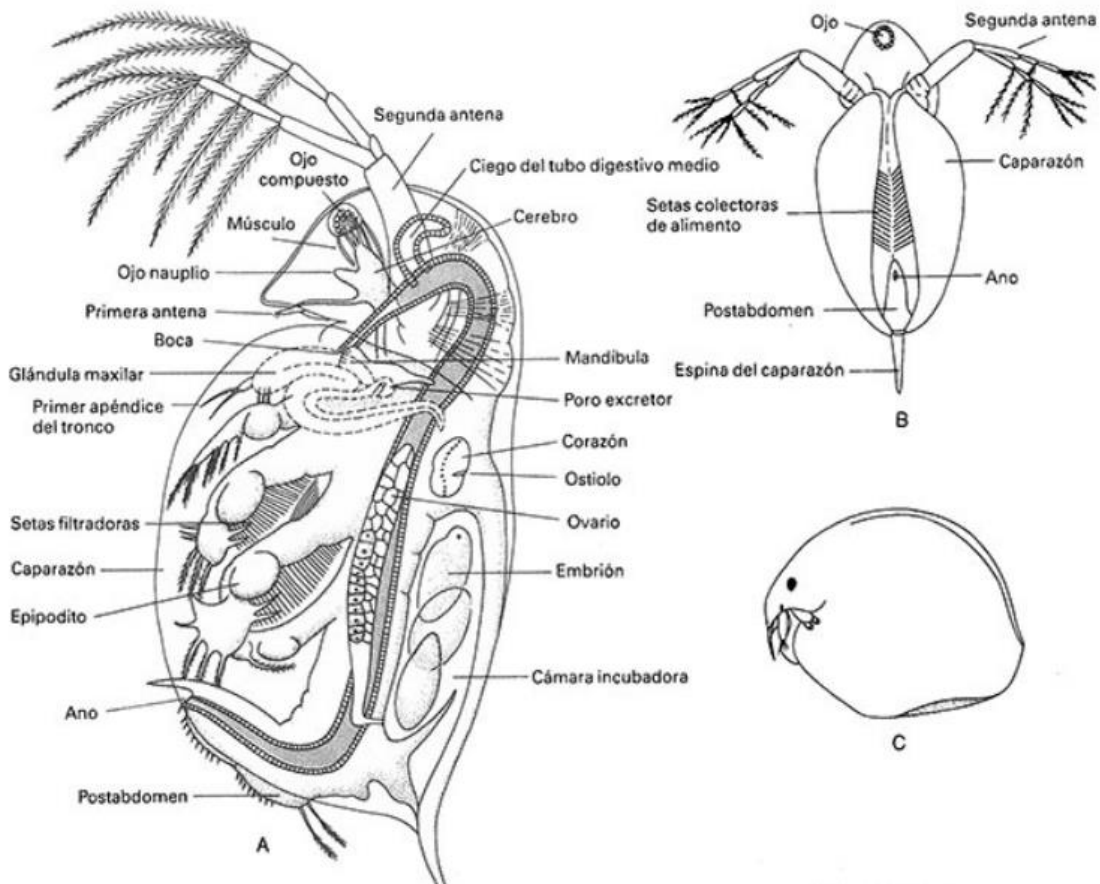


Figura 3 A, Hembra de un cladóceros, *Daphnia pulex*, vista lateral. B, vista central de *Daphnia*. C, *Chydorus gibbus*, un cladóceros más redondeado que *Daphnia pulex*. Tomado de Ruppert and Barnes, 1996.

En general son organismos que presentan una afinidad a ambientes oligotróficos y ricos en oxígeno. Entre los muchos usos prácticos que se da a este grupo de organismos, destacan su valor como indicadores biológicos (Briones Cornejo,

2012; Elías Gutiérrez et al., 2008) y en consecuencia su utilización en estudios de toxicidad (Emanuela Cristina Freitas, 2010; ISO 6341:1996; NMX-AA-087-SCFI, 2010).

Los cladóceros también se han utilizado para la reconstrucción de ambientes en el pasado reciente, pues sus caparazones fácilmente se conservan en los sedimentos de los lagos (Bredesen et al., 2002; Jeppesen et al., 2003, 2001; Kattel et al., 2006). Conociendo los requerimientos ambientales de las diversas especies se pueden establecer los cambios que ha sufrido un lago a lo largo del tiempo, pues cada especie quedará registrada en un estrato diferente (Elías Gutiérrez et al., 2008).

3.3 Copépoda

Los copépodos son crustáceos más complejos que los cladóceros, se pueden localizar tanto en aguas continentales como en aguas marinas, siendo mucho más abundantes y diversos en aguas marinas que los rotíferos y cladóceros (Conde-Porcuna et al., 2004).

Como observamos en la Figura 4, el cuerpo de los copépodos consiste de una estructura alargada, parcialmente segmentada y con un exoesqueleto quitinoso; asociados a los distintos segmentos cefálicos y torácicos se encuentran apéndices móviles que pueden tener una o dos ramas o presentar reducciones o modificaciones diversas. De manera característica, el abdomen carece de apéndices. Usualmente se presenta una articulación principal que divide el cuerpo, en una porción anterior y una posterior (Suárez-Morales et al., 1996). Tienen un tamaño aproximado de 0.5 a 2 mm, su forma de reproducción es sexual y predominan en ambientes eutróficos y sistemas salinos (Conde-Porcuna et al., 2004).

La distribución de los registros de copépodos de agua dulce en México no es homogénea, ya sea en el tiempo o geográficamente, de hecho, el primer

conocimiento de la fauna de copépodos en México de obtuvo en cuevas del estado de San Luis Potosí (Suárez-Morales and Reid, 1998).

En los sistemas acuáticos los copépodos pueden ser considerados como indicadores de las condiciones generales de la biota local. Por ejemplo, la desaparición de la comunidad de copépodos o la alteración de su estructura poblacional son fenómenos que han permitido reconocer diversas perturbaciones a los ecosistemas acuáticos que de otro modo pasarían desapercibidas (Elías Gutierrez et al., 2008).

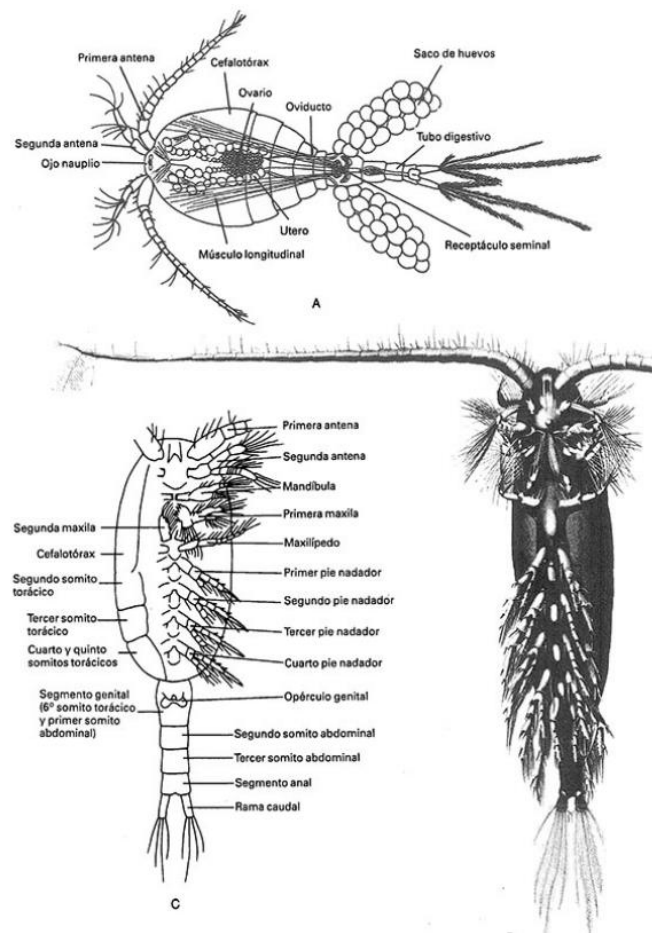


Figura 4 A, un copépodo ciclopoideo, *Macrocyclus albidus* (vista dorsal). B, un copépodo calanoideo típico, *Calanus* (vista central) mostrando los apéndices. C, *Pseudocalanus*, (vista ventral) mostrando apéndices. Tomado de Ruppert and Barnes, 1996.

Como sucede con otros grupos, los pocos organismos zooplanctónicos existentes en las aguas continentales presentan algún rasgo típico de adaptación, que se relaciona con sus características genéticas y demográficas. El período de la vida de los rotíferos y cladóceros es corto, de pocos días o semanas. En cambio, los copépodos viven más tiempo, de semanas y meses, y poseen mayor poder de locomoción, lo que se manifiesta en sus migraciones verticales al ritmo de la luz y la oscuridad. En los copépodos, las larvas son muy diferentes a los adultos (Figura 5), por lo que cambia considerablemente, tanto su morfología como su régimen alimenticio. Por lo regular, las formas jóvenes son micrófagas; en cambio, los adultos tienen hábitos depredadores. Así agua rica en fitoplancton favorece más el desarrollo de cladóceros y rotíferos que de copépodos (Roldán and Restrepo, 2008). Los copépodos, incluso, pueden desarrollar tolerancia a las altas concentraciones de sales disueltas en los ambientes extremos que habitan a través de la osmorregulación y osmoconformación, que son procesos de mantenimiento de la homeostasis del cuerpo respecto a las concentraciones de soluto y el contenido de agua, algunas especies como, *Acanthocyclops sp*, *Cyclops sp* y *Eucyclops sp*, sobreviven en salinidades de hasta 300-360 g/L (Anufriieva, 2015).

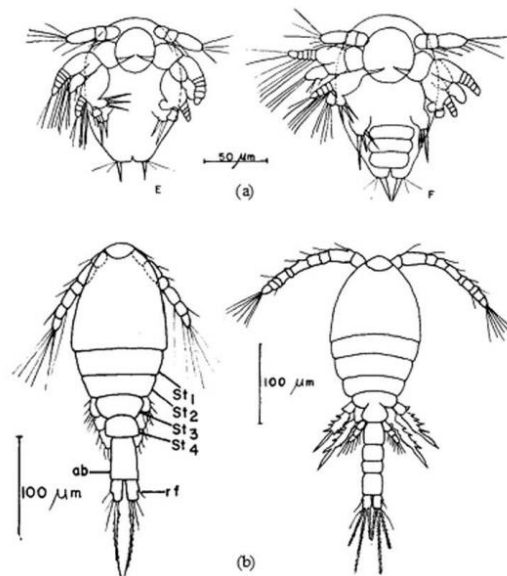


Figura 5 Estadios inmaduros del copépodo *Oithona hebes*: (a) nauplio y (b) copepodito. Tomado de Zoppi, 2012.

Como se mencionó anteriormente el zooplancton tiene gran importancia en la cadena trófica de los lagos, debido a que es el consumidor primario situado en los niveles más bajos de la red trófica, así como el alimento de los siguientes eslabones, por ejemplo, de peces y estos a su vez de otros animales. Debido a dichas características, la EPA (Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EE.UU), desarrolló una norma utilizando el cladóceros *Daphnia pulex*, esta especie tiene una gran sensibilidad a la presencia de contaminantes en el agua, es decir, su nivel de reproducción y tiempo de vida pueden verse afectados, así como el tamaño de los individuos (Chen et al., 1999a), el método 202.1 (EPA, 2002), pretende mostrar dichas afectaciones.

3.4 Importancia paleoecológica del zooplancton

Los medios húmedos (lagos, lagunas, ciénagas, etc.) se comportan como auténticos ecosistemas, existiendo en ellos una componente abiótica (características físicas y químicas) y una componente biótica (organismos productores, consumidores y descomponedores), que interrelacionan entre ellas interna y externamente, para definir diferentes tipos de nichos ecológicos que vienen fundamentalmente determinados por las características del agua. De manera genérica, éstos pueden subdividirse en dos tipos: medios oligotróficos (pobre en nutrientes) y eutróficos (ricos en nutrientes), existiendo alternativas intermedias de tipo mesotrófico (Pinilla, 1998).

Los estudios paleoecológicos permiten conocer la evolución temporal de los medios húmedos a través de los llamados microfósiles (algas, hongos, bacterias, zooplancton). Estos microfósiles (Figura 6) están contenidos en el sedimento acumulado en los lagos, ciénagas, etc. Por medio de sondeos puede extraerse ese sedimento, y su análisis microscópico detallado desde los niveles profundos más antiguos hasta los más actuales, superficiales, permite determinar los conjuntos de animales y vegetales microscópicos que se fueron sucediendo en ese medio a medida que se depositó el sedimento. Por otra parte, la aplicación de técnicas de datación alberga además la posibilidad de determinar el momento

cronológico preciso en el cual las condiciones ambientales de estos medios pudieron cambiar y los factores que produjeron este cambio (López-Saez et al., 2005).

Dentro del zooplancton se encuentran especies representados por registros fósiles por sus “tecamebas” o quistes ameboides, una de las más características, el *Amphitrema flavum*, el cual es indicador de sedimentos depositados en condiciones pobres de nutrientes y húmedas, de pH bajo y, en general, de niveles de agua altos (López-Saez et al., 2005).

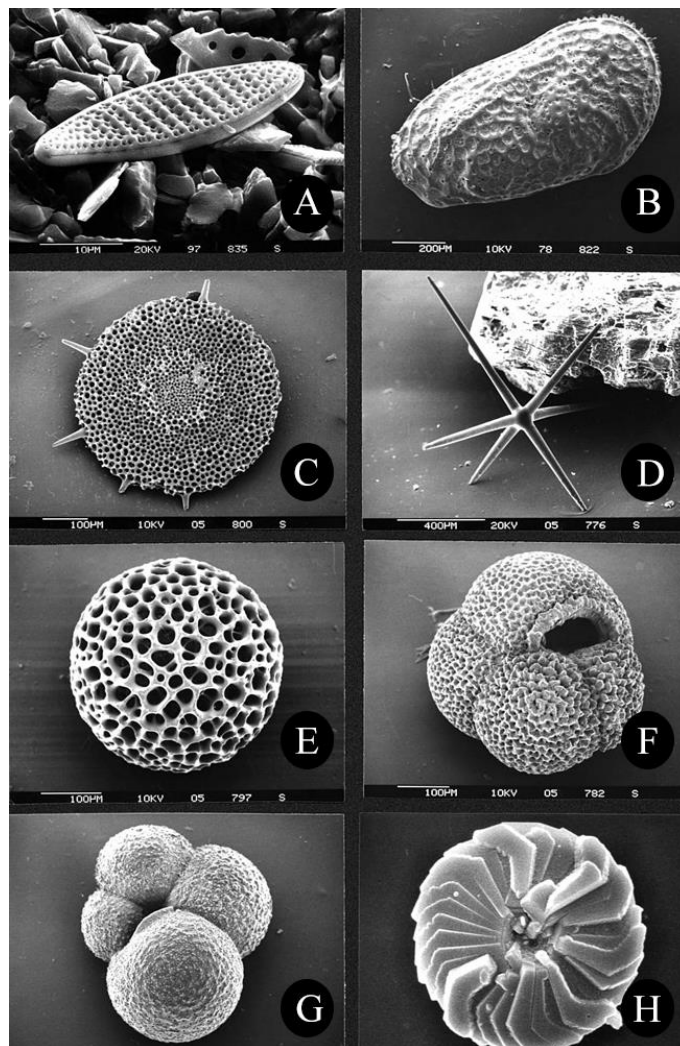


Figura 6 (A) Diatomea, (B) Ostrácodo, (C) Radiolario, (D) Esponja, (F, G) Foraminífera y (H) Cocolitóforo. Tomado de Microfossil Groups, 2016. Micropalaeontology.

Capítulo 4. Arsénico

El arsénico está presente en agua, principalmente subterránea, debido a procesos naturales y a muchas actividades antropogénicas como la minería y la metalurgia, donde el arsénico puede ser encontrado a concentraciones altamente peligrosas. Los trabajadores de estas industrias, así como la gente que vive cerca, está expuesta al arsénico y puede desarrollar enfermedades relacionadas con este elemento. Este es un serio problema en ciudades de América Latina donde la intensa actividad minera y contaminación natural han generado riesgos a la salud para estas poblaciones (Bundschuh et al., 2009).

4.1 Arsénico y toxicidad

Uno de los elementos tóxicos para la corteza terrestre es el arsénico, encontrándose en la atmósfera, el suelo, las rocas, las aguas naturales y los organismos (Sirshendu De and Abhijit Maiti, 2012). Es un metaloide que se moviliza por medio de una combinación de procesos naturales como lo son las reacciones de meteorización, la actividad biológica y las emisiones volcánicas, así como a través de una serie de actividades antropogénicas (Smedley and Kinniburgh, 2002). Dentro de éstas, las actividades minero-metalúrgicas están permitiendo que el arsénico se incorpore a sistemas donde no se había detectado su presencia, como lo es la cadena trófica (Lara Del Río, 2015).

El arsénico coexiste en diversas especies en los medios acuosos (Figura 7). En lo que se refiere a las formas inorgánicas, en ambientes superficiales y cercanos de la superficie predominan dos estados de oxidación de arsénico, el As(III) y el As(V), que se conocen comúnmente como la forma reducida As^{3+} y la forma oxidada As^{5+} , respectivamente. La carga eléctrica de las especies individuales depende en gran medida de la condición redox del sistema (Sirshendu De and Abhijit Maiti, 2012). A condiciones oxidantes, el arsénico existe como arseniato (AsO_4^{3-}) con valores de pK_a de 2.2, 6.9 y 11.5 para las especies H_3AsO_4^0 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} , AsO_4^{3-} . Por otro lado, como podemos ver en la Figura 7, en ambientes más reductores, el arsénico existe como arsenito (AsO_3^{3-}) con valores de pK_a de 9.2, 12.1 y 13.4 donde el ion sin carga H_3AsO_3^0 es el que prevalece a pH inferiores a 9.2 (Ravenscroft et al., 2009a).

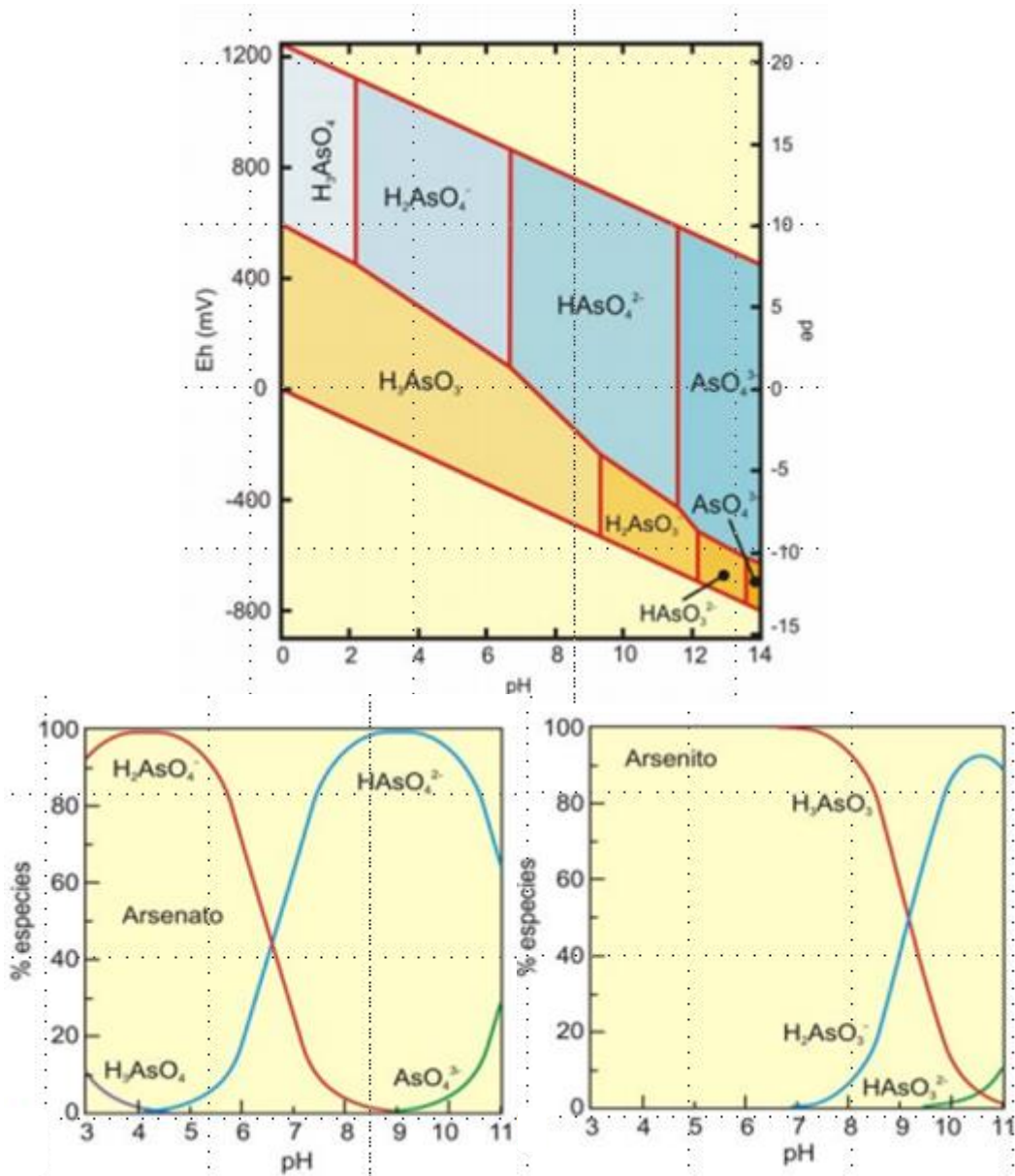


Figura 7 Diagrama Eh-pH para especies acuosas de arsénico a 25 °C y sus respectivos diagramas de especiación de As Tomado de (Brookins, 1988; Lillo, 2003; Smedley and Kinniburgh, 2002)

La toxicidad de los compuestos del arsénico varía considerablemente, los compuestos inorgánicos son generalmente más tóxicos que los compuestos orgánicos (OMS, 2015). Debido a dicha toxicidad, el arsénico representa una amenaza importante para la salud pública cuando se encuentra en aguas

contaminadas. Las principales rutas de exposición son: el agua destinada al consumo humano, los cultivos regados con agua contaminada y los alimentos preparados con agua contaminada (Organización Mundial de la Salud, 2016).

En muchas áreas donde el agua contiene niveles altos de arsénico, también lo tendrán los suelos, a pesar de que las cantidades varían mucho, la mayoría de las plantas absorben el arsénico a través de sus raíces y en las partes comestibles (Ravenscroft et al., 2009). Cuando agua subterránea rica en arsénico es usada para riego, el contenido de arsénico en el suelo gradualmente se acumula, y conduce a una mayor absorción de arsénico por las plantas. Entonces, los efectos del arsénico en alimentos y agua son tanto aditivos como acumulativos (Ravenscroft et al., 2009).

Los primeros síntomas de la exposición prolongada a altos niveles de arsénico inorgánico, se observan generalmente en la piel e incluyen cambios de pigmentación, lesiones cutáneas, dureza y callosidades en las palmas de las manos y las plantas de los pies (hiperqueratosis). Estos efectos se producen tras una exposición mínima de aproximadamente cinco años y pueden ser precursores de cáncer de piel (Organización Mundial de la Salud, 2016).

De todas las formas en las que se encuentra el arsénico en el ambiente, sólo una de ellas es considerada como no tóxica, y es la arsenobetaina. Como se observa en la Figura 8, la arsenobetaina contiene un átomo de arsénico con estado de oxidación +5, rodeado de tres grupos metilo y un grupo de ácido acético, la molécula tiene carga neutra (Caumette et al., 2012c).

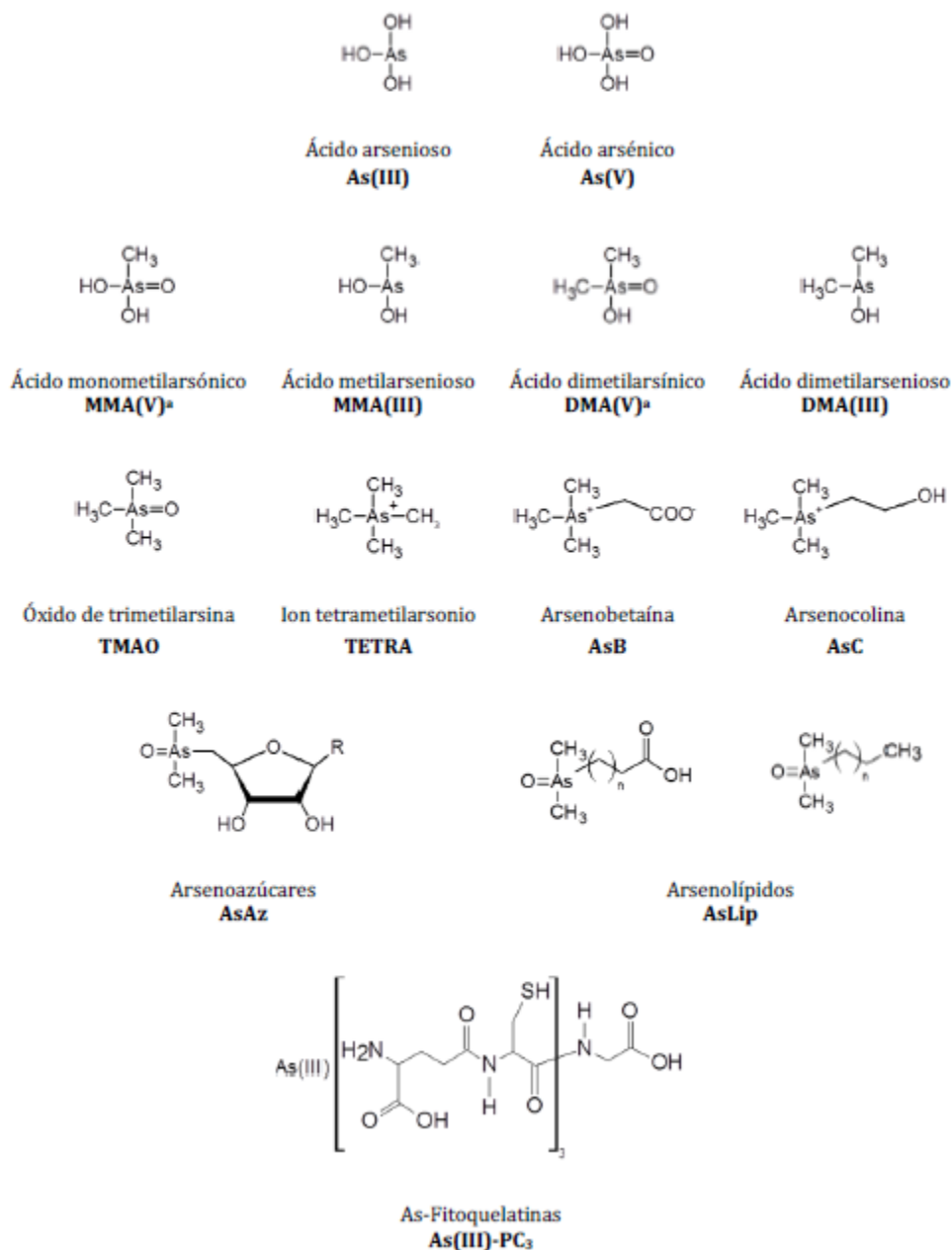


Figura 8 Especies de arsénico más comunes en muestras biológicas y medioambientales. Tomado de García, 2013.

La arsenobetaina presente en los animales marinos está ampliamente estudiada en comparación con el agua dulce. Una de las propuestas de la metilación del arsénico se presenta en la Figura 9. La mayoría de los estudios sugiere que la arsenobetaina del ambiente marino es formada por organismos de los niveles

bajos de la cadena trófica en la que el primer eslabón es el zooplancton y donde se encontró arsenobetaina en el organismo (Caumette et al., 2012c).

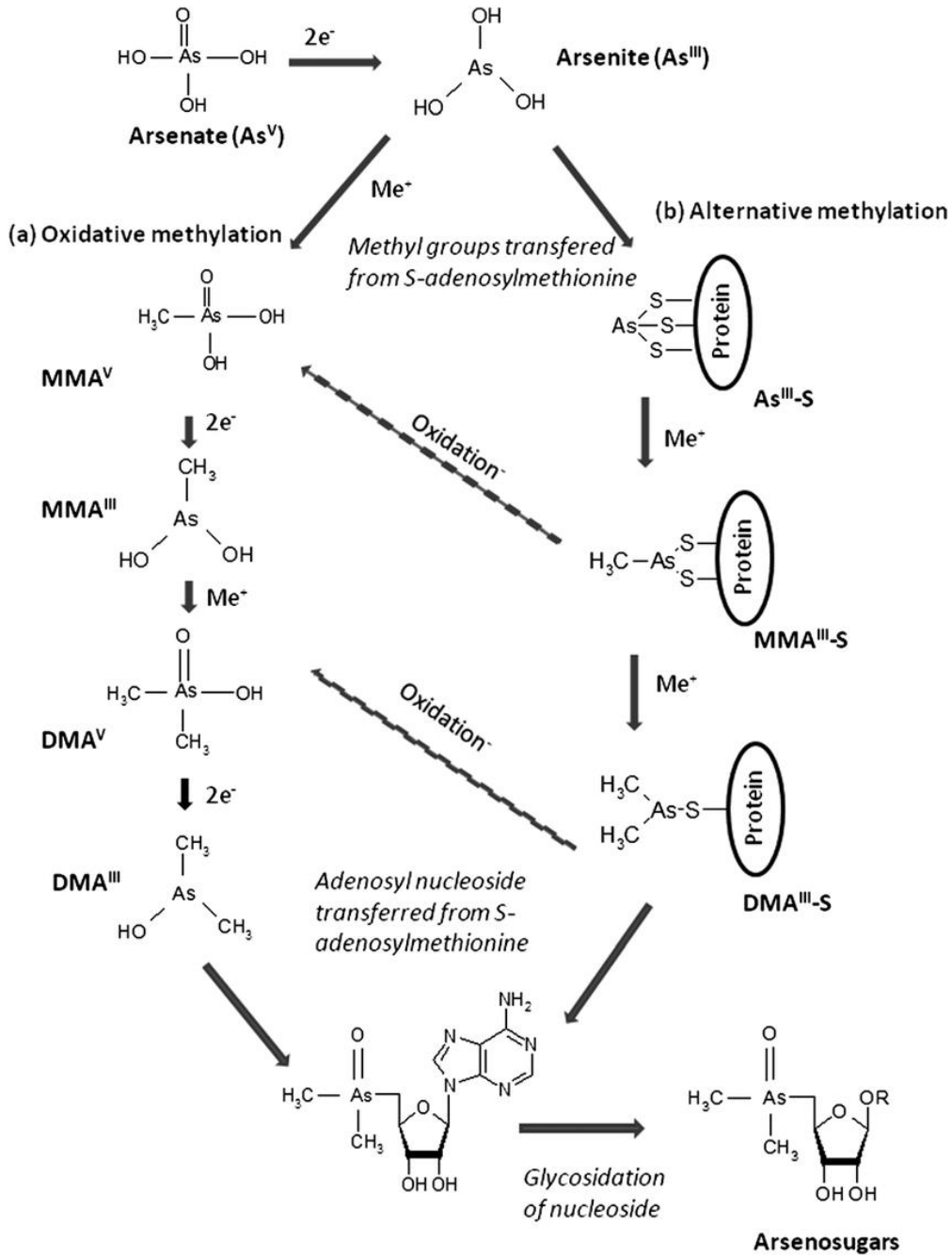


Figura 9 Metilación del arsénico tomada de Caumette et al., 2012c.

En individuos expuestos a As^{+5} , éste fue disminuido a As^{+3} y sintetizado a compuestos organoarsénicos y arsenoazúcares. Una comparación interesante entre ambientes marino y de agua dulce, es que mientras que en el zooplancton marino la arsenobetaina es el mayor componente, está ausente o es mínima en organismos de agua dulce. Caumette y colaboradores, estudiaron dos especies de *Daphnia* y *Cyclops*, principalmente herbívoros de agua dulce y en donde los arsenoazúcares fueron su componente principal, sin encontrar arsenobetaina.

Por otro lado, en pruebas de laboratorio donde fue cultivada *D. pulex*, (Chen et al., 1999) en condiciones de contaminación por arsénico, en concentraciones de hasta 1000 $\mu\text{g/L}$ de arsenito y arseniato, se ha reportado que la supervivencia es similar para estadios juveniles y adultos. Pero que la mortalidad ocurrió en un período de 3 días, tanto para neonatos como adultos en presencia de 3000 $\mu\text{g/L}$ de arsenito y arseniato. Adicionalmente, se reportó que la supervivencia de los adultos en 3000 $\mu\text{g/L}$ de contaminación con arsenito fue significativamente menor que al colocar la dosis equivalente de arseniato, indicando que, a estos niveles agudos, el arsenito es más tóxico que el arseniato (Devlin, 1999). De hecho, los adultos expuestos al arseniato fueron capaces de reproducirse antes de morir (Chen et al., 1999a). El mayor efecto del arsénico en la reproducción de individuos juveniles expuestos podría deberse a una baja reproducción, resultado de una reducción en el tamaño corporal (Chen et al., 1999).

4.2 Normatividad respecto al arsénico

El arsénico representa una amenaza importante para la salud pública cuando se encuentra en aguas contaminadas. El arsénico inorgánico está naturalmente presente en altos niveles en las aguas subterráneas de diversos países, entre ellos Argentina, Bangladesh, Chile, China, la India, Estados Unidos de América Y México (OMS, 2016). El arsénico es una de las 10 sustancias químicas que la Organización Mundial de la Salud considera más preocupantes para la salud pública. Los esfuerzos de la Organización por reducir la exposición al arsénico incluyen el establecimiento de valores guía, el examen de los datos científicos

disponibles y la formulación de recomendaciones para la gestión de los riesgos. A continuación, se detallan los límites máximos permitidos de arsénico en agua presentes en la normativa mundial y nacional para usos específicos:

- a) Organización Mundial de la Salud (OMS): La OMS, tiene un valor de referencia provisional para sustancias químicas de origen natural, cuya presencia en el agua de consumo puede afectar a la salud y es de 0.01 mg/L. En donde se incluye la anotación de que hay evidencia de la peligrosidad de la sustancia, sin embargo se reconoce la necesidad de conocer más acerca de la toxicidad sobre los efectos del arsénico sobre la salud (OMS, 2008).
- b) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT): En lo que corresponde a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, se contemplan los límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Para el caso del arsénico, los valores propuestos se observan en la Tabla 1, se considera que las concentraciones por encima de dichos límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, la flora o la fauna (SEMARNAT, 1996).

Tabla 1 Valores para los límites máximos permisibles de arsénico en la descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Tomada de (SEMARNAT, 1996).

Límites máximos permisibles para arsénico (mg/L)									
Ríos		Embalses naturales y artificiales			Aguas costeras			Suelo	
Uso en riego agrícola	Uso público urbano	Protección de vida acuática	Uso de riego agrícola	Uso público urbano	Explotación pesquera, navegación y otros usos	Recreación	Estuario	Uso en riego agrícola	Humedales naturales
P.M./P.D.	P.M./P.D.	P.M./P.D.	P.M./P.D.	P.M./P.D.	P.M./P.D.	P.M./P.D.	P.M./P.D.	P.M./P.D.	P.M./P.D.
0.2/0.4	0.1/0.2	0.1/0.2	0.2/0.4	0.1/0.2	0.1/0.2	0.2/0.4	0.1/0.2	0.2/0.4	0.1/0.2

P.M.= Promedio mensual.

P.D.= Promedio diario.

- c) Secretaría de Salud (SSA): En la Norma Oficial Mexicana modificada NOM-127-SSA1-1994, se establecen los límites máximos permisibles de

calidad del agua para uso y consumo humano, así como los tratamientos de potabilización que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional. El límite de concentración de arsénico establecido es de 0.025 mg/L (SSA, 2000).

- d) Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología: Formula los criterios ecológicos que son útiles para precisar los niveles de los parámetros y de las sustancias que se encuentran en el agua, o sus efectos y así se pueda evaluar a los cuerpos de agua como aptos para ser utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas, para riego agrícola, para uso pecuario, para uso en la acuicultura, o bien, para el desarrollo y la conservación de la vida acuática. En la Tabla 2, se muestran los niveles que constituyen la calidad mínima requerida para el uso o aprovechamiento del agua en los casos mencionados (DOF, 1989).

Tabla 2 Límites máximos permisibles de arsénico en la descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Tomada de CE-CCA-001/89, (DOF, 1989).

Límites máximos permisibles para arsénico (mg/L)					
Fuente abastecimiento de agua potable	Riego agrícola	Pecuario	Protección a la vida acuática agua dulce/agua marina		Acuicultura (Especie Carpa)
0.05 (As ⁺³)	0.1	0.2	0.2 (As ⁺³)	0.01 (As ⁺⁵)	1

Como se observa en la Tabla 1 y 2, hay un límite máximo permisible de arsénico para la protección de la vida acuática y es en este sentido que toman importancia los organismos vivos dentro de los ambientes acuáticos contaminados, como será el caso de esta investigación. Los microorganismos muestran una amplia gama de sensibilidades a las especies del arsénico (Gómez-Caminero et al., 2001), modificando la reproducción, el crecimiento y calidad de los huevos, por ejemplo en rotíferos (Aranguiz-Acuna and Serra, 2016).

Capítulo 5. Incorporación del arsénico en la cadena trófica

Los elementos químicos presentes en la corteza terrestre están sujetos a ciclos biogeoquímicos naturales en los cuales son transportados entre la litósfera, la hidrósfera y la atmósfera. En los ecosistemas acuáticos, diversos elementos están naturalmente presentes, no sólo en el agua y los sedimentos sino en los organismos vivos de los cuerpos de agua (Revenga, 2012).

5.1 Bioconcentración

En los organismos es frecuente encontrar niveles de elementos, superiores a los registrados en el ambiente, fenómeno conocido como *bioconcentración* (Serrano Gallego, 2003). Los organismos planctónicos pueden secuestrar los contaminantes biodisponibles en la columna de agua.

Para determinar empíricamente la capacidad de las sustancias para acumularse en los organismos se han propuesto los conceptos de potencial de bioconcentración (PBC) y factor de bioconcentración (FBC) (Geyer et al., 1986). Este último se define como el cociente entre la concentración del producto en el organismo, o en el tejido concreto, después de un largo periodo de exposición, que presumiblemente condujo a un estado de equilibrio o estacionario entre absorción y excreción, dividido por la concentración del producto en el medio (agua, alimento, dieta total, tierra, aire, etc.).

Así:

$$FBC = \frac{\text{Concentración en órgano } \left[\frac{mg}{kg}\right]}{\text{Concentración en medio } \left[\frac{mg}{kg}\right]}$$

Cuando el FBC es de orden de uno, o menos, se evidencia que la sustancia en cuestión no experimenta bioconcentración; los de FBC inferior a 10 se consideran de bajo FBC, los de 10-100 son de carácter intermedio, y los de FBC superior a 100 se califican de alto potencial de bioconcentración, se ha visto experimentalmente que los FBC son muy diferentes para las distintas especies; así en los humanos son de 5-50 veces más altos que en las ratas (Repetto, 1995).

El conocimiento de los factores de bioconcentración puede ser útil en la evaluación del riesgo de exposición a contaminantes ambientales y estimar las consecuencias de esta exposición a largo plazo sobre la salud, así como para establecer los niveles legales permisibles de la presencia de las sustancias en el agua para sus distintos usos (Repetto, 1995).

5.2 Bioacumulación

A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no se degradan ni biológicamente ni químicamente en la naturaleza, a lo sumo pueden reaccionar con otras sustancias presentes en el medio, en algunos casos formando compuestos más tóxicos que los originales. Esta persistencia en el ambiente, y en especial en los cuerpos de agua superficiales, da origen a uno de sus efectos más graves: la *bioacumulación* (Gagneten, 2008), que se trata de la acumulación de un contaminante en un organismo o una comunidad biológica debida a la captación directa desde el agua y/o por ingestión. El término se emplea para describir tanto los procesos dinámicos de la acumulación como el resultado final de la misma en el organismo. La cuantificación de la bioacumulación se realiza a través del factor de bioacumulación (FBA). En condiciones estacionarias el FBA, define la concentración de un contaminante por unidad de biomateria del organismo en cuestión. Cuando un organismo está en presencia de un contaminante, la concentración del contaminante en el organismo va creciendo con el tiempo hasta alcanzar el estado estacionario; obviamente, el FBA (t) seguirá la misma funcionalidad y, aunque a veces se encuentran datos de esas evoluciones temporales, las magnitudes usualmente empleadas y medidas son las estacionarias, las de equilibrio (Figueruelo and Marino, 2004).

5.3 Biomagnificación

Cualquier sustancia que se consuma y no intervenga en la respiración, ni sea fácilmente excretada, se considera un contaminante y tiende a concentrarse en los tejidos de los organismos en niveles tróficos sucesivos. Este fenómeno de concentración de contaminantes en la cadena alimentaria, es conocido como *biomagnificación* (Escolástico et al., 2013).

Los contaminantes se asemejan, químicamente, a nutrientes inorgánicos esenciales por lo que son incorporados y almacenados por error. En la pirámide de biomasa se ha visto que relativamente poca energía pasa de un nivel trófico al

siguiente. Esto significa que un consumidor, de cualquier nivel, tiene que consumir mucha biomasa del nivel trófico inferior. Si esa biomasa contiene el contaminante, este será consumido en grandes cantidades por el consumidor. Este es el primer paso de la biomagnificación y el contaminante se encuentra a una concentración mayor dentro del productor que en el ambiente. La segunda etapa de la biomagnificación sucede cuando es comido el productor. Con mucha frecuencia, esto va en detrimento de los organismos en los cuales se concentran estos materiales ya que casi siempre las sustancias contaminantes son tóxicas. En general los contaminantes que dan lugar a la biomagnificación son solubles en grasas. Estos materiales son adquiridos a través de los productores y se mueven a la grasa de los consumidores.

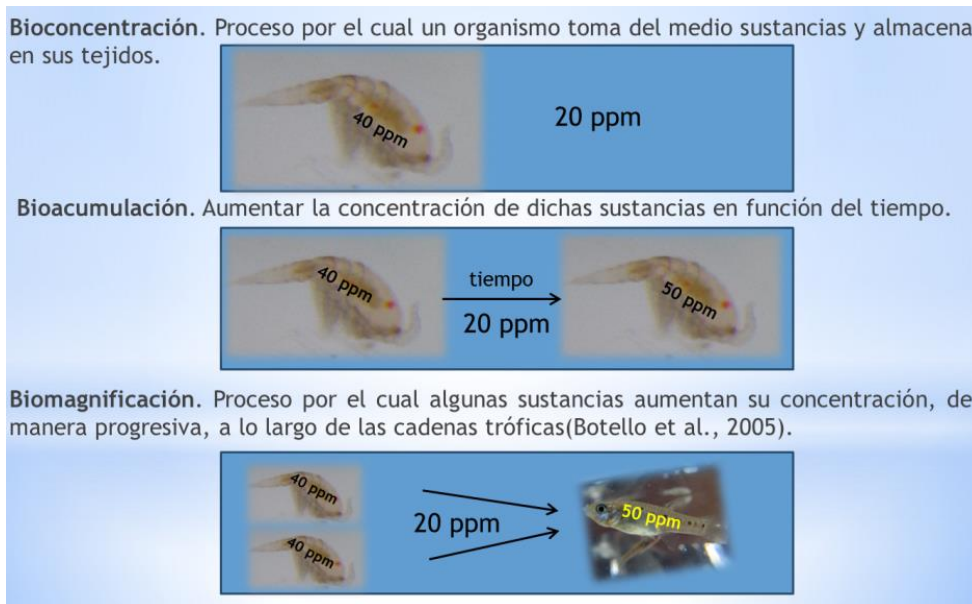


Figura 10 Representación gráfica de los conceptos de bioconcentración, bioacumulación y biomagnificación.

Capítulo 6. Materiales y métodos

Para cumplir con los objetivos del estudio, se llevaron a cabo dos campañas de muestreo, la primera de estas, en el mes de abril del año 2015, y la segunda en el mes de mayo del año 2016.

6.1 Ubicación y características de las muestras.

Se recolectaron muestras de agua, zooplancton y otros organismos en cinco sitios: 1 (Club de Tiro), 2 (Abrevadero), 3 (Laguna), 4 (Presa) y 5 (Canal), a través de dos campañas de muestreo (M1 y M2). Mientras los primeros tres sitios corresponden a un complejo artificial de agua contaminado con arsénico (Martínez-Villegas et al., 2013; Razo et al., 2004), los otros dos corresponden a agua libre de contaminación de arsénico, todos ellos ubicados en la ciudad de Matehuala. Matehuala es parte de la zona del Altiplano, formada por un conjunto de cuencas cerradas, corrientes de temporal y mantos subterráneos, prácticamente tiene como único recurso la explotación de mantos acuíferos subterráneos, que suelen ser aprovechados para riego. El agua es altamente salina, predomina el clima desértico, su temperatura media anual es de 19.3 °C, y su precipitación pluvial de 450 mm anuales. Tiene suelos carbonatados, con yeso en el horizonte profundo y suelos cementados con carbonato a poca profundidad (H. Ayuntamiento de Matehuala, 2016). La ubicación geográfica de los puntos de muestreo se encuentra en la Tabla 3 y en la Figura 11.

Tabla 3 Ubicación de los puntos de muestreo, para las dos campañas de muestreo.

Muestreo	Sitio	Lugar	Longitud	Latitud
1	1	Club de Tiro	332801	2617505
2			332784	2617530
1	2	Abrevadero	336280	2619081
2			336282	2619091
1	3	Laguna	338509	2618853
2			338518	2618852
1	4	Presa	334544	2621030
2			334551	2621028
1	5	Canal	333454	2619951
2			333454	2619944

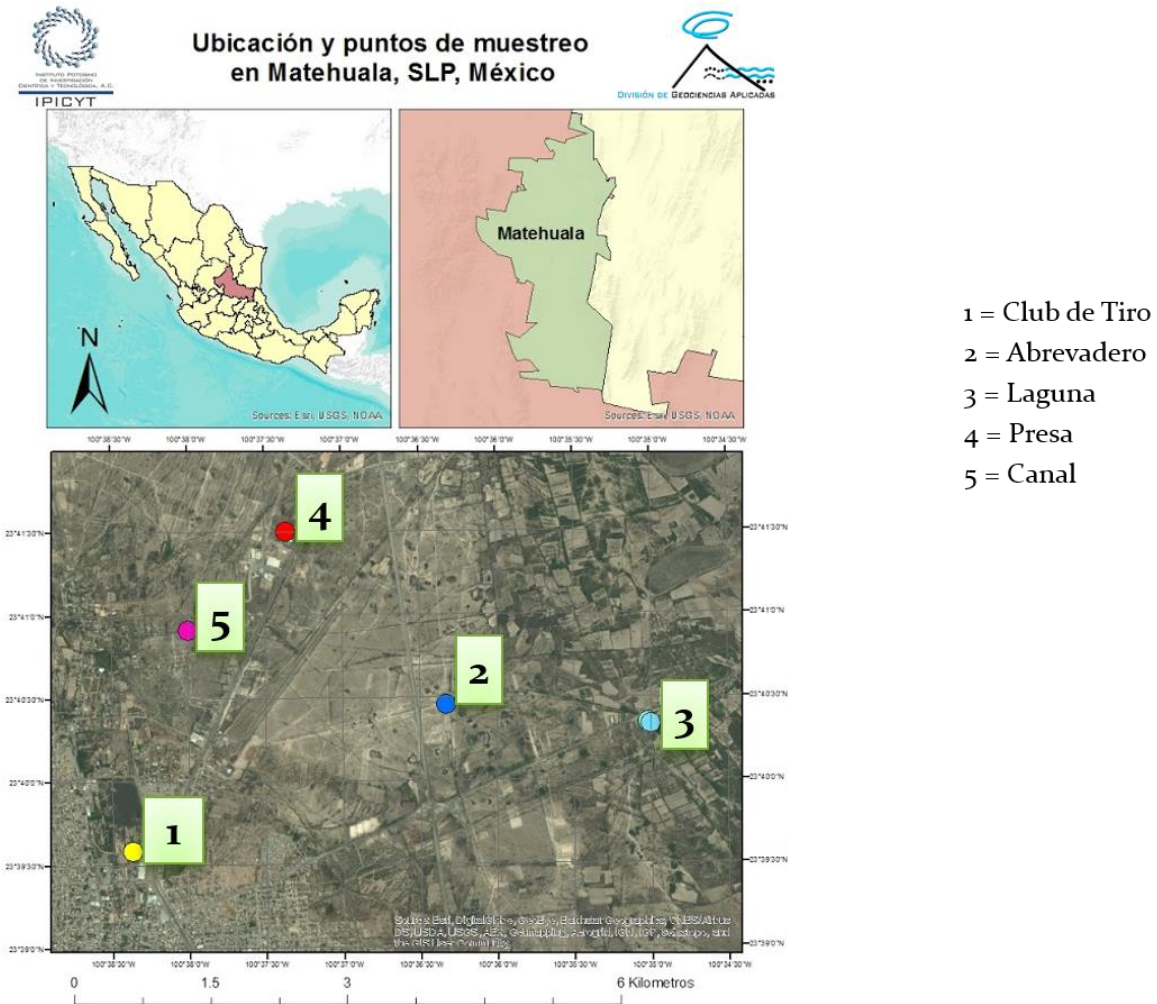


Figura 11 Mapa de la zona de estudio y sitios elegidos para realizar las campañas de muestreo.

Las muestras de agua fueron filtradas con papel Whatman #40 (125mm), almacenadas en recipientes de polipropileno (Tabla 4), acidificadas a $\text{pH} < 2$ con ácido nítrico, cerradas y conservadas a 4°C hasta ser analizadas.

Tabla 4 Características de los recipientes contenedores de muestras de agua.

Capacidad (ml)	Material	Pre-tratamiento
250	Polipropileno	Lavado ácido (Citranox, HCl)

Las muestras de zooplancton se recolectaron a través de un muestreo superficial colectando agua en un recipiente de volumen conocido (20 L), el agua se pasó por una red de zooplancton con abertura de malla de 4.5 μm . Los organismos filtrados fueron recolectados en un vaso colector y de ahí se pasaron a un frasco de plástico de 125 ml (con tapa hermética) en el que se fijaron con alcohol concentrado para su posterior identificación de especies y conteo de abundancia. Adicionalmente, se recolectaron organismos en agua desionizada para realizar observaciones microscópicas y análisis de cuantificación de arsénico en los organismos. Tanto los organismos fijados en alcohol como los conservados en agua fueron conservados a una temperatura de 4 °C hasta su análisis. Debido a que al momento de la colecta del zooplancton también se encontraron animales superiores se decidió colectarlos. Dichos organismos fueron peces, capturados por medio de una trampa maya, insectos y caracoles, que fueron colectados de la superficie de los cuerpos de agua.

En cada sitio de muestreo se determinaron los siguientes parámetros utilizando un multiparámetros marca YSE modelo HI 9829. Los parámetros medido con este equipo en campo fueron: oxígeno disuelto (NMX-AA-012-SCFI-2001, 2001), temperatura (NMX-AA-072-SCFI-2001, 2001), conductividad eléctrica (NMX-AA-093-SCFI-2000, 2000), pH (NMX-AA-008-SCFI-2000, 2000) y salinidad. También fue determinada la alcalinidad con un Kit de Titulación Automática de la marca HACH modelo AL-DT (cita para alcalinidad).

Para asegurar la calidad de nuestros análisis, en cada campaña de muestreo se recolectaron, además de las muestras de agua y zooplancton, 1 blanco de laboratorio, 1 blanco de campo y 1 duplicado.

6.3 Determinación de la concentración de zooplancton.

Para determinar la riqueza e identidad de cada individuo hasta su mínimo taxón posible, se utilizó literatura especializada (Rico-Martínez, 1992, Suárez-Morales y Gutiérrez-Aguirre, 2001, Elías-Gutiérrez et al., 2008, Cervantes-Martínez et al., 2012; Jersabek y Leitner, 2014) en Microscopios Estereoscópicos marca Nikon, modelo SMZ 800N. En algunos casos, fue necesaria la realización de micro-disecciones.

6.2 Determinación de arsénico en agua y zooplancton.

Para la determinación de arsénico en muestras de agua se utilizó un plasma de acoplamiento inductivo (ICP) como fuente de ionización que junto a un espectrofotómetro de emisión óptico (OES) constituye el equipo de ICP-OES, marca Varian modelo 730 ES, en el Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental, del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C. utilizando el método 207 Rev. 4.4 “Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry” (EPA, 1994). Esta técnica se basa en la introducción continua de la muestra líquida y un sistema de nebulización formando un aerosol que es transportado por el Argón a la antorcha de plasma, acoplado inductivamente por radio frecuencia. En el plasma, debido las altas temperaturas generadas, los analitos son atomizados e ionizados generándose los espectros de emisión atómicos de líneas características. Los espectros son dispersados por la red de difracción y el detector sensible a la luz se encarga de medir las intensidades de las líneas cuya información es procesada por el sistema informático. Para estos análisis, la curva de calibración estuvo en el rango de 0.05-20 mg/L, con un límite de detección de 0.05 mg/L.

Para la determinación de arsénico en muestras de zooplancton, peces e insectos primeramente se digirieron las muestras de acuerdo metodologías tomadas de

(Caumette et al., 2014; Rubio-Franchini et al., 2016). En particular, el procedimiento consistió en pesar 0.1 g de material biológico seco y se agregarle 10 ml de HNO₃ y llevar a calentamiento (140 °C) hasta sequedad. Colocar 2 ml de H₂O₂ y calentar a la misma temperatura hasta sequedad. Una vez digerido el material biológico se recuperó el sobrante y se diluyó en 10 ml de una solución de HNO₃ al 2%. Posteriormente, esta solución se filtró con papel Whatman #40 (125mm) y acidificó con HNO₃ (10%) para ser analizada por ICP-EOS.

6.5 Preparación de muestras biológicas para análisis MEB y TEM

En el laboratorio, por medio de microscopía óptica, se separó el zooplancton de otro material biológico, y éste a su vez en grupos y de ser posible en especies. Una vez separados por grupos y/o especie, se llevó a cabo un tren de secado, que se explica a continuación.

6.5.1 Procedimiento del Tren de Secado

La Figura 12 muestra la técnica del tren de secado, la cual consiste en colocar el material biológico en soluciones diluidas de alcohol durante un tiempo determinado. Se inició colocando el zooplancton, previamente separado por grupo y/o especie, en la solución más diluida de alcohol (10%), y así hasta llegar a la solución de alcohol concentrado (100%), incrementando cada 10% la concentración de éste. El zooplancton permanecía en cada solución durante una hora. Teniendo un tiempo de procesamiento completo en diez horas.



Figura 12 Proceso de tren de secado.

Estas muestras se llevaron a punto crítico y se observaron por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), usando un microscopio FEI Quanta 200 SEM acoplado a un sistema de energía dispersiva EDAX.

Capítulo 7. Resultados y discusión

Los resultados de las mediciones en el campo y en laboratorio para agua, zooplancton y otros organismos se presentan a continuación.

7.1 Parámetros de agua y concentraciones de arsénico

En la Tabla 5 se muestran los datos de temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, alcalinidad, salinidad y arsénico, tanto para la campaña de muestreo 1 como para la campaña de muestreo 2. Las temperaturas encontradas varían entre valores de 16.9 °C y 23.7 °C, estos valores están dentro de los parámetros para la capa superficial de aguas naturales que se encuentran entre los 15.5 °C y 27 °C (Ongley, 1997). Los valores de pH se encuentran entre 6.7 y 8.5. Generalmente, en ecosistemas de agua dulce encontramos agua con valores de pH entre 6 y 9 (Quiroz and Rodríguez, 2006). En este estudio, los valores de pH encontrados en este estudio son el resultado de un sistema calcáreo (Razo et al., 2004) (Tabla 5). Para el caso de la conductividad eléctrica los valores van de los 2364 $\mu\text{s}/\text{cm}$ hasta los 3282 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Tabla 5) resultado de procesos de disolución-precipitación de calcita y yeso (Rodríguez, 2016). Para oxígeno disuelto tenemos valores que varían de 0.6 mg/L a los 3.7 mg/L (Tabla 5). Mientras que los valores comúnmente reportados son de 7 y 8 mg/L para lagos (Baird, 2001), cinco de nuestras muestras se encuentran por debajo del rango, si el nivel de oxígeno disuelto es bajo, indica contaminación con materia orgánica, putrefacción y mala calidad (Adler, 2014). Se encontraron alcalinidades entre 11.2 mgCaCO₃/L y 296 mgCaCO₃/L (Tabla 5). Estos valores de alcalinidad disminuyen consistentemente con los valores de pH e indican la concentración de bicarbonato que hay en el agua (Henry and Heinke, 1999). En cuando a la salinidad, la Tabla 5 muestra que, los valores de ésta se sitúan entre los 0.7 y 1.7 ‰, por lo cual los sitios se consideran ambientes oligohalinos, debido a que se encuentre entre los 0.5 ‰ y los 5 ‰, considerados ambientes de salinidad reducida, estos valores son altos para ser considerada agua dulce, que tiene valores reportados mayormente como menores al 0.5 ‰ (Roldán Pérez, 2003). La Tabla 5 muestra, además, las concentraciones de arsénico encontradas en las muestras de agua. En el sitio 1 (Club de Tiro), las concentraciones de arsénico fueron de 38.98 y 53.23 mg/L, para M1 y M2, respectivamente. Para el caso del sitio 2 (Abrevadero), se encontraron concentraciones de arsénico de 1.61 mg/L en M1 y 5.91 mg/L en M2.

En el sitio 3 (Laguna), las concentraciones de arsénico fueron de 1.91 y 5.33 mg/L, para M1 y M2, respectivamente. En el sitio 4 (Presa), la concentración para M1 fue de <0.01 mg/L, mientras que para M2 fue de 0.2 mg/L. Y, finalmente para el sitio 5 (Canal), la concentración de arsénico para M1 fue de <0.01 mg/L, y para M2 la concentración de arsénico fue de 0.1 mg/L. Las concentraciones obtenidas en este estudio muestran la tendencia ya conocida para el sitio de contaminación por arsénico (Martínez-Villegas et al., 2013). Además, en la Tabla 5, podemos observar los promedios y la desviación estándar de los datos para la campaña de muestreo 1 y la campaña de muestreo 2.

Tabla 5 Temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), alcalinidad, salinidad y concentraciones de arsénico en muestras de agua para los muestreos 1 (M1) y 2 (M2).

Sitio	Lugar	Muestreo	T (°C)	pH	CE (µs/cm)	OD (mg/L)	Alcalinidad (mg _{CaCO3} /L)	Salinidad (‰)	Arsénico (mg/L)
1	Club de Tiro	1	22.5	6.7	2762	1.3	219	1.4	38.98
		2	21.5	6.7	3209	0.6	296	1.7	53.23
		σ	22	6.7	2985.5	0.9	257.5	1.5	46.5
		σ	0.7	0	316.0	0.49	54.4	0.2	9.4
2	Abrevadero	1	21.1	7	2364	3.4	121	0.7	1.62
		2	20.5	7.5	2376	0.71	193	1.3	5.91
		σ	20.8	7.2	2370	2.0	157	1	3.7
		σ	0.4	0.3	8.485	1.9	50.9	0.4	3.0
3	Laguna	1	20.9	7.5	2423	3.6	90	1.2	1.91
		2	20.4	8.3	2591	0.9	11.2	1.3	5.3
		σ	20.6	7.9	2507	2.3	50.6	1.2	3.6
		σ	0.3	0.6	118.8	1.8	55.7	0.07	2.4
4	Presa	1	23.7	7.3	2892	2.6	103	1.6	<0.01
		2	18.7	7.7	3282	0.9	142	1.7	0.2
		σ	21.2	7.5	3087	1.7	122.5	1.6	0.1
		σ	3.5	0.3	275.7	1.2	27.6	0.1	0.1
5	Canal	1	18.8	7.4	2528	3.7	127	1.2	<0.01
		2	16.9	7.8	2888	1.3	169.5	1.5	0.1
		σ	17.8	7.6	2708	2.5	148.2	1.3	0.05
		σ	1.3	0.3	254.5	1.7	30.1	0.2	0.06

La Figura 13, muestra las concentraciones de arsénico para los 5 sitios y las dos campañas de muestreo, así como el límite máximo permisible de arsénico en aguas naturales (0.2 mg/L) para mantener el equilibrio ecológico (DOF, 1989) y la concentración letal de arsénico para algunos organismos zooplancton (Chen et al., 1999b). Como se observa en la Figura 13, las concentraciones de arsénico en este estudio están en el rango de <0.01 mg/L a 53.23 mg/L, encontrando las concentraciones más altas en el sitio 1 (Club de Tiro) y disminuyendo, en general, hacia el sitio 5 (Canal). Más importante aún, 6 de las 10 muestras obtenidas, correspondientes a las muestras de los sitios 1 (Club de Tiro), 2 (Abrevadero) y 3 (Laguna), para las dos campañas de muestreo, se encuentran por encima del límite máximo permisible de arsénico en agua (0.2 mg/L), para distintos usos como lo son el riego, la recreación y protección a la vida acuática (DOF, 1989; SEMARNAT, 1996); la muestra 2 del sitio 4 (Presa), se encuentra en el límite y 3 muestras se encuentran por debajo de él, la muestra 1 del sitio 4 (Presa) y las 2 muestras del sitio 5 (Canal). Las muestras que se encuentran por encima del límite corresponden a los sitios 1, 2 y 3 (Figura 12), las cuales tienen concentraciones que varían entre los 1.62 mg/L hasta los 53.23 mg/L. Además, algunas de estas muestras, también se encuentran por encima de la concentración letal de arsénico reportada para zooplancton (3mg/L) (Chen et al., 1999a). Los sitios 4 y 5, son los que presentaron concentraciones de arsénico por debajo de las concentraciones letales (3mg/L) (Chen et al., 1999b) y/o el límite máximo permisible de arsénico para la protección de la vida acuática (0.2 mg/L) (DOF, 1989; SEMARNAT, 1996).

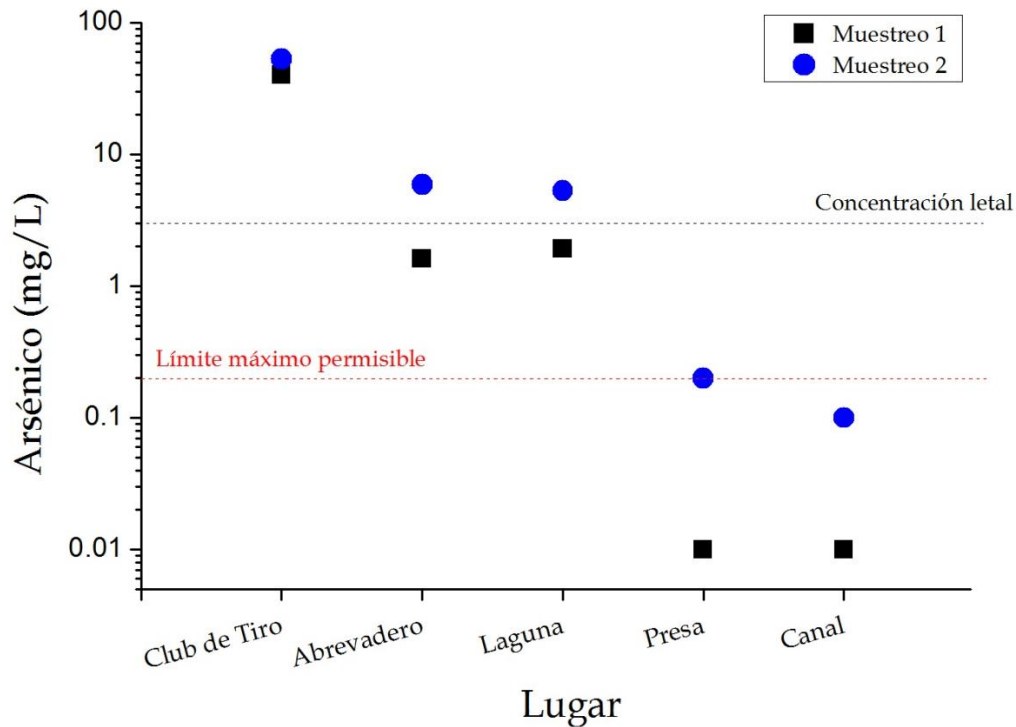


Figura 13 Concentraciones de arsénico en muestras de agua mostrando que éstas sobrepasan el límite máximo permisible de arsénico en cuerpos de agua naturales para mantener el equilibrio ecológico (DOF, 1989) y las concentraciones letales de arsénico para zooplancton según Chen et al., 1999a.

Las concentraciones de arsénico medidas en este estudio son consistentes con las reportadas por Martínez-Villegas et al., 2013 y muestran la misma tendencia.

7.2 Abundancia de zooplancton

La Figura 14, muestra la abundancia, en individuos por litro (individuos/L), por sitio de muestreo y grupo de zooplancton para cada campaña de muestreo. En la Figura 14a, se observa que, para la campaña de muestreo 1, la abundancia se encuentra entre 0.1 individuos/L y 6.04 individuos/L, siendo el sitio 4 (Presa), el lugar con más abundancia (11.54 individuos/L) con un total de 6.04 individuos/L del grupo Cladóceras y 5.5 individuos /L del grupo Copépoda. La abundancia de zooplancton incrementa del sitio 1 (Club de Tiro) hacia el sitio 4 (Presa) y disminuye en el sitio 5 (Canal). En el caso de la campaña de muestreo 2 (Figura 14b), las abundancias tienen valores que van de los 0.19 individuos/L a los 92.82

individuos/L, ocupando nuevamente el sitio 4 (Presa) el primer lugar en abundancia con 100.7 individuos/L, con un total de 92.82 individuos/L del grupo Rotífera y 7.88 individuos/L del grupo Cladóceras; seguido en esta ocasión por el sitio 1 (Club de Tiro), con 60.75 individuos/L, distribuidos entre el grupo Rotífera y Copépoda, con 35.58 individuos/L y 25.17 individuos/L, respectivamente. En esta campaña de muestreo no se observó la tendencia de incremento de abundancia de zooplancton que se observó en la campaña 1. Por otro lado, es interesante mencionar que el grupo copépoda se encuentra en todos los sitios de muestreo, para la campaña 1 mientras el grupo rotífera se encuentra ausente (Figura 14a). En contraste, el grupo rotífera se encuentra presente en todos los sitios de muestreo, en la campaña 2, mientras que el grupo copépoda sólo se encontró presente en tres sitios (Figura 14b). Dicho contraste es más evidente en la Figuras 13c y d que nos muestran que la concentración de Rotífera es nula en la campaña 1 (Figura 14c) mientras que fue la más abundante en la campaña de muestreo 2 (Figura 14d), en la que además se encontraron individuos de los grupos Cladóceras y Copépoda.

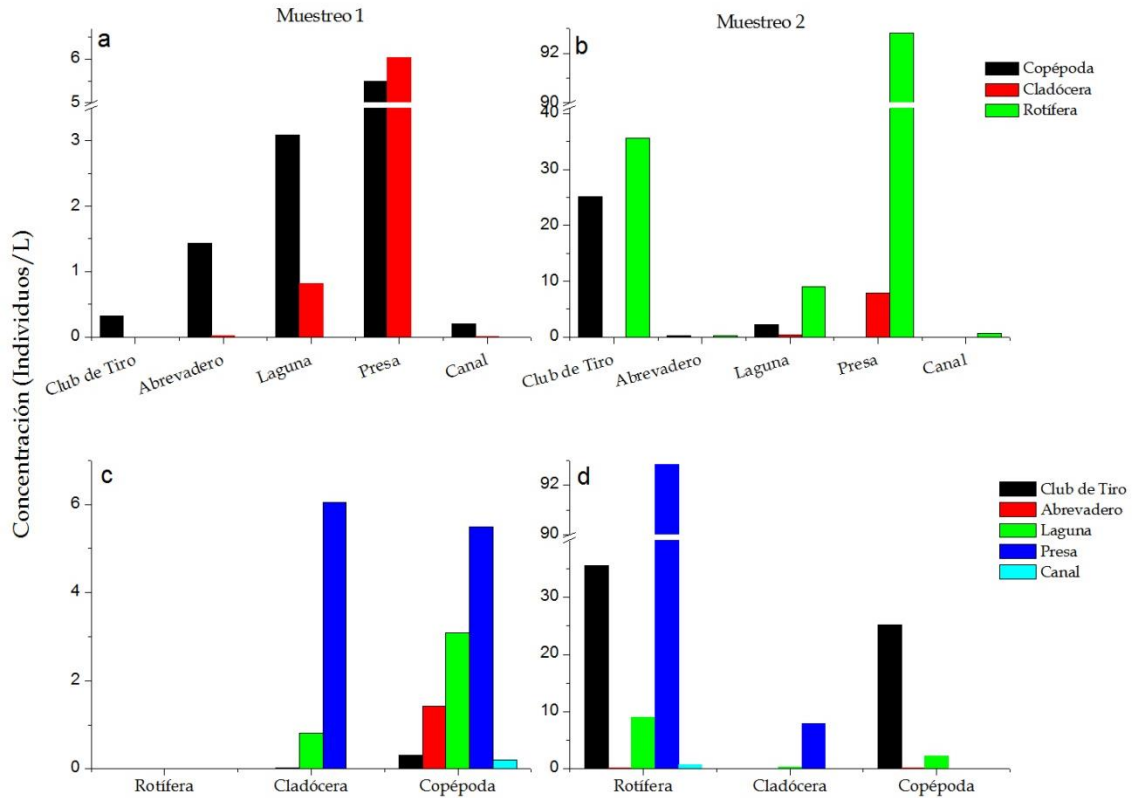


Figura 14 a) Concentración de zooplancton por punto de muestreo y grupo para la campaña de muestreo 1. b) Concentración de zooplancton por punto de muestreo y grupo para la campaña de muestreo 2. c) Concentración de zooplancton por grupo y sitio de muestreo para campaña de muestreo 1. d) Concentración de zooplancton por grupo y sitio de muestreo para la campaña de muestreo 2.

7.3 Especies de zooplancton

Las Tablas 6 y 7, muestran las especies de zooplancton identificadas en cada sitio, por grupo. Para la campaña de muestreo 1, se encontraron un total de nueve especies, distribuidas de la siguiente forma. En el sitio 1 (Club de Tiro), se identificó la especie del grupo Copépoda, *Paracyclops chiltoni*, con una abundancia de 0.32 individuos/L. En el sitio 2 (Abrevadero), se encontraron tres especies; dos especies del grupo Copépoda, *Paracyclops chiltoni* y *Eucyclops chihuahuensis*, y una del grupo Cladóceras, *Pleuroxus quasidenticulatus*, con abundancias de 1.20, 0.23 y 0.017 individuos/L, respectivamente. En el sitio 3 (Laguna), se encontraron cuatro especies; las primeras dos, *Macrocyclus albidus*

y *Eucyclops chihuahuensis* del grupo Copépoda y *Chydoridae* y *Latonopsis australis* del grupo Cladóceras, con abundancias de 3.00, 0.09, 0.07 y 0.75, respectivamente. En el sitio 4 (Presa), se encontraron cuatro especies de zooplancton, una especie del grupo Copépoda *Eucyclops sp.*, y tres especies del grupo Cladóceras, *Alona cf. Setulosa*, *Chydoridae* y *Simocephalus punctatus* con abundancias de 5.50, 2.70, 2.10 y 1.24 individuos/L, respectivamente. Por último, en el sitio 5 (Canal), se identificaron dos especies, una del grupo Copépoda, *Macrocyclus albidus*, y una del grupo Cladóceras, *Chydoridae*, con abundancias de 0.20 y 0.01 individuos/L.

Tabla 6 Sitio, lugar, grupo especie y abundancia de zooplancton identificadas en muestras recolectadas en la campaña de muestreo 1.

Zooplancton				
Sitio	Lugar	Grupo	Especies	Abundancia (Individuos/L)
Campaña de muestreo 1				
1	Club de Tiro	Rotífera	No encontrada	-
		Copépoda	<i>Paracyclops chiltoni</i> .	0.32
		Cladóceras	No encontrada	-
2	Abrevadero	Rotífera	No encontrada	-
		Copépoda	<i>Paracyclops chiltoni</i> <i>Eucyclops chihuahuensis</i>	1.20 0.23
		Cladóceras	<i>Pleuroxus quasidenticulatus</i>	0.02
3	Laguna	Rotífera	No encontrada	-
		Copépoda	<i>Macrocyclus albidus</i> <i>Eucyclops chihuahuensis</i>	3.00 0.09
		Cladóceras	<i>Chydoridae</i> <i>Latonopsis australis</i>	0.07 0.75
4	Presa	Rotífera	No encontrada	-
		Copépoda	<i>Eucyclops sp.</i>	5.50
		Cladóceras	<i>Alona cf. Setulosa</i>	2.70
			<i>Chydoridae</i> <i>Simocephalus punctatus</i>	2.10 1.24
5	Canal	Rotífera	No encontrada	-
		Copépoda	<i>Macrocyclus albidus</i>	0.20
		Cladóceras	<i>Chydoridae</i>	0.01

Para la campaña de muestreo 2, se encontraron un total de siete especies, distribuidas de la siguiente forma. La Tabla 7, muestra que en el sitio 1 (Club de Tiro), se identificó la especie del grupo Copépoda, *Paracyclops chiltoni*, con

abundancia de 25.17 individuos/L, además, para el grupo Rotífera, se encontró una abundancia de 35.58 individuos/L. En el sitio 2 (Abrevadero), se identificó una especie del grupo Copépoda, *Eucyclops chihuahuensis*, con abundancia de 0.25 individuos/L, asimismo, se encontró al grupo Rotífera con abundancia de 0.19 individuos/L. Para el caso del sitio 3 (Laguna), se encontraron cuatro especies; las primeras tres, *Macrocyclus albidus*, *Eucyclops chihuahuensis* y *Acanthocyclops sp* del grupo Copépoda con abundancia de 0.06, 0.35 y 1.73 individuos/L, respectivamente. Así como la especie, *Latonopsis australis* del grupo Cladóceras con abundancia de 0.35 individuos/L, y el grupo Rotífera con abundancia de 5.88 individuos/L. En el sitio 4 (Presa), se encontraron dos especies de zooplancton del grupo Cladóceras, *Alona cf. Setulosa* y *Simocephalus punctatus*, con abundancias de 1.82 y 6.06 individuos/L, respectivamente, así como para el grupo Rotífera se tiene abundancia de 92.82 individuos/L. Por último, en el sitio 5 (Canal), se encontró la presencia del grupo Rotífera con abundancia de 0.74 individuos/L.

Tabla 7 Sitio, lugar, grupo especie y abundancia de zooplancton identificadas en muestras recolectadas en la campaña de muestreo 2.

Sitio	Lugar	Grupo	Especies	Abundancia (Individuos/L)
Campaña de muestreo 2				
1	Club de Tiro	Rotífera	No identificada	35.58
		Copépoda	<i>Paracyclops chiltoni</i>	25.17
		Cladóceras	No encontrada	-
2	Abrevadero	Rotífera	No identificada	0.19
		Copépoda	<i>Eucyclops chihuahuensis</i>	0.25
		Cladóceras	No encontrada	-
3	Laguna	Rotífera	No identificada	5.88
		Copépoda	<i>Macrocyclus albidus</i>	0.06
			<i>Eucyclops chihuahuensis</i>	0.35
			<i>Acanthocyclops sp.</i>	1.73
Cladóceras	<i>Latonopsis australis.</i>	0.35		
4	Presa	Rotífera	No identificada	92.82
		Copépoda	No encontrada	-
		Cladóceras	<i>Alona cf. Setulosa</i>	1.82
			<i>Simocephalus punctatus</i>	6.06
5	Canal	Rotífera	No identificada	0.74
		Copépoda	No encontrada	-
		Cladóceras	No encontrada	-

Cabe mencionar que durante la campaña de muestreo 1 el promedio de precipitación mensual, para Abril del 2015, fue de 0.6866 mm y justamente un día anterior se mostró el evento de mayor precipitación con 6.6 mm. Mientras que, el promedio de precipitación mensual en la campaña de muestreo 2, para Marzo del 2016, fue de 0.9290 mm, habiendo el evento de mayor precipitación del mes, la semana anterior al muestreo, con un valor de 16.4 mm (INIFAP, 2016), lo cual hace sentido con la presencia del grupo Rotífera, individuos encontrados solamente en la campaña de muestreo 2, ya que a mayor precipitación se logra una mayor abundancia de nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos. Al comparar dichos valores con las abundancias generales de zooplancton en los muestreos, 17.433 y 171 individuos/L, para M1 y M2, respectivamente, se puede explicar la alta abundancia en la campaña de muestreo 2, con la teoría de que al haber una mayor precipitación en la temporada, el arrastre del material terrígeno y su subsecuente aporte a las aguas naturales (Cervantes-Martínez, 2005), propician un ambiente idóneo para la subsistencia del zooplancton.

De las especies encontradas en este estudio, cuatro de ellas, *Macrocyclops albidus*, *Eucyclops chihuahuensis*, *Paracyclops chiltoni* y *Eucyclops sp*, del grupo Copépoda, ha sido reportada en el estado de San Luis Potosí, para la zona centro y zona media del estado (Suárez-Morales, 2011).

La Figura 15 muestra algunos ejemplares de distintos estadios del grupo copépoda, encontrados en diferentes sitios en este estudio.

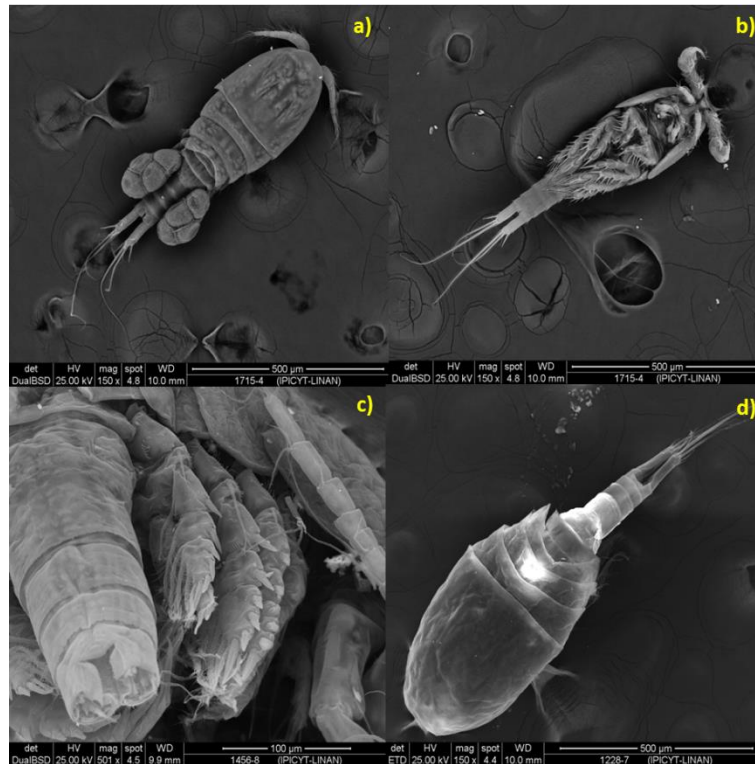


Figura 15 Ejemplares de zooplancton del grupo copépoda mostrando a) una hembra de la especie *Paracyclops chiltoni* encontrados en el sitio 1 (Club de Tiro), b) un macho de la especie *Paracyclops chiltoni* encontrados en el sitio 1 (Club de Tiro), c) un nauplio de copépodo encontrado en el sitio 2 (Abrevadero) y d) un copepodito encontrado en el sitio 3 (Laguna).

7.4 Arsénico y zooplancton

En la Figura 16, se muestra la abundancia de las especies de zooplancton con respecto a la concentración de arsénico en agua. Se observa que, para la campaña de muestreo 1, la abundancia disminuye conforme aumenta la concentración de arsénico en agua para los sitios 1 (Club de Tiro), 2 (Abrevadero), 3 (Laguna) y 4 (Presa). Dichos sitios corresponden a cuerpos de agua superficial, que propician las condiciones necesarias para encontrar zooplancton, como lo son: formación de columnas de agua de baja corriente y/o sistemas de agua prácticamente estancada (Cervantes-Martínez, 2005). En contraste, el sitio 5 (Canal) correspondiente a un ojo de agua somera en donde el agua subterránea brota a la superficie y es canalizada para su aprovechamiento. La corriente de agua que se observa en este sitio podría ser la causante de la baja abundancia de

zooplancton que se observa en comparación con el resto de los puntos de muestreo y que es por esta razón que este sitio no se alinea a la tendencia antes mencionada. Lo anterior, debido a sus condiciones, que no son propiamente las de un cuerpo de agua superficial sino las de una surgencia de agua corriente, mismas que desfavorecen la sobrevivencia del zooplancton, ya que como se mencionó anteriormente, el zooplancton debe flotar libre en el agua y es incapaz de contrarrestar corrientes (Roldán and Restrepo, 2008). Como puede observarse en la Figura 16, para la campaña de muestreo 2, las concentraciones de arsénico en agua fueron más altas con respecto a la campaña de muestreo 1 y, en general, también se observó una mayor abundancia de zooplancton para todos los sitios de muestreo, excepto el sitio 2 (Abrevadero). En dicho sitio, para el muestreo 2, sólo se encontró una especie de zooplancton del grupo Copépoda con una abundancia de 0.44 individuos/L (Tabla 6). No obstante, cabe mencionar que también se encontraron individuos en estadios juveniles. Dichos individuos no se incluyeron en la abundancia reportada en la Tablas 5 y 6 debido a que su identificación por especie no es posible de realizar por su propio estadio juvenil (Witty, 2004). No obstante, tomando en cuenta dichos individuos, y asumiendo que estos pudiesen ser estadios de la especie *Eucyclops chihuahuensis*, la abundancia incrementaría a 1.14 individuos/L. No obstante, seguiría siendo menor que para el muestreo 1. Cabe mencionar que en los sitios de muestreo 1, 3, 4 y 5 (Club de Tiro, Laguna, Presa y Canal), también se encontraron individuos de zooplancton en estadios juveniles, los cuales, al no ser identificada su especie, no fueron considerados dentro de la clasificación que estamos definiendo, refiriéndonos sólo a individuos adultos.

Una mayor abundancia de zooplancton y concentración de arsénico en las aguas en que habitan estos microorganismos en la campaña de muestreo 2, podría ser explicada por los eventos de alta precipitación (16.4 mm) registrados una semana antes de la fecha del muestreo 2 (INIFAP, 2016). Para el caso del zooplancton, como se ha descrito anteriormente, al haber una mayor precipitación en la temporada, el arrastre de nutrientes a las aguas y una mayor cantidad de agua favorecen su desarrollo y supervivencia (Alcocer and Bernal-Brooks, 2010).

Similarmenete, una mayor cantidad de lluvia puede favorecer una mayor disolución de las fases del suelo que contienen al arsénico (Martínez-Villegas et al., 2013).

La Figura 16 muestra que los sitios 4 (Presa) y 5 (Canal), tienen concentraciones que se encuentran en y/o dentro del límite máximo permisible de arsénico en agua para usos como, descargas a aguas naturales, recreación y protección a la vida acuática (DOF, 1989; SEMARNAT, 1996), el cual es de 0.2 mg/L. Mientras que el sitio 1 (Club de Tiro) presentó concentraciones por encima de la concentración letal para zooplancton (Chen et al., 1999b), de 3mg/L, así como los sitios 2 (Abrevadero) y 3 (Laguna) de la campaña de muestreo 2.

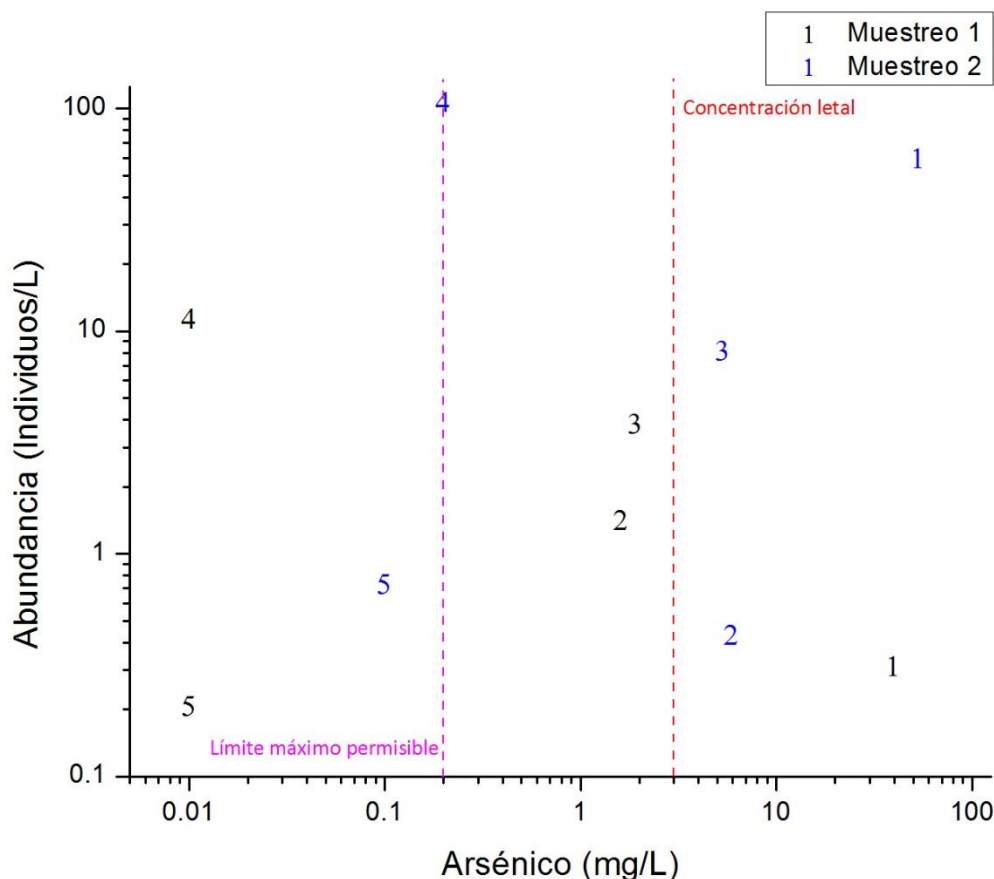


Figura 16 Abundancia de zooplancton en función de las concentraciones de arsénico, donde los números del 1 al 5 indican los sitios de muestreo: 1 (Club de Tiro), 2 (Abrevadero), 3 (Laguna), 4 (Presa) y 5 (Canal).

Con base en los resultados aquí mostrados, la hipótesis de este estudio es rechazada, ya que en el agua de Matehuala, contaminada con altos niveles de

arsénico, niveles que sobrepasan los límites máximos permisibles propuestos por la normativa mexicana (DOF, 1989; SEMARNAT, 1996), así como la concentración letal reportada para zooplancton (Chen et al., 1999a), sí habita zooplancton.

Los resultados de este estudio son los primeros en reportar la existencia de zooplancton a concentraciones ultra altas de arsénico de hasta 53.23 mg/L en cuerpos superficiales de agua, 18 veces mayores a las concentraciones letales y a otros estudios reportados (Caumette et al., 2012a; Chen et al., 1999b; Juncos et al., 2015). Adicionalmente, estos resultados son los primeros en evidenciar las especies de zooplancton capaces de sobrevivir en aguas altamente contaminadas en México, así como especies de zooplancton habitando en territorio mexicano. Un caso de estudio presentado en el norte de América, donde la abundancia de la especie del cladóceros *Daphnia magna*, así como su fácil crecimiento a nivel laboratorio (Goulden et al., 1982), ha permitido que dicha especie sea utilizada en estudios para el impacto generado por arsénico en agua dulce (Guilhem Caumette et al., 2012). En México, la misma especie de zooplancton se utiliza para la evaluación de toxicidad aguda a través de la (NMX-AA-087-SCFI, 2010) desarrollada a partir de un esquema de la EPA (EPA, 2002). No obstante, dicho cladóceros es exótico en nuestro país, ya que hasta el momento no se ha registrado en ambientes naturales (Elías Gutiérrez et al., 2008). En este sentido, en este estudio evidenciamos diversas especies de zooplancton que podrían probarse como indicadores ambientales a nivel regional y posible escalamiento a nivel nacional. Adicionalmente, evidenciamos una especie de zooplancton, *Paracyclops chiltoni*, que habita en agua altamente contaminada. Hasta nuestro conocimiento, sólo en Canadá, (Caumette et al., 2014, 2012a, 2012c, 2011), se ha reportado una especie de *Daphnia* habitando en aguas contaminadas con arsénico con valores de concentraciones de 0.040 mg/L.

La Figura 17 muestra la abundancia por especie de zooplancton, en individuos por litro (individuos/L), para cada sitio de muestreo. En general, se encontraron dos grupos de zooplancton, Copépoda y Cladócera. Se encontraron especies del

grupo Copépoda en los cinco sitios de muestreo, mientras que el grupo Cladóceras solo se encontró en casi todos los sitios, excepto el sitio 1 (Club de Tiro), si recordamos, es el sitio en donde se encontró la concentración de arsénico más alta siendo de 53.23 mg/L.

Para el sitio 1 (Club de Tiro) encontramos solamente una especie del grupo Copépoda, *Paracyclops chiltoni*. En el sitio 2 se encontraron dos especies del grupo Copépoda, *Eucyclops chihuahensis* y *Paracyclops chiltoni*, así como una especie del grupo Cladóceras, *Pleuroxus quasidenticulatus*. En el sitio 3 (Laguna) se encontraron dos especies del grupo Copépoda, *Macrocyclus albidus* y *Eucyclops chihuahensis*, y dos especies del grupo Cladóceras, *Latonapsis australis* y *Chydoridae*. El sitio 4 (Presa), fue el sitio que presentó mayor abundancia, con una especie del grupo Copépoda *Eucyclops sp* y tres especies del grupo Cladóceras, *Alona cf. Setulosa*, *Simocephalus punctatus* y *Chydoridae*. Mientras que el sitio 5 (Canal), es el sitio con menor abundancia para este muestreo con una especie del grupo Copépoda y una especie del grupo Cladóceras, *Macrocyclus albidus* y *Chydoridae*, respectivamente.

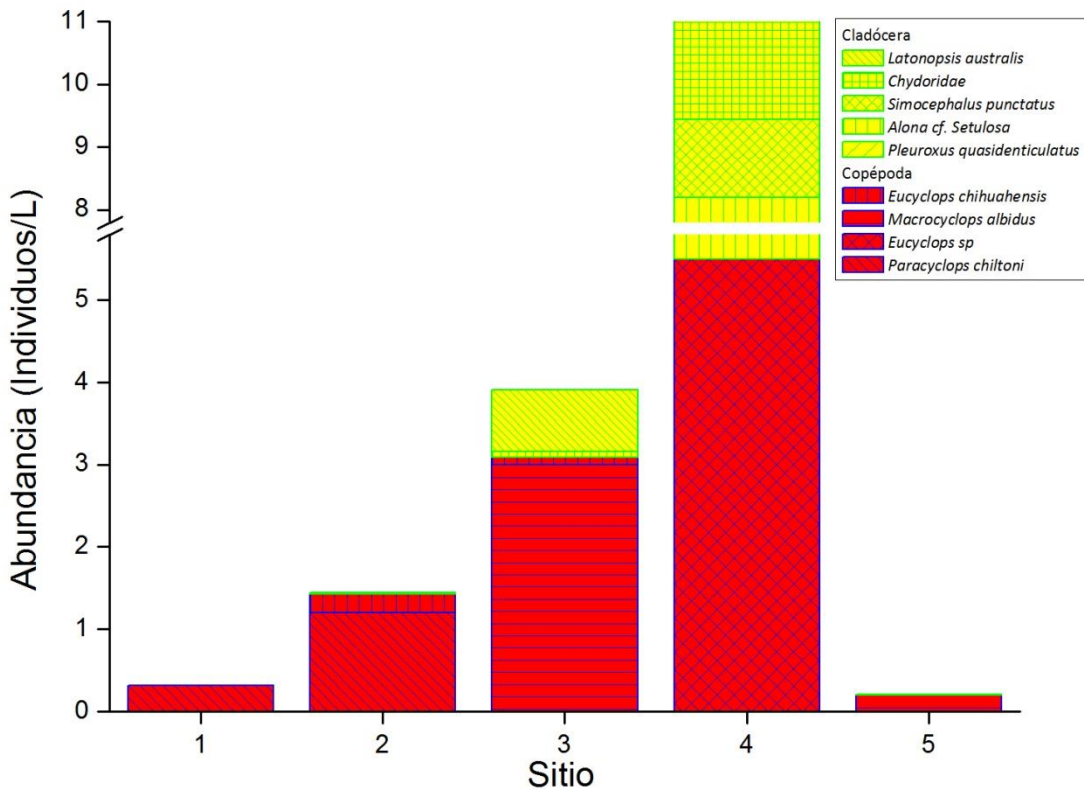


Figura 17 Abundancia de zooplancton por sitio, para la campaña de muestreo 1.

La Figura 18 muestra la abundancia por especie de zooplancton, en individuos por litro (individuos/L), para cada sitio de muestreo, 1 (Club de Tiro), 2 (Abrevadero), 3 (Laguna), 4 (Presa) y 5 (Canal), para la campaña de muestreo 2. En esta ocasión se encontraron tres grupos de zooplancton, Copépoda, Cladócera y Rotífera. Como se mencionó anteriormente, en el caso del muestreo 2, las abundancias generalmente fueron mayores. Para el sitio 1 (Club de Tiro), se encontró nuevamente la especie de copépodo, *Paracyclops chiltoni*, y en esta ocasión también se encontró presencia del grupo Rotífera. En el sitio 2 (Abrevadero) se encontró una especie del grupo Copépoda, *Eucyclops chihuahensis*, y presencia del grupo Rotífera. Para el sitio 3 (Laguna) se encontró la presencia de los tres grupos de zooplancton, del grupo Copépoda, la especie *Acanthocyclops sp.*, del grupo Cladócera, *Latonopsis australis* y también individuos del grupo Rotífera. Nuevamente, el sitio 4 (Presa), es el sitio con mayores niveles de abundancia,

aunque en este caso se encontraron especies solo del grupo Cladóceras (*Alona cf. Setulosa* y *Simocephalus punctatus*) e individuos sin identificar del grupo Rotíferos. Y el sitio 5 (Canal), continúa con baja abundancia de zooplancton, en esta ocasión con presencia de individuos no identificados del grupo Rotíferos.

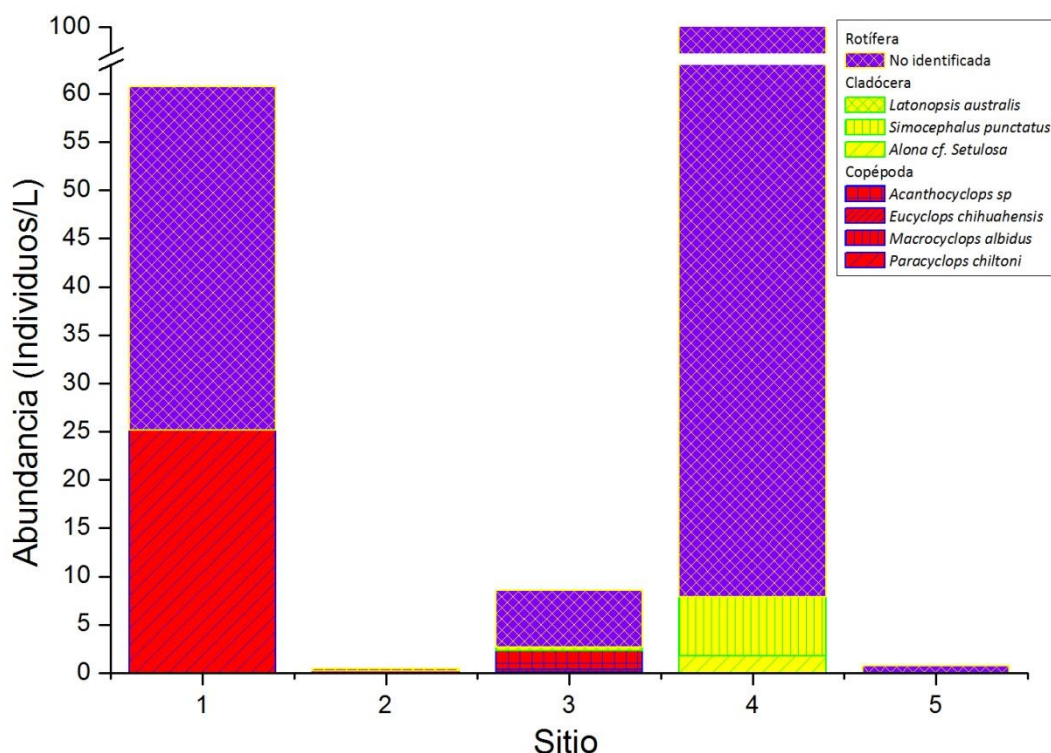


Figura 18 Abundancia de zooplancton por sitio, para la campaña de muestreo 2.

La Figura 19 muestra un esquema cualitativo de la contaminación con arsénico y las especies de zooplancton encontradas en cada sitio y muestreo. En la base, en color verde, el agua que contiene concentraciones de arsénico que se encuentran dentro o en el rango de los límites máximos permisibles para la normativa mexicana de 0.2 mg/L (DOF, 1989; SEMARNAT, 1996), para los sitios no contaminados (sitio 4 (Presa) y sitio 5 (Canal)). En medio, en color amarillo, representando una contaminación intermedia, está el agua con niveles de arsénico entre 1.6 y 5.91 mg/L, a esta zona perteneces el sitio 2 (Abrevadero) y sitio 3 (Laguna). Y finalmente, en la parte superior, en color rojo, indicando niveles muy

altos de agua contaminada con concentraciones de arsénico de hasta 53.23 mg/L, el sitio 1 (Club de Tiro). De acuerdo a este esquema, las especies que podrían proponerse de ser probadas como indicadores potenciales de contaminación de arsénico en agua, son las que en una misma zona geográfica y parámetros similares (pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura), no sobreviven al incrementar la concentración de arsénico en su ecosistema. De acuerdo a este estudio, dichas especies son: del grupo Cladóceras, *Simocephalus punctatus*, *Alona cf. Setulosa* y del grupo Copépoda, *Eucyclops sp.* Por otro lado, hay 3 especies que co-existen en agua libre de contaminación con arsénico, medianamente contaminada y muy contaminada. En el caso de la especie *Chydoridae*, del grupo Cladóceras, fue encontrada en agua libre de arsénico del sitio 4 (Presa) y el sitio 5 (Canal), y también en el sitio 3 (Laguna), el cual se encuentra medianamente contaminada con arsénico. La especie del grupo Copépoda, *Macrocyclops albidus*, fue encontrada en agua libre de arsénico del sitio 5 (Canal) y agua contaminada del sitio 3 (Laguna). Por último, *Paracyclops chiltoni*, del grupo Copépoda, fue localizada en agua contaminada del sitio 2 (Abrevadero) y en agua muy contaminada con arsénico del sitio 1 (Club de Tiro). Por lo que dichas especies podrían ser organismos extremófilos, capaces de vivir en ambientes extremos de contaminación con arsénico. Debido a esto, ofrecen oportunidades para el estudio de incorporación de arsénico a la cadena trófica y/o modificaciones morfológicas y/o adaptativas.

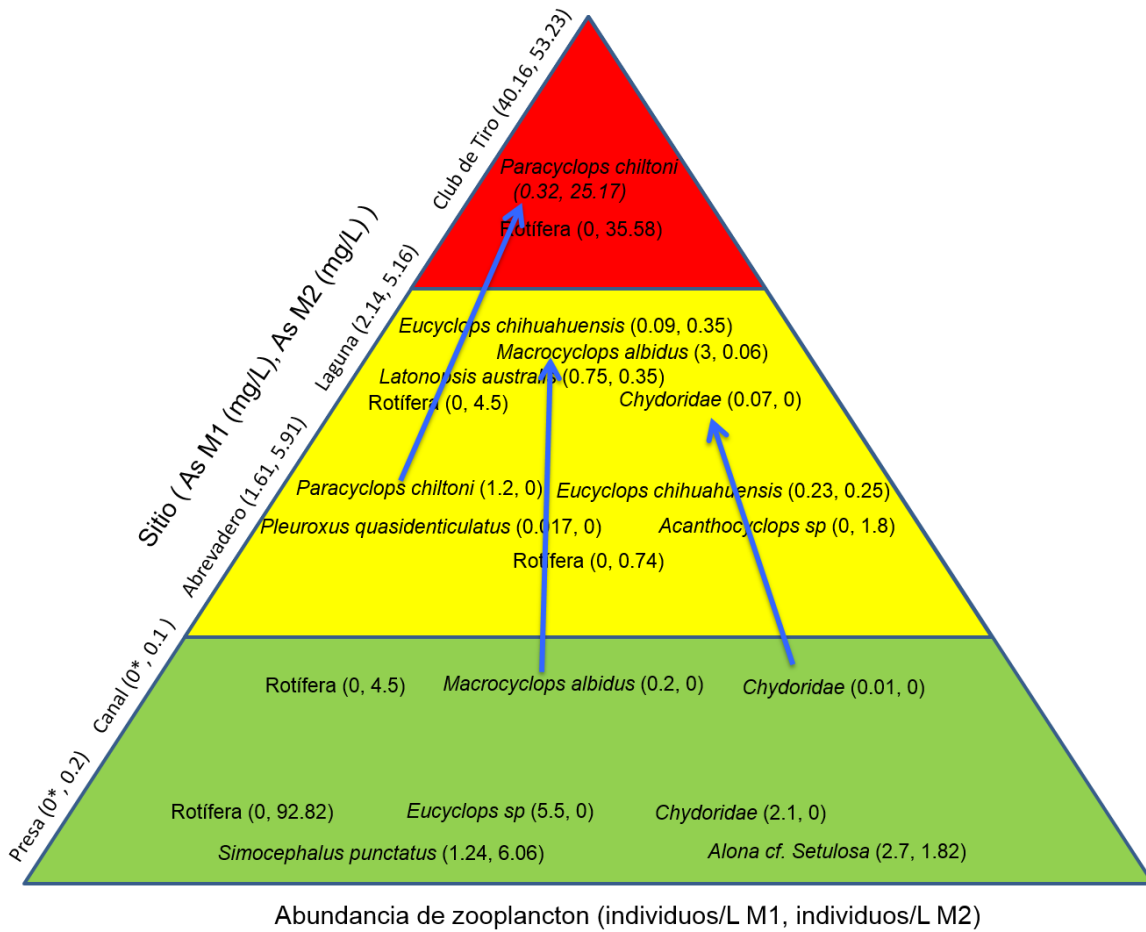


Figura 19 Abundancia de cada especie de zooplancton encontrada para M1 y M2 y concentración de arsénico encontrada en el sitio de su recolección.

7.5 Bioconcentración de arsénico en organismos

La Figura 20 muestra la bioconcentración de arsénico en peces, zooplancton, insectos y caracoles. En el caso de los peces, Figura 20a, estos se encontraron habitando en los sitios 2 (Abrevadero), 3 (Laguna) y 4 (Presas), dónde las concentraciones de arsénico en agua fueron de 5.18, 4.99 y 0.224 mg/L, respectivamente y bioconcentraciones de arsénico que varían de los 10.47 mg/kg hasta los 37.52 mg/kg. Para aguas naturales con valores de 0.05 mg/L, se han

reportado bioconcentraciones de arsénico en peces que varían desde 2.3 mg/kg hasta 3.5 mg/kg (Sydeman and Jarman, 1998).

En la Figura 20b, referente al zooplancton se obtuvieron muestras de los sitios 2 (Abrevadero) y 3 (Laguna), encontrándose bioconcentraciones de arsénico de 1300 mg/kg y 746.2 mg/k, respectivamente. Dichos microorganismos, habitando en agua con niveles de arsénico que varían de 4.99 a 5.77 mg/L. Para aguas naturales con valores de arsénico de 0.2 mg/L, se han encontrado bioconcentraciones de arsénico en zooplancton de hasta 32 mg/kg (Caumette et al., 2011), si extrapolamos la relación de bioconcentración a concentración de arsénico en agua de 53.23 mg/L, como lo es el caso de nuestro sitio de estudio, observamos que la relación se cumple.

Con respecto de los insectos (Figura 20c), se encontraron valores de arsénico de hasta 222 mg/kg y 738.63 mg/kg, encontrados en los sitios 3 (Laguna) y 4 (Presa), con agua con concentraciones de arsénico de 5.3 y 0.2 mg/L, respectivamente. Para aguas naturales con niveles de arsénico de 3.2×10^{-4} mg/L, se han reportado bioconcentraciones de arsénico en insectos, de hasta 4.1×10^{-4} mg/kg (Mogren et al., 2013).

Los caracoles de la Figura 20d fueron colectados en el sitio 1 (Club de Tiro) y tienen una bioconcentración de arsénico de 1377.05 mg/kg, habitando aguas con concentración de arsénico de 53.23 mg/L. Para aguas naturales con niveles de arsénico de hasta 0.005 mg/L, se han encontrado bioconcentraciones de arsénico en caracoles de hasta 0.026 mg/kg (Adedeji et al., 2011).

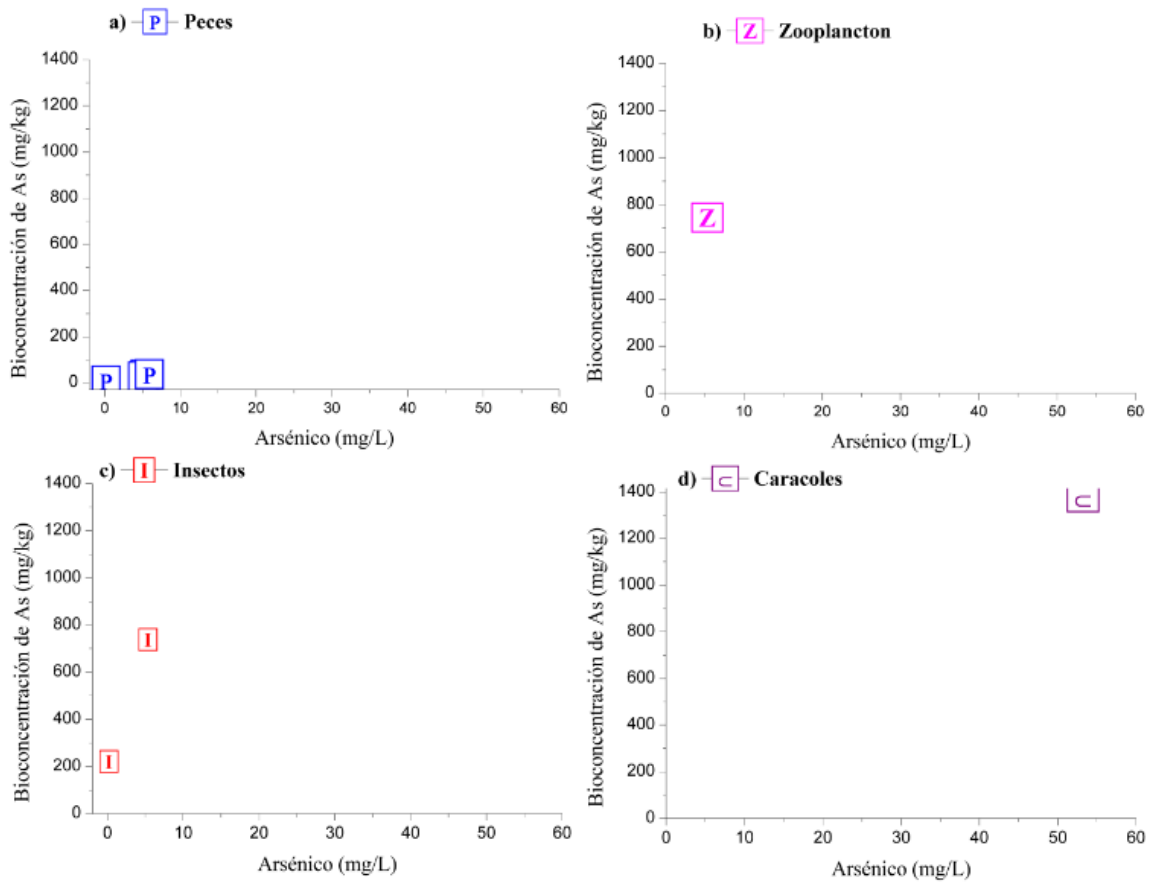


Figura 20 Bioconcentración de arsénico en distintos organismos colectados y concentración de arsénico en el agua en que habitan. a) Peces, b) Zooplancton, c) Insectos y d) Caracoles.

Por otro lado, en los organismos colectados para el sitio 3 (Laguna) las concentraciones de arsénico para zooplancton, como para insectos fue similar. En los sitios con menores concentraciones de arsénico en agua, los valores del arsénico en los organismos también son menores.

7.5.1 Factores de Bioconcentración (FBC)

La Tabla 8 muestra los factores de bioconcentración (FBC) de arsénico para los organismos colectados. Para el sitio 1 (Club de Tiro) se obtuvo un FBC para caracoles, 25.87, que nos indica un factor intermedio, mientras que para el sitio 2

(Abrevadero), se obtuvieron factores de bioconcentración para dos tipos de organismos, peces y zooplancton, los factores encontrados son de 6.36 y 220.34, dichos organismos se encontraban habitando agua con una concentración de arsénico de 5.9 mg/L, estos valores son considerados como de baja y alta bioconcentración, según el criterio utilizado. En el sitio 3 (Laguna) se obtuvieron cuatro factores de bioconcentración, dos pertenecientes a peces, uno a insectos y uno más a zooplancton. Los valores del FBC fueron, 5.50, 6.86, 138.58 y 140.00, respectivamente. Todos estos habitando aguas con concentraciones de arsénico que varía entre 4.99 y 5.33 mg/L, de forma similar al sitio anterior, los peces presentan FBC bajos, mientras que los insectos y el zooplancton, obtienen FBC altos. Para el caso del sitio 4 (Presa), se obtuvieron FBC para dos organismos, peces e insectos, colectados en agua con una concentración de arsénico de 0.2 mg/L, los valores son, 52.35 y 1110.00, respectivamente, en este caso los peces obtuvieron un valor intermedio y los insectos un valor considerado alto.

Tabla 8 Factores de bioconcentración de arsénico de los organismos analizados.

Lugar(Sitio)	Organismo	Concentración de arsénico en órgano	Concentración de arsénico en medio	FBC
		mg/kg	mg/kg	
Club de Tiro(1)	Caracoles	1377.05	53.35	25.87
Abrevadero(2)	Peces	37.52	5.9	6.36
	Zooplancton	1300	5.9	220.34
Laguna(3)	Peces	27.43	4.99	5.50
	Peces	36.57	5.33	6.86
	Insectos	738.63	5.33	138.58
	Zooplancton	746.2	5.33	140.00
Presa(4)	Peces	10.47	0.2	52.35
	Insectos	222	0.2	1,110.00

Estudios posteriores serían necesarios para determinar si los organismos que habitan en el área de estudio presentan, además de bioconcentración, presentan bioacumulación y biomagnificación.

Conclusiones

Se determinaron las concentraciones de arsénico en muestras de agua colectadas en los sitios 1 (Club de Tiro), 2 (Abrevadero), 3 (Laguna), 4 (Presa) y 5 (Canal), encontrando que tres de éstos lugares (1, 2 y 3), sobrepasan la normativa mexicana respecto a límites máximos permisibles de arsénico en agua para distintos usos (0.2 mg/L), como lo son descarga a cuerpos de agua, recreación y protección a la vida acuática.

Se cuantificó la abundancia de zooplancton, hasta su mínimo taxón posible. En el grupo Rotífera se determinó la abundancia general, mientras que para los grupos de Copépoda y Cladóceras se determinó la abundancia de cada especie. Las especies de zooplancton encontradas en el sitio de estudio fueron similares a las antes reportadas, sin embargo, estas especies no se han reportado para la zona estudiada. En el agua contaminada con arsénico, se encontraron 7 especies: *Macrocyclops albidus*, *Chydorus sp*, *Latonopsis australis*, *Paracyclops chiltoni*, *Eucyclops chihuahuensis*, *Pleuroxus quasidenticulatus* y *Acanthocyclops sp*.

Se midió la bioconcentración de arsénico en zooplancton, específicamente el grupo copépodo, que presentó una bioconcentración de arsénico de hasta 746.2 mg/kg.

Las especies que se encuentran en agua no contaminada son del grupo Cladóceras, *Simocephalus punctatus* y *Alona cf. Setulosa* y del grupo Copépoda, *Eucyclops sp*. Se sugiere estudiar el potencial de estas para posteriormente ser propuestas como un indicador ambiental.

Para el sitio más contaminado, dónde la concentración de arsénico llegó hasta los 53.35 mg/L, sitio 1 (Club de Tiro), se reporta la especie *Paracyclops chiltoni*, del grupo Copépoda. Se sugiere proponer esta especie como una especie que habita ambientes extremos de contaminación por arsénico, así como las adaptaciones

que puede estar teniendo en el organismo y los mecanismos de incorporación de arsénico a la cadena trófica.

Se midió la bioconcentración de arsénico en peces, insectos y caracoles, y con este valor, se obtuvieron factores de bioconcentración, que indican una alta capacidad de los insectos y caracoles para bioconcentrar el arsénico, en contraste con la bioconcentración de organismos mayores como lo son los peces, quienes obtuvieron valores bajos de factor de bioconcentración.

En el agua de Matehuala hay niveles de arsénico que exceden la normativa mexicana para la protección de la vida acuática de (0.2 mg/L de arsénico) y la concentración letal de arsénico para zooplancton. No obstante, hay presencia de organismos, tanto en el agua no contaminada como en el agua contaminada con arsénico, con concentraciones que varían desde 1.6 mg/L hasta 53.29 mg/L.

Referencias

- Adedeji, O., Adeyemo, O.K., Oyedele, M.O., 2011. Heavy metals in snail and water samples from Alaro river in Oluyole industrial area of Ibadan southwestern Nigeria. *J. Appl. Sci. Environ. Sanit.* 6, 115–121.
- Adler, F.J., 2014. *El futuro del agua en Tucumán*, 1ra. ed. Yerba Buena, Argentina.
- Aguilar, A.I., 2005. Los peces como indicadores de la calidad ecológica del agua. *Rev. Digit. Univ.* 6.
- Alayo, M., Iannaccone, J., 2002. Ensayos ecotoxicológicos con petróleo crudo, diesel 2 y diesel 6 con dos subespecies de *Brachionus plicatilis* Müller 1786 (Rotífera: Monogononta). *Gayana Concepc.* 66, 45–58. doi:10.4067/S0717-65382002000100007
- Alcocer, J., Bernal-Brooks, F.W., 2010. Limnology in Mexico. *Hydrobiologia* 644, 1–54. doi:10.1007/s10750-010-0211-1
- Alonso-Rodríguez, R., Páez-Osuna, F., Gárate-Lizárraga, I., 2004. El fitoplancton en la camaronicultura y larvicultura: importancia de un buen manejo. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México.
- Anufrieva, E.V., 2015. Do copepods inhabit hypersaline waters worldwide? A short review and discussion. *Chin. J. Oceanol. Limnol.* 33, 1354–1361.
- Aranguiz-Acuna, A., Serra, M., 2016. Diapause as escape strategy to exposure to toxicants: response of *Brachionus calyciflorus* to arsenic. *Ecotoxicology* 25, 708–719. doi:10.1007/s10646-016-1629-7
- Barba-Álvarez, R., Lanza-Espino, G.D., Contreras-Ramos, A., González-Mora, I., 2013. Insectos acuáticos indicadores de calidad del agua en México: casos de estudio, ríos Copalita, Zimatán y Coyula, Oaxaca. *Rev. Mex. Biodivers.* 84, 381–383. doi:10.7550/rmb.31037
- Bartram, J., Ballance, R., 1996. *Water quality monitoring. A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*, 1st. ed. United Nations Environment Programme/World Health Organization.
- Borrego, A.J., García-Doncel, H.R., Granados, G.S., Luna, P.M., Pérez, C.J.A., Portero, C.R., Siles, A.M.C., 1994. *Ciencias de la Naturaleza*, 5ta. ed. Sevilla, España.
- Bredesen, E.L., Bos, D.G., Laird, K.R., Cumming, B.F., 2002. A cladoceran-based paleolimnological assessment of the impact of forest harvesting on four lakes from the central interior of British Columbia, Canada. *J. Paleolimnol.* 28, 389–402. doi:10.1023/A:1021887915458
- Briones Cornejo, C.I., 2012. Estudio preliminar de la diversidad de cládoceros en el lago Chongón, Guayas.
- Brookins, D.G., 1988. *Eh-Ph Diagrams for Geochemistry*. Springer Verlag.
- Bundschuh, J., Armienta, M.A., Birkle, P., Bhattacharya, P., Matschullat, J., Mukherjee, A.B., 2009. *Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*. CRC Press.
- Campbell, N.A., Reece, J.B., 2007. *Biología*, 6ta. ed. Médica Panamericana S.A., Madrid, España.
- Caumette, G., Koch, I., Moriarty, M., Reimer, K.J., 2012a. Arsenic distribution and speciation in *Daphnia pulex*. *Sci. Total Environ.* 432, 243–250.
- Caumette, G., Koch, I., Moriarty, M., Reimer, K.J., 2012b. Arsenic distribution and speciation in *Daphnia pulex*. *Sci. TOTAL Environ.* 432, 243–250. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.05.050
- Caumette, G., Koch, I., Estrada, E., Reimer, K.J., 2011. Arsenic Speciation in Plankton Organisms from Contaminated Lakes: Transformations at the Base of the Freshwater Food Chain. *Environ. Sci. Technol.* 45, 9917–9923. doi:10.1021/es2025092
- Caumette, G., Koch, I., House, K., Reimer, K.J., 2014. Arsenic cycling in freshwater phytoplankton and zooplankton cultures. *Environ. Chem.* 11, 469–505. doi:10.1071/EN14039

- Caumette, G., Kock, I., Reimer, K.J., 2012c. Arsenobetaine formation in plankton: a review of studies at the base of the aquatic food chain. *J. Environ. Monit.* 14, 2841–2853. doi:10.1039/c2em30572k
- Cervantes-Martínez, A., 2005. Análisis limnológico de dos sistemas cársticos (cenotes) de la Península de Yucatán, México con énfasis en la variación espacial y temporal del zooplancton. El Colegio de la Frontera Sur, Yucatán, México.
- Cervantes Martínez, A., Gutiérrez Aguirre, M.A., Delgado Blas, V.H., Ruíz Ramírez, J.D., 2012. Especies de zooplancton dulceacuícola de Cozumel, Primera. ed. Universidad de Quintana Roo, México, DF.
- Chen, C.Y., Sillett, K.B., Folt, C.L., Whittemore, S.L., Barchowsky, A., 1999a. Molecular and demographic measures of arsenic stress in *Daphnia pulex*. *Hydrobiología* 401, 229–238. doi:10.1023/A:1003738427354
- Chen, C.Y., Sillett, K.B., Folt, C.L., Whittemore, S.L., Barchowsky, A., 1999b. Molecular and demographic measures of arsenic stress in *Daphnia pulex*. *Hydrobiología* 401, 229–238. doi:10.1023/A:1003738427354
- CONAGUA, 2013. Estadísticas del Agua en México.
- Conde-Porcuna, J.M., Ramos-Rodríguez, E., Morales-Baquero, R., 2004. El zooplancton como integrante de la estructura trófica de los ecosistemas lénticos 13, 23–29.
- De la lanza, E.G., Hernández, P.S., Carbajal, P.J.L., 2000. Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (Bioindicadores), 1ra. ed. Plaza y Valdés, S.A. de C.V., México.
- Desonie, D., 2008. Hydrosphere. Freshwater systems and pollution. Chelsea House, United States of America.
- Devlin, T.M., 1999. Bioquímica, 3ra. ed. Reverté, S.A., New York, NY.
- DOF, 1989. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89.
- Elías Gutierrez, M., Suárez Morales, E., Gutiérrez Aguirre, M., Silva Briano, M., Granados Ramírez, J.G., Garfías Espejo, T., 2008. Cladocera y Copepoda de las aguas continentales de México. Guía ilustrada. Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial, México.
- Emanuela Cristina Freitas, O.R., 2010. Acute Toxicity Tests with the Tropical Cladoceran *Pseudosida ramosa*: The Importance of Using Native Species as Test Organisms. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 60, 241–9. doi:10.1007/s00244-010-9541-2
- EPA, 2002. *Daphnia Magna* Life-Cycle (21-Day Renewal) Chronic Toxicity Test. United States of America.
- EPA, 1994. Method 200.7, Revision 4.4: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Escolástico, C.L., Cabildo, M.P.M., Claramunt, R.M.V., Claramunt, T.V., 2013. Ecología II: comunidades y ecosistemas. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España.
- Figueruelo, J.E., Marino, M.D., 2004. Química Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales. Reverté, S.A., España.
- Gagneten, A.M., 2008. Respuestas del zooplancton a la contaminación por cromo en la cuenca del río Salado inferior (Santa Fe, Argentina) (Tesis de Doctorado). Universidad del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- García, S.S., 2013. Estudios de especiación de arsénico y acumulación de metales en muestras de interés medioambiental (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

- Geyer, H., Scheunert, I., Korte, F., 1986. Bioconcentration potential of organic environmental chemicals in humans. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 6, 313–347. doi:10.1016/0273-2300(86)90002-4
- Gomez-Caminero, A., Howe, P., Hughes, M., Kenyon, E., Lewis, D., Moore, M., Ng, J., Aitio, A., Becking, G., 2001. Environmental Health Criteria 224: Arsenic and arsenic compounds. World Health Organization, Geneva.
- Goulden, C., Comotto, R., Hendrickson, J., Hornig, L., Johnson, K., 1982. Procedures and Recommendations for the Culture and Use of, in: Pearson, J., Foster, R., Bishop, W. (Eds.), *Aquatic Toxicology and Hazard Assessment*. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, pp. 139–139–22.
- Halbach, U., 1984. Population dynamics of rotifers and its consequences for ecotoxicology. *Hydrobiologia* 109, 79–96. doi:10.1007/BF00006300
- H. Ayuntamiento de Matehuala, 2016. Matehuala, Enciclopeida de los municipios y delgeaciones de México. Centro de desarrollo municipal de la secretaría de desarrollo social del gobierno del estado de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- INIFAP, 2016. Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- ISO 6341:1996, W. quality, n.d. - Water quality -- Determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) -- Acute toxicity test [WWW Document]. URL http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=21923 (accessed 3.30.16).
- Janssen, C.R., Ferrando, M.D., Persoone, G., 1994. Ecotoxicological Studies with the Freshwater Rotifer *Brachionus calyciflorus*: IV. Rotifer Behavior as a Sensitive and Rapid Sublethal Test Criterion. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 28, 244–255. doi:10.1006/eesa.1994.1050
- Jeppesen, E., Jensen, J.P., Lauridsen, T.L., Amsinck, S.L., Christoffersen, K., Søndergaard, M., Mitchell, S.F., 2003. Sub-fossils of cladocerans in the surface sediment of 135 lakes as proxies for community structure of zooplankton, fish abundance and lake temperature. *Hydrobiologia* 491, 321–330. doi:10.1023/A:1024488525225
- Jeppesen, E., Leavitt, P., De Meester, L., Jensen, J.P., 2001. Functional ecology and palaeolimnology: using cladoceran remains to reconstruct anthropogenic impact. *Trends Ecol. Evol.* 16, 191–198. doi:10.1016/S0169-5347(01)02100-0
- Kattel, G.R., Battarbee, R.W., Mackay, A., Birks, H.J.B., 2006. Are cladoceran fossils in lake sediment samples a biased reflection of the communities from which they are derived? *J. Paleolimnol.* 38, 157–181. doi:10.1007/s10933-006-9073-y
- Lara Del Río, A., 2015. Evaluación de acumulación de arsénico en cabello de poblaciones expuestas a este contaminante en el Complejo Hidráulico Matehuala-Cerrito Blanco. (Maestría). IPICYT, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., San Luis Potosí, SLP.
- Lillo, J., 2003. Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas.
- López-Saez, J.A., López, M.L., Cugny, C., Galop, D., 2005. Paleoecología de medios húmedos: el aporte de los microfósiles no polínicos. *Nuestra Tierra* 13–15.
- Martínez-Villegas, N., Briones-Gallardo, R., Ramos-Leal, J.A., Avalos-Borja, M., Castañón-Sandoval, A.D., Razo-Flores, E., Villalobos, M., 2013. Arsenic mobility controlled by solid calcium arsenates: A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem. *Environ. Pollut.* 176, 114–122. doi:10.1016/j.envpol.2012.12.025
- Martínez-Villegas, N.V., Mendoza, J., Álvarez, L., Anónimo, 2016. Usos, calidad y normatividad del agua en México. Fund. Wikimedia Inc.

- Mogren, C.L., Walton, W.E., Parker, D.R., Trumble, J.T., 2013. Trophic transfer of arsenic from an aquatic insect to terrestrial insect predators. PLOS ONE.
- Moore, G.S., 2007. Living with the Earth, 3rd. ed. Taylor & Francis Group, LLC.
- Moreno, F.D.P., Quintero, M.J., López, C.A., 2010. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. Rev. Contactos.
- Murillo, D.J.M., López, G.J.A., Rodríguez, H.L., 2010. Desarrollo sostenible, uso conjunto y gestión integral de recursos hídricos. Ministerio de Ciencia e Innovación/Instituto Geológico y Minero de España, España.
- NMX-AA-008-SCFI-2000, 2000. Análisis de agua-Determinación del pH-Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-008-1980).
- NMX-AA-012-SCFI-2001, 2001. Análisis de agua-Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-012-1980).
- NMX-AA-072-SCFI-2001, 2001. Análisis de agua-Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-072-1981).
- NMX-AA-087-SCFI, 2010. Análisis de agua-Evaluación de toxicidad aguda con *Daphnia magna*, Straus (Crustacea - Cladocera) - Método de prueba.
- NMX-AA-093-SCFI-2000, 2000. Análisis de agua-Determinación de la conductividad electrolítica-Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-093-1984).
- OMS, 2016. Arsénico. URL <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/> (accessed 6.8.15).
- OMS, 2015. Agua, Saneamiento y Salud.
- OMS, 2008. Guías para la calidad del agua potable.
- Ongley, E.D., 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Burlington, Canadá.
- Organización Mundial de la Salud, 2016. Arsénico [WWW Document]. WHO. URL <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/> (accessed 2.23.15).
- Pérez-Salazar, S., 2014. Introducción a la química y el ambiente, 3a. ed. Grupo Editorial Patria.
- Pinilla, G.A., 1998. Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia. Fundación Universitaria de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.
- Quiroz, H.M., Rodríguez, V.A.C., 2006. Bioindicadores de contaminación en sistemas acuáticos (insectos acuáticos), 1ra. ed. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Ravenscroft, P., Brammer, H., Richards, K., 2009. Arsenic Pollution: A Global Synthesis. John Wiley & Sons, Singapur.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., Monroy, M., 2004. Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. Water. Air. Soil Pollut. 152, 129–152. doi:10.1023/B:WATE.0000015350.14520.c1
- Repetto, M., 1995. Toxicología Avanzada. Diaz de Santos, S.A., Madrid, España.
- Revenga, J.E., 2012. Abundancia y distribución de elementos traza potencialmente tóxicos en lagos norpatagónicos. Universidad Nacional del Comahue, Argentina.
- Roldán, G.P., Restrepo, J.J.R., 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Universidad de Antioquia.
- Roldán Pérez, G., 2003. Bioindicación de la Calidad del Agua en Colombia, 1ra. ed. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Roldán Pérez, G., 1999. Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. Rev Colomb Cienc.
- Ruppert, E.E., Barnes, R.D., 1996. Zoología de los invertebrados, 6ta. ed. McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., Madrid, España.

- SEMARNAT, 1996. NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, Mexico.
- Serrano Gallego, R., 2003. Introducción al análisis de datos experimentales: tratamiento de datos en bioensayos, 2nd ed. Universitat Jaume I, Castellón de la Plana.
- Sirshendu De, Abhijit Maiti, 2012. Arsenic Removal from Contaminated Groundwater. The Energy and Resources Institute, India.
- Skofronick-Jackson, G., 2016. The importance of freshwater. NASA, United States of America.
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.* 17, 517–568. doi:10.1016/S0883-2927(02)00018-5
- Smirnov, N.N., 2014. *Physiology of the cladocera*. Elsevier, Moscow, Russia.
- Snell, T.W., Janssen, C.R., 1995. Rotifers in ecotoxicology: a review. *Hydrobiologia* 313-314, 231–247. doi:10.1007/BF00025956
- SSA, 2000. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud, México, DF.
- Suárez-Morales, E., 2011. Diversidad y distribución de los copépodos (Cyclopoida) de las zonas áridas del Centro-Norte de México (No. GT034). CONABIO, Quintana Roo, México.
- Suárez-Morales, E., Reid, J.W., 1998. An update list of the free-living freshwater copepods (crustacea) of México. *Southwest. Nat.* 43, 256–265.
- Suárez-Morales, E., Reid, J.W., Llifé, T.M., Fiers, F., 1996. Catálogo de los copépodos (Crustacea) continentales de la Península de Yucatán, México.
- Sydeman, W.J., Jarman, W.M., 1998. Trace metals in seabirds, Steller sea lion, and forage fish and zooplankton from central California. *Mar. Pollut. Bull.* 36, 828–832. doi:10.1016/S0025-326X(98)00076-9
- Tarbuck, E.J., Lutgens, F.K., 2005. *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*, 8a. ed. PEARSON/Prentice Hall, Madrid, España.
- Thorp, J.H., Covich, A.P., 2010. *Ecology and classification of North American freshwater invertebrates*, 3rd. ed. Elsevier, United Kingdom.
- Torrentera, L.B., G. J., A.T., 1989. La producción de alimento vivo y su importancia en agricultura.
- USGS, 2016. How much water is there on, in, and above the Earth? United States of America.
- Witty, L.M., 2004. *Practical Guide to Identifying Freshwater Crustacean Zooplankton*.
- Zambrano, L., 2007. La vida en las aguas continentales. *Ciencia* 58.
- Zoppi, de R.E., 2012. Retrospectiva de las publicaciones sobre el plancton en acta biológica venezolana.

ANEXOS

Anexo 1 Ponencia en el IV Seminario en Manejo de Recursos Naturales, con el título “Especies de zooplankton presentes en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí, México”.



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO



MANEJO DE RECURSOS NATURALES
ISLA COZUMEL



FP MC
Fundación
Parques y
Museos de
Cozumel
Quintana Roo

MANEJO DE RECURSOS NATURALES ISLA COZUMEL EN CONJUNTO CON LA UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO, UNIDAD ACADÉMICA COZUMEL Y LA FUNDACIÓN DE PARQUES Y MUSEOS

Otorgan la presente

Constancia

a:

Yadira Jazmín Mendoza-Chávez, Nadia Valentina Martínez-Villegas, Martha Angélica Gutiérrez-Aguirre y Adrián Cervantes-Martínez

Por su participación el

IV SEMINARIO EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

Con la ponencia: **ESPECIES DE ZOOPLANKTON PRESENTES EN AGUA CONTAMINADA CON ARSÉNICO EN MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO**, Realizado los días 21 al 24 de Octubre del 2015, en Cozumel Quintana Roo, México.



Dr. Alejandro Palalax Muñoz
Encargado del Despacho de la Dirección de la División de Desarrollo Sustentable



Lic. Jorge Alberto Martín Azueta
Director de la Fundación de Parques y Museos de Cozumel



LMRN Juan Carlos Uh-Moo
Presidente de Manejo de Recursos Naturales Isla Cozumel



Anexo 2, Memorias del “IV Seminario en Manejo de Recursos Naturales: Conservación y Manejo de la Biodiversidad”.

ESPECIES DE ZOOPLANCTON PRESENTES EN AGUA CONTAMINADA CON ARSÉNICO EN MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Mendoza-Chávez Yadira Jazmin¹, Martínez-Villegas Nadia Valentina¹, Gutiérrez-Aguirre Martha Angélica² y Cervantes-Martínez Adrián²

¹IPICYT, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Camino a la Presa San José No. 2055, Col. Lomas 4a Secc., 78216 San Luis Potosí, SLP, México. E-mail: yadira.mendoza@ipicyt.edu.mx, nadia.martinez@ipicyt.edu.mx

²Universidad de Quintana Roo, Av. Andrés Quintana Roo, calle 11 con calle 110 Sur s/n, frente a Col. San Gervasio, 77600, Cozumel, Quintana Roo, México. E-mail: adcervantes@uqroo.edu.mx, margutierrez@uqroo.edu.mx


El arsénico es un contaminante del agua que en niveles por encima de la normativa causa daños a organismos como el zooplancton, el cual está constituido por un grupo de animales acuáticos y pueden servir como indicadores de contaminación. En Matehuala, San Luis Potosí, se ha reportado contaminación del agua con arsénico pero se desconoce si hay presencia de zooplancton y riqueza de especies de este grupo. El objetivo de este estudio fue determinar las especies de zooplancton presentes en un acuífero contaminado con arsénico. Se recolectaron muestras de agua en recipientes de plástico en las que el arsénico fue cuantificado por ICP-OES. Para el caso del zooplancton, una muestra de agua se filtró por una red con abertura de malla de 0.45 µm. Los organismos fueron fijados con alcohol concentrado para su análisis en laboratorio. Se reportan concentraciones de arsénico en agua que varían desde <0.01mg/L hasta 41.35mg/L y un total de 10 especies de zooplancton: *Latomopsis australis*, *Pleuroxus quasidenticulatus*, *Chydorus* sp, *Darwinula* sp, *Hyocypris* sp, *Cypridopsis* sp2, *Ectocyclops phaleratus*, *Eucyclops chihuahuenis*, *Paracyclops chiltoni* y *Macrocyclus albidus*. También se encontraron estadios copepoditos, nauplios y otros microcrústaceos como los Anfipodos. De las muestras de agua recolectadas, 5 excedieron el límite máximo permisible de protección a la vida acuática (0.2mg/L) y las especies de zooplancton encontradas allí fueron similares a las mencionadas anteriormente. Estos resultados muestran el potencial de especies del zooplancton de la región para ser utilizadas en la construcción o adecuación de las normas de la calidad del agua mexicanas.

Palabras clave: arsénico, zooplancton, agua contaminada.

Anexo 3 Constancia de participación en el “IV Congreso Interdisciplinario de Posgrados, IPICYT”, con la presentación del cartel titulado “Zooplankton presente en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí”.



Anexo 4 Constancia de participación en el “V Congreso Interdisciplinario de Posgrado, IPICYT”, en la modalidad Presentación oral de IPITESIS, con el título “Arsénico y zooplancton: concentraciones letales o nuevos organismos bioindicadores”.



El comité organizador del V congreso Interdisciplinario de Posgrado (CONIP) y el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. (IPICYT)

Otorgan la presente

CONSTANCIA

a:

Yadira Jazmín Mendoza Chávez


Por su participación como asistente en el V Congreso Interdisciplinario de posgrado (CONIP).

Del 7 al 9 de septiembre de 2016, San Luis Potosí, S.L.P.


Dr. Alejandro Ricardo Femat Flores
Director General del IPICYT


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico del IPICYT


L.B.E. Mónica Monserrat Rojas Moreno
Representante Estudiantil Maestría IPICYT


M.C. Abraham Escobedo Moratilla
Representante Estudiantil Doctorado-IPICYT