



S.E.P.

S.E.S.

Tec.N.M.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“EVALUACIÓN DE LA BIOACUMULACIÓN DE METALES
PESADOS EN LA VEGETACIÓN ACUÁTICA FLOTANTE DE LA
LAGUNA DE CHIMALIAPAN, ESTADO DE MÉXICO.”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

LYSSETTE PERALTA CASTILLO

No. CONTROL: 1528M1571

DIRECTORA:

DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN

CODIRECTORA:

DRA. GRACIELA ZARAZÚA ORTEGA

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Metepec, Méx., 15/Junio/2017


DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

DEPI-395-691/2017

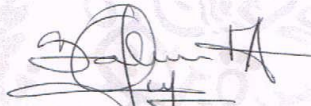
DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.


Por este medio comunicamos a usted que la Comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada **“EVALUACIÓN DE LA BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN LA VEGETACIÓN ACUÁTICA FLOTANTE, DE LA LAGUNA DE CHIMALIAPAN, ESTADO DE MÉXICO”**, que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental presenta el C. LYSSETTE PERALTA CASTILLO, con número de control 1528M1571 para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad necesario para proceder a la impresión del mismo.

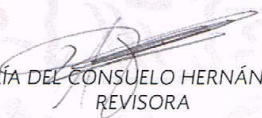
ATENTAMENTE



DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN
DIRECTORA DE TESIS


DRA. GRACIELA ZARAZÚA ORTEGA
CO-DIRECTORA DE TESIS


DR. NICÓLAS FLORES ÁLAMO
REVISOR


DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ
REVISOR


DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL
REVISORA


SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN





"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

Metepec, Méx., **26/Junio/2017**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

DEPI-395-1134/2017

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

C. LYSSETTE PERALTA CASTILLO
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE.

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado "**EVALUACIÓN DE LA BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN LA VEGETACIÓN ACUÁTICA, FLOTANTE, DE LA LAGUNA DE CHIMALIAPAN EN SAN PEDRO TULTEPEC, LERMA, ESTADO DE MÉXICO**" la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Educación, Integridad y Ciencia

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

JLGR/magj



Av. Tecnológico S/N, Fraccionamiento La Virgen, C.P. 52149,
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@ittoluca.edu.mx, www.ittoluca.edu.mx



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por la beca otorgada para la realización de los estudios de posgrado.

A mi Directora de Tesis Dra. María del Carmen Carreño de León por darme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto, por todo el apoyo brindado durante mis estudios de maestría, por su paciencia y su confianza durante este proceso, agradezco a su equipo de trabajo por su colaboración durante la etapa de muestreo. A mi Codirectora Dra. Graciela Zarazúa Ortega por sus enseñanzas, observaciones y aportaciones para el enriquecimiento de este estudio.

Agradezco al Dr. Isaías de la Rosa Gómez, el Dr. Nicolás Flores Álamo y la Dra. María del Consuelo Hernández Berriel por sus valiosos consejos, observaciones, comentarios y sugerencias.

Al Instituto Tecnológico de Toluca y al Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental de la misma institución por las facilidades brindadas para la realización de este trabajo, en especial al personal laboratorista por las capacitaciones para los análisis fisicoquímicos.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado:

A mis padres por todo el apoyo, la comprensión, la motivación y el amor incondicional que me han brindado; han sido un gran ejemplo a seguir y les agradezco el esfuerzo que han realizado durante estos años para formarnos como profesionistas.

A mis hermanos por su gran cariño, alegría y compañía en cada etapa de mi vida. A mis pequeños sobrinos por ser parte de mi inspiración. A mis abuelos, tíos y primos por sus consejos y sabiduría. Gracias familia.

A mis amigos con quienes he mantenido fuertes lazos a pesar de los cambios, la distancia y las nuevas experiencias, gracias por estar ahí.

Agradezco francamente a mis compañeros y amigos de posgrado por su solidaridad y gentileza.

Gracias a Dios y a la vida por haberme permitido concluir mis estudios de maestría.

RESUMEN

La Laguna de Chimaliapan forma parte del Área Natural Protegida Ciénegas de Lerma, actualmente recibe descargas de origen municipal e industrial, en las cuales se ha detectado la presencia de metales pesados. Tanto en las descargas como en la Laguna se ha observado el desarrollo de vegetación acuática flotante. El objetivo de este estudio fue evaluar la bioacumulación de los metales: cromo, manganeso, hierro, níquel, cobre, zinc y plomo en las especies vegetales predominantes.

Cada especie vegetal fue identificada mediante claves taxonómicas. Las concentraciones de metales en el agua y la vegetación se analizaron por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X. Se midieron parámetros *in situ* del agua: potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y se determinaron parámetros fisicoquímicos en laboratorio: demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, fósforo total, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal y nitrógeno total de acuerdo con la normatividad correspondiente.

El factor de bioacumulación reportó que todas las especies analizadas tienen la capacidad de hiperacumular hierro y manganeso. En la Laguna se encontraron las especies: *Bidens aurea* en los puntos de menor concentración de nitrógeno total; *Arenaria paludicola* que se ha reportado como resistente a contaminación orgánica y salinidad; *Myriophyllum heterophyllum* y *Eichhornia crassipes* las cuales son consideradas como especies invasivas.

En las descargas se encontraron: *Lemna gibba* en el punto con mayor concentración de nitrógeno total e *Hydrocotyle ranunculoides*, esta especie mostró amplios rangos de tolerancia a los parámetros analizados ya que se desarrolla en todos los puntos de muestreo y mostró potencial para hiperacumular cobre y zinc en la Laguna.

La bioacumulación de metales depende de las condiciones en las que se encuentra cada especie, así como de su capacidad para absorber los metales y hacerlos parte de su metabolismo o retenerlos en estructuras (sumergidas) donde no tengan efectos nocivos.

Las especies *E. crassipes* e *H. ranunculoides* pueden ser aprovechadas en el tratamiento secundario o terciario en el agua de las descargas, mientras que *A. paludicola* y *M. heterophyllum* se podrían estudiar como especies indicadoras y acumuladoras de contaminantes.

ABSTRACT

Chimaliapan lagoon belongs to the Protected Natural Area Ciénegas de Lerma, this lagoon receives municipal and industrial wastewater discharges that contain heavy metals. Floating aquatic vegetation develops in these discharges and inside the lagoon. The main objective in this paper was to evaluate the bioaccumulation in vegetation of the metals: chromium, manganese, iron, nickel, copper, zinc and lead.

Each vegetal species was determined by taxonomic keys. Metals concentration in water and in vegetation was analyzed by the X-ray fluorescence technique. Water *in situ* measurements of: potential of hydrogen, electrical conductivity, temperature and dissolved oxygen were carried out. The physicochemical parameters of water: biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, total phosphorus, nitrates, nitrites, ammoniacal nitrogen and total nitrogen were determined by the corresponding normativity.

Bioaccumulation factor reported that all analyzed species are able to hyperaccumulate iron and manganese. The vegetal species found inside the lagoon were: *Bidens aurea* in the places with less total nitrogen concentration; *Arenaria paludicola* which has been reported as a tolerant species of organic pollutants and high salinity; *Myriophyllum heterophyllum* and *Eichhornia crassipes* considered as invasive species.

Lemna gibba was found in the wastewater discharge with higher total nitrogen concentration. *Hydrocotyle ranunculoides* showed a wide range of tolerance to the analyzed parameters: this species develops in all sampling places, and it is able to hyperaccumulate copper and zinc inside the lagoon.

It was found that metal bioaccumulation depends on: ambiental conditions where each species develops, the species capacity to accumulate metals and make them part of its metabolism, and species capacity to keep toxic metals into structures where they do not have harmful effects (like roots).

E. crassipes and *H. ranunculoides* could be used in the secondary and tertiary wastewater treatment of the analyzed discharges; meanwhile *A. paludicola* and *M. heterophyllum* could be studied as indicators and accumulators of pollutants.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS	2
1.1 Ciénegas de Lerma	2
1.2 Contaminación en la Laguna de Chimaliapan, Estado de México	3
1.3 Contaminación del agua por metales pesados	6
1.4 Parámetros fisicoquímicos del agua	7
1.5 Vegetación acuática en las descargas y en la Laguna de Chimaliapan	10
1.6 Bioacumulación e hiperacumulación de metales pesados en vegetación acuática	14
1.7 Determinación de los factores de bioacumulación y traslocación de metales	17
1.8 Metales pesados en cuerpos de agua	18
2. MÉTODO	22
2.1 Ubicación de la zona de estudio	23
2.2 Metodología para el muestreo y análisis de agua	24
2.3 Metodología para el muestreo, tratamiento de muestras y determinación de metales pesados en la vegetación acuática flotante	28
3. RESULTADOS y DISCUSIÓN	31
3.1 Resultados de análisis fisicoquímicos del agua en descargas	31
3.2 Resultados de análisis fisicoquímicos del agua en la Laguna de Chimaliapan	39
3.3 Resultados de metales totales y metales solubles en el agua de descargas	47

3.4	Resultados de totales y solubles en el agua de la Laguna de Chimaliapan	52
3.5	Vegetación acuática encontrada en las descargas y la Laguna de Chimaliapan	56
3.6	Metales en la vegetación acuática analizada	60
3.7	Bioacumulación de metales en vegetación acuática flotante en Descargas	65
3.8	Bioacumulación de metales en vegetación acuática flotante en la Laguna de Chimaliapan	71
CONCLUSIONES		84
RECOMENDACIONES		86
REFERENCIAS		87
ANEXOS		93

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1.1	Análisis de amenazas en la Laguna de Chimaliapan	4
Tabla 1.2	Parámetros fisicoquímicos analizados	9
Tabla 1.3	Criterio para el factor de translocación	18
Tabla 2.1	Ubicación e identificación de los puntos de muestreo	23
Tabla 2.2	Descripción de preservación de muestras de agua	24
Tabla 2.3	Parámetros analizados en laboratorio	26
Tabla 3.1	Resultados de los parámetros fisicoquímicos analizados en el agua de descargas	31
Tabla 3.2	Relación DBO total entre DQO total en las descargas	33
Tabla 3.3	Parámetros fisicoquímicos del agua en la Laguna de Chimaliapan	39
Tabla 3.4	Concentración de metales totales en el agua de las descargas	47
Tabla 3.5	Concentración de fracción soluble de metales en las descargas	48
Tabla 3.6	Concentración de metales totales en el agua de la Laguna de Chimaliapan	53
Tabla 3.7	Concentración de la fracción soluble de metales en el agua de la laguna de Chimaliapan	53
Tabla 3.8	Concentración de metales en la vegetación acuática	60
Tabla 3.9	Media y desviación estándar del factor de bioacumulación de la fracción total de metales	62
Tabla 3.10	Media y desviación estándar del factor de bioacumulación de la fracción soluble de metales	63
Tabla 3.11	Medias y desviación estándar del factor de traslocación de metales en la vegetación	65

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1.1	Localización de las Ciénegas de Lerma	2
Figura 2.1	Diagrama del desarrollo experimental de la investigación	22
Figura 2.2	Mapa de la zona de estudio y puntos de muestreo	23
Figura 2.3	Entrada a la Laguna de Chimaliapan y medición de parámetros <i>in situ</i>	25
Figura 2.4	Muestreo de vegetación acuática flotante mediante cuadrantes, lavado y separación por especie de muestras vegetales	28
Figura 2.5	Plantas seccionadas en estructuras sumergidas y aéreas	29
Figura 2.6	Molino eléctrico M20 IKA-WERKE usado en la preparación de muestras vegetales	29
Figura 2.7	Tamizado y almacenamiento de muestras vegetales	29
Figura 3.1	DBO ₅ en Descargas	32
Figura 3.2	DQO en Descargas	33
Figura 3.3	OD en Descargas	34
Figura 3.4	PT en Descargas	35
Figura 3.5	NT en Descargas	35
Figura 3.6	N-NO ₃ ⁻ en Descargas	36
Figura 3.7	N-NO ₂ en Descargas	36
Figura 3.8	pH en Descargas	37
Figura 3.9	Temperatura en Descargas	38
Figura 3.10	CE en Descargas	38
Figura 3.11	DBO ₅ en la Laguna de Chimaliapan	40
Figura 3.12	DQO en la Laguna de Chimaliapan	41
Figura 3.13	OD en la Laguna de Chimaliapan	42
Figura 3.14	PT en la Laguna de Chimaliapan	42

Figura 3.15	NT en la Laguna de Chimaliapan	43
Figura 3.16	N-NO ₂ en la Laguna de Chimaliapan	44
Figura 3.17	N-NH ₄ ⁺ en la Laguna de Chimaliapan	44
Figura 3.18	pH en la Laguna de Chimaliapan	45
Figura 3.19	Temperatura en la Laguna de Chimaliapan	46
Figura 3.20	CE en la Laguna de Chimaliapan	46
Figura 3.21	Cr en Descargas	48
Figura 3.22	Mn en Descargas	49
Figura 3.23	Hierro en Descargas	50
Figura 3.24	Ni en Descargas	50
Figura 3.25	Cu en Descargas	51
Figura 3.26	Zn en Descargas	51
Figura 3.27	Pb en Descargas	52
Figura 3.28	Mn en la Laguna de Chimaliapan	54
Figura 3.29	Hierro en la Laguna de Chimaliapan	54
Figura 3.30	Ni en la Laguna de Chimaliapan	55
Figura 3.31	Cu en la Laguna de Chimaliapan	55
Figura 3.32	Zn en la Laguna de Chimaliapan	56
Figura 3.33	<i>Arenaria paludicola</i> en la Laguna de Chimaliapan	57
Figura 3.34	<i>Bidens aurea</i> la Laguna de Chimaliapan	57
Figura 3.35	<i>Eichhornia crassipes</i> en la Laguna de Chimaliapan	58
Figura 3.36	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> en la Laguna de Chimaliapan	58
Figura 3.37	<i>Myriophyllum heterophyllum</i> en la Laguna de Chimaliapan	59
Figura 3.38	<i>Lemna gibba</i> en Descarga	59
Figura 3.39	Metales en <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> de Descarga 1	66
Figura 3.40	Metales en <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> de Descarga 2	67
Figura 3.41	Metales en <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> de Descarga 3	69

Figura 3.42	Metales en <i>Lemna gibba</i> de Descarga 3	70
Figura 3.43	Metales en <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> de Descarga 4	71
Figura 3.44	Metales en <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> de Laguna punto 1	72
Figura 3.45	Metales en <i>Eichhornia crassipes</i> de Laguna punto 1	73
Figura 3.46	Metales en <i>Myriophyllum heterophyllum</i> de Laguna punto 1	74
Figura 3.47	Metales en <i>Arenaria paludicola</i> de Laguna punto 1	75
Figura 3.48	Metales en <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> de Laguna punto 2	77
Figura 3.49	Metales en <i>Eichhornia crassipes</i> de Laguna punto 2	78
Figura 3.50	Metales en <i>Bidens aurea</i> de Laguna punto 2	79
Figura 3.51	Metales en <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> de Laguna punto 3	80
Figura 3.52	Metales en <i>Eichhornia crassipes</i> de Laguna punto 3	81
Figura 3.53	Metales en <i>Myriophyllum heterophyllum</i> de Laguna punto 3	82
Figura 3.54	Metales en <i>Bidens aurea</i> de Laguna punto 3	83

RELACIÓN DE ANEXOS

Anexo 1	Análisis de varianza DBO ₅	93
Anexo 2	Análisis de varianza DQO	93
Anexo 3	Análisis de varianza OD	93
Anexo 4	Análisis de varianza PT	93
Anexo 5	Análisis de varianza NT	94
Anexo 6	Análisis de varianza N-NO ₂	94
Anexo 7	Análisis de varianza pH	94
Anexo 8	Análisis de varianza T	94
Anexo 9	Análisis de varianza CE	94
Anexo 10	Coeficiente de correlación entre metales totales y parámetros físicoquímicos de agua en descargas	95
Anexo 11	Coeficiente de correlación entre metales solubles y parámetros físicoquímicos de agua en descargas	95
Anexo 12	Coeficiente de correlación entre metales totales y parámetros físicoquímicos de agua en la Laguna	95
Anexo 13	Coeficiente de correlación entre metales solubles y parámetros físicoquímicos de agua en la Laguna	96

GLOSARIO

Br	Bromo
cm	Centímetros
Co	Cobalto
Cu	Cobre
CE	Conductividad eléctrica
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
D1	Descarga 1
D2	Descarga 2
D3	Descarga 3
D4	Descarga 4
DENUE	Directorio estadístico nacional de unidades económicas
Sr	Estroncio
FBA	Factor de bioacumulación
FT	Factor de traslocación
FRX	Fluorescencia de Rayos x
PT	Fósforo total
°C	Grados centígrados
g	Gramo
Fe	Hierro
ININ	Instituto nacional de investigaciones nucleares
Kg	Kilogramo
L	Litro
LMP	Límite máximo permisible
LMR	Límite máximo recomendado
LmR	Límite mínimo recomendado
Mn	Manganeso
mg	Miligramo
µg	Microgramo
mL	Mililitro

Ni	Níquel
N-NO₃⁻	Nitratos
N-NO₂	Nitritos
N-NH₄⁺	Nitrógeno amoniacal
NT	Nitrógeno total
ND	No determinado
NMX	Norma mexicana
OD	Oxígeno disuelto
Pb	Plomo
pH	Potencial de hidrógeno
L1	Punto 1 de muestreo en la Laguna de Chimaliapan
L2	Punto 2 de muestreo en la Laguna de Chimaliapan
L3	Punto 3 de muestreo en la Laguna de Chimaliapan
uma	Unidad de masa atómica
Tl	Talio
T	Temperatura
Ti	Titanio
UAEM	Universidad Autónoma del Estado de México
V	Vanadio
Vr	Valores recomendados
Zn	Zinc

INTRODUCCIÓN

La conservación y manejo sustentable de los humedales pueden asegurar la riqueza biológica y los servicios ambientales que éstos prestan, tales como: almacenamiento del agua; conservación de los acuíferos, purificación del agua mediante la retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes; protección contra tormentas y mitigación de inundaciones; estabilización de litorales y control de la erosión. Estos ecosistemas han sufrido procesos de transformación con diversos fines. Su desconocimiento y manejo inadecuado constituyen algunos de los problemas principales que atentan contra su conservación (CONAGUA, 2014).

Las Ciénegas de Lerma o Lagunas de Chignahuapan, Chimaliapan y Chiconahuapan son consideradas Área Natural Protegida con el carácter de protección de flora y fauna desde el año 2002 y humedales registrados como sitios Ramsar en el año 2004. La Laguna de Chimaliapan es la más extensa de las Ciénegas, de donde se extrae una gran variedad de flora y fauna que se emplea para la alimentación de las poblaciones aledañas (Viesca *et al.*, 2011; CONANP, 2012; Zepeda *et al.*, 2012).

Sin embargo, en estudios recientes se han reportado cuatro puntos de descargas de agua residual doméstica e industrial alrededor de la Laguna de Chimaliapan, en dichos estudios se determinó la presencia de metales pesados: Mn, Ti, Fe, Cu, Ni, Zn, Pb, Br, Rb y Sr en las descargas; lo que puede afectar la calidad del agua, a la biodiversidad y los servicios que se obtienen de la Laguna (Granados *et al.*, 2014).

Se ha observado la presencia de vegetación acuática flotante en las descargas y dentro de la Laguna de Chimaliapan, por lo que éste trabajo tiene como objetivo determinar las concentraciones de metales pesados en el agua y en dicha vegetación, así como evaluar algunos parámetros fisicoquímicos que influyen en la biodisponibilidad de los metales.

1. FUNDAMENTOS

1.1 Ciénegas de Lerma

Las Ciénegas de Lerma o de Chiconahuapan, Chimaliapan y Chignahuapan (Figura 1.1), son humedales con alta diversidad biológica en México que han sido reconocidos internacionalmente como sitios de protección Ramsar, son consideradas entre los 150 sitios más importantes para la conservación a nivel del continente americano y nacionalmente están catalogadas como Área Natural Protegida con el carácter de protección de flora y fauna (CCA, 1999; DOF, 2002).

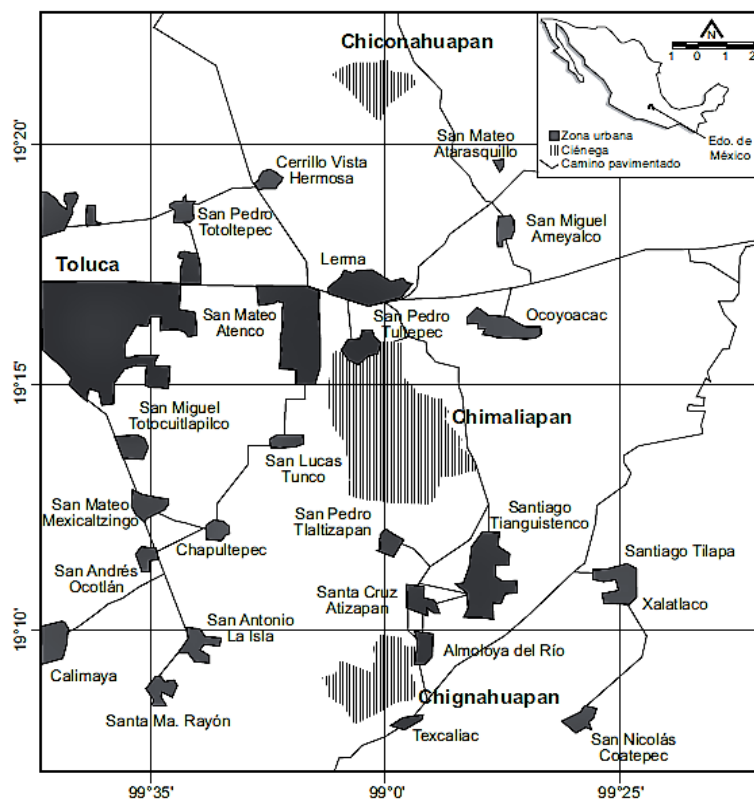


Figura 1.1 Localización de las Ciénegas de Lerma (Zepeda *et al.*, 2012).

La importancia de su conservación radica en que las Ciénegas mantienen una alta biodiversidad que incluye decenas de especies endémicas y en riesgo de extinción, muchas de las cuales son exclusivas de esta área. Las Ciénegas presentan diferentes tipos hábitats, incluyendo zonas de aguas profundas (hasta 5 metros),

zonas con vegetación flotante o emergida, zonas de vegetación inundada y zonas de vegetación en las riberas; los cuales favorecen el anidamiento de aves locales y migratorias (Ceballos, 2003; Abarca, 2007).

Las Ciénegas evitan inundaciones en los poblados aledaños y proveen esparcimiento e ingresos económicos a sus habitantes. Se consideran fundamentales para el ciclo hidrológico ya que recargan los acuíferos y mantienen la explotación actual de los mantos freáticos, de donde se extrae una gran cantidad de agua para abastecer a la Ciudad de México y algunas zonas el Valle de Toluca (Ceballos, 2003).

1.2 Contaminación en la Laguna de Chimaliapan, Estado de México

El fenómeno de la contaminación del agua ha acompañado al hombre en toda su historia, sin embargo, ha sido progresivo y agravado desde el inicio de la revolución industrial. La implantación de procesos de transformación que emplean grandes volúmenes de agua, genera a su vez altas cantidades de desechos que llegan a contaminar los ríos, lagos y Lagunas donde se vierten. Actualmente, se dice que el agua está contaminada cuando contiene microorganismos, productos químicos y residuos industriales o domésticos que alteran sus características (SEMARNAT, 2015).

La Laguna de Chimaliapan es la más grande de las tres Ciénegas de Lerma, con una extensión de 2081 ha, está comprendida entre los 19°13' - 19°16' latitud norte y 99°29' - 99°31' longitud oeste, a 2560 msnm y ocupa parte de los municipios de Capulhuac, Santiago Tianguistenco, San Mateo Atenco, Metepec, Lerma, Ocoyoacac y Mexicaltzingo (DOF, 2002; Zepeda *et al.*, 2012; Ledezma, 2013).

Existen diferentes estudios acerca de las amenazas a la protección de las Ciénegas de Lerma, en particular se ha reportado que la Laguna de Chimaliapan presenta un

grave problema respecto a desechos líquidos y sólidos, tanto municipales como industriales donde se identifican dos tipos de canalizaciones: a) los desechos líquidos provenientes de Ocoyoacac y Cholula son descargados a surcos en la tierra a cielo abierto. Estos surcos forman parte de una red precaria de zanjas, que llevan consigo desechos líquidos de alta toxicidad a la Laguna; b) se trata de una sola zanja que va captando aguas industriales o de servicios públicos por medio de pequeños tubos, cabe notar que no tienen ningún tipo de impermeabilización y provienen del municipio de Lerma. En la Tabla 1.1 se presenta un análisis de amenazas en la Laguna de Chimaliapan (Corona *et al.*, 2005).

Tabla 1.1 Análisis de amenazas en la Laguna de Chimaliapan

Amenazas	Nivel
Descargas industriales	Muy alto
Descargas domésticas	Muy alto
Crecimiento demográfico	Alto
Dragado	Alto
Especies exóticas	Alto
Especies invasoras	Alto
Prácticas de producción agrícola	Alto
Conversión a áreas productivas (agricultura, ganadería, pesca)	Muy alto

En un estudio posterior, Zepeda *et al.* (2012a) mencionan que desde los años 1973 a 1989 la destrucción de los humedales de las Ciénegas de Lerma, tuvieron un intenso ritmo de destrucción debido a la expansión de áreas agrícolas y urbanas que desplazó las áreas inundables, causando efectos negativos sobre la diversidad y estructura de la vegetación acuática de las Ciénegas.

A pesar de que las Ciénegas de Lerma son zonas protegidas y de que se han prohibido actividades que impliquen un impacto significativo sin la autorización correspondiente, existe la necesidad de tomar acciones como la regulación del desarrollo industrial, el tratamiento de aguas residuales y el monitoreo continuo de

las condiciones de la Laguna para la conservación de su biodiversidad (DOF, 2002; Ledezma, 2013).

En el municipio de Ocoyoacac, el DENUÉ reporta en la zona 73 industrias manufactureras, 290 establecimientos de comercio al por menor, 13 de comercio al por mayor y un área de agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza. De esta localidad se identificó una descarga de agua residual no regulada (D1) que llega a la Laguna de Chimaliapan (INEGI, 2016).

En la localidad de San Pedro Tultepec, municipio de Lerma, durante varias décadas la actividad económica más importante fue la elaboración de artesanías de tule y la alimentación de la población estaba basada en la flora y fauna obtenida de la Laguna, esto ha disminuido a través del tiempo (Viesca *et al.*, 2011). Actualmente, la fabricación y el comercio de muebles de madera son las principales actividades económicas. De acuerdo con el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUÉ), en la región existen 394 industrias manufactureras, 660 establecimientos de comercio al por menor y 44 de comercio al por mayor, entre otros (INEGI, 2016). En esta localidad se identificaron tres descargas de agua residual no reguladas (D2, D3 y D4), que se conectan a la Laguna de Chimaliapan.

Las actividades antropogénicas que se llevan a cabo alrededor de la Laguna de Chimaliapan, aunadas a la falta de saneamiento y medidas adecuadas de gestión ambiental, podrían hacer que se reduzca su capacidad de autodepuración y su biodiversidad (Ledezma, 2013).

1.3 Contaminación del agua por metales pesados

Los metales pesados son elementos con elevados pesos atómicos, superiores a 44,956 uma y una densidad superior a 5 g/cm^3 , excluyendo a los grupos alcalino y alcalinotérreo. A pesar de que algunos son imprescindibles para el desarrollo de las funciones vitales de los organismos como cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, vanadio y estroncio; en cantidades excesivas son perjudiciales e incluso letales para los seres vivos. Estos metales pueden encontrarse en concentraciones traza en el agua de manera natural por el desgaste de suelos y rocas. En las aguas superficiales existen en forma de: hidróxidos, óxidos, silicatos, sulfuros; adsorbidos en minerales del grupo de las arcillas, sílice y materia orgánica; o en fase disuelta. Y han aumentado su concentración debido al aporte antropogénico derivado de las descargas de agua residual de actividades domésticas, agrícolas, mineras, industrias manufactureras, galvanoplastia y corrosión de materiales metálicos (Ochieng *et al.*, 2007; López *et al.*, 2013).

En México, ciertas zonas de los ríos Lerma y Santiago, Pánuco, Balsas y el Río Tijuana son ejemplos de cuerpos de agua que tienen serios problemas de calidad ambiental debido a que han sido convertidos en grandes canales de desagüe (SEMARNAT, 2015).

Estudios relacionados con el Río Lerma, específicamente el Curso Alto del Río Lerma (CARL), mencionan que existen zonas de alerta por la alta contribución y/o acumulación de metales pesados como Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb, donde las concentraciones están reguladas por distintos factores, entre ellos: variaciones de los caudales en el río, arrastres de suelos aledaños y sedimentos de los ríos tributarios, así como aportes de origen antropogénico (Zarazúa, 2008).

En el caso de las descargas a la Laguna de Chimaliapan, un análisis de metales pesados del año 2014, mostró altas concentraciones de Mn y Ti en los sedimentos, seguidos por Fe, Cu, Zn, Br, Rb y Sr; mientras que el agua contenía Mn, Fe, Cu, Zn, Br, Rb y Sr en las cuatro descargas (Granados *et al.*, 2014).

Por otra parte se han detectado en los sedimentos de la Laguna de Chimaliapan la presencia de elementos como: Al, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Tl, V y Zn, (Aburto *et al.*, 2015). Sin embargo, no se han realizado estudios que relacionen la presencia de metales pesados con los organismos que se desarrollan en las descargas y en la Laguna.

1.4 Parámetros fisicoquímicos del agua

Los parámetros fisicoquímicos muestran que la relación con los metales pesados en altas concentraciones se asocia con la baja concentración de oxígeno en el agua, su solubilidad en las aguas superficiales está controlada por el pH, la temperatura, el tipo de ligantes en los que se encuentran adsorbidos, el estado de oxidación de las fases minerales y el ambiente redox del sistema (Connell *et al.*, 1984).

La química del agua controla la tasa de adsorción/desorción de los metales, la desorción suele producirse debido a los siguientes cambios: a) aumento de la salinidad: se produce una competitividad entre los metales y los cationes por rellenar huecos; b) disminución del potencial redox: normalmente en condiciones deficientes de oxígeno; c) disminución del pH: se produce un incremento de la competitividad entre los metales y los iones de hidrógeno por rellenar huecos, además de producirse una disolución de los complejos metal-carbonato, liberando los iones del metal en el agua. Una inversión de estas condiciones favorece la adsorción de metales por los minerales del acuífero (López *et al.*, 2013).

Además de influir en la disponibilidad de metales pesados, estos factores son importantes en la bioacumulación de metales en los organismos que habitan los cuerpos de agua, en especial la vegetación (Brekken y Steinnes, 2004).

La calidad del agua depende en gran parte de los usos que se le da previamente, por estas razones es posible realizar estudios de intereses específicos (SEMARNAT, 2015; SEMARNAT, 2016). En este trabajo de investigación se analizaron parámetros fisicoquímicos del agua en las descargas y en la Laguna de Chimaliapan descritos en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Importancia
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 (DBO ₅) NMX-AA-028-SCFI-2001	Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días.
Demanda Química de Oxígeno (DQO) NMX-AA-030-SCFI-2001	Se entiende por demanda química de oxígeno, la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte.
Nitritos (N-NO ₂) NMX-AA-099-SCFI-2006	Puede estar presente en el agua como resultado de la descomposición biológica de materiales protéicos.
Nitratos (N-NO ₃ ⁻) NMX-AA-082-1986	El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie. Es un nutriente esencial para muchos autótrofos fotosintéticos, y en algunos casos ha sido identificado como el determinante del crecimiento de estos.
Nitrógeno Total (NT) y Nitrógeno amoniacal (N-NH ₄ ⁺) NMX-AA-026-SCFI-2010	Los compuestos nitrogenados se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza. Las fuentes de nitrógeno incluyen además de la degradación natural de la materia orgánica, fertilizantes, productos de limpieza y tratamiento de aguas potables. Debido a que el nitrógeno es un nutriente esencial para organismos fotosintéticos, es importante el monitoreo y control de descargas del mismo al ambiente.
Fósforo Total (PT) NMX-AA-029-SCFI-2001	El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Estos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc. El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas.

1.5 Vegetación acuática en las descargas y de la Laguna de Chimaliapan

Frecuentemente las plantas en las comunidades acuáticas tienen una tolerancia limitada con respecto a los factores ambientales y sólo se desarrollan si se presentan las condiciones indispensables para su existencia, dentro de un determinado intervalo de temperatura, luminosidad, pH, salinidad, concentración de oxígeno, etc. La vegetación acuática flotante habita aguas dulces y moderadamente salobres, prefiriendo sitios con corrientes lentas o agua estancada, este tipo de vegetación tiene la facultad de reproducirse vegetativamente y puede encontrarse en comunidades puras, o bien en asociaciones con otras especies. A menudo las especies de la familia Lemnaceae llegan a cubrir grandes extensiones de área y se propagan en sitios con disturbios antropogénicos. Otras especies que fácilmente se propagan en estos sitios son las pertenecientes al género *Eichhornia*. No obstante existen especies que tienen menores rangos de tolerancia (Rzedowski, 2006).

En el año 2008, la Laguna de Chimaliapan ocupaba el segundo lugar en diversidad y menor uniformidad vegetal de las Ciénegas de Lerma y se hacía la referencia a que las diferentes asociaciones fisionómicas y florísticas están determinadas por su nivel de inundación y nivel de eutroficación (Zepeda *et al.*, 2012b).

Dentro de las especies que comúnmente encuentran en la Laguna de Chimaliapan están: *Arenaria paludicola*, *Bidens aurea*, *Eichhornia crassipes*, *Hydrocotyle ranunculoides* y *Myriophyllum heterophyllum*. Además se ha notado la presencia de *Hydrocotyle ranunculoides* y *Lemna gibba* en las descargas de agua residual. A continuación se describe cada una de estas especies:

a) *Arenaria paludicola*

Es una planta dicotiledónea, herbácea perenne que florece de Mayo a Agosto. Las flores son pequeñas, blancas y solitarias, con hojas lanceoladas opuestas y una vena media. Es una especie costera que se presenta en zonas de humedales. Se ha documentado su presencia en aguas estancadas y corrientes, con sustratos orgánicos ácidos y salinos con alto contenido orgánico. Es una especie catalogada en peligro de extinción en sitios como California, de donde es originaria, su presencia en México podría estar relacionada a la dispersión por aves migratorias (ECOS, 2016).

Ha sido estudiada su reintroducción en las zonas donde se encuentra amenazada y se reporta que esta especie tolera amplios rangos de salinidad, lo que sugiere que tanto la especie como su vegetación asociada tienen mecanismos de regulación osmótica en común (Bontrager *et al.*, 2014). No se ha documentado su tolerancia a contaminación por metales pesados.

b) *Bidens aurea*

Es una especie originaria de Centroamérica, es una planta herbácea perenne con rizomas largos, que florece de agosto a noviembre. Habita a la orilla de arroyos, canales y pastizales con humedad temporal. Se utiliza ampliamente como forraje para animales domésticos. De España se reporta el uso como té medicinal y como ornamental (CONABIO, 2009). No se ha documentado su tolerancia a contaminación por metales pesados.

c) *Eichhornia crassipes*

Comúnmente conocida como lirio acuático, es una planta acuática flotante no enraizada, herbácea, perenne muy común en ambientes de climas tropicales y templados, llega a considerarse como planta invasiva. Se distingue muy fácilmente de otras plantas por poseer hojas relucientes con peciolo hinchado y visibles flores lilas-azuladas, llega a medir hasta 50 cm de altura. Su reproducción es generalmente vegetativa, lo que facilita su distribución e invasión a los ecosistemas acuáticos (Curt, 2015).

Se utiliza como planta ornamental acuática para estanques y acuarios. Una vez introducida se dispersa con ayuda del agua y las aves, llegando a competir fuertemente con la flora autóctona (MAAyMA, 2013b).

Dhir (2013) menciona que el manejo de esta planta en un tema de interés en todo el mundo, debido a su alta tasa de reproducción, de crecimiento y su uso potencial como: a) Agente en fitorremediación, b) Biosorbente de metales tóxicos, c) Recurso para la producción de energía y producción de biogás, d) Composta, e) Forraje para animales y alimento de peces, f) Se usa su pulpa como material en la producción de papel, g) Producción de tableros de fibra, material de cubierta de bajo costo, cubiertas, h) Formulación de medicamentos.

d) *Hydrocotyle ranunculoides*

Es una especie vegetal acuática perenne, totalmente glabra, estolonífera. Se considera maleza en algunas regiones de Estados Unidos y países del norte de Europa donde una vez introducida, se dispersa rápidamente en un amplio rango de condiciones ambientales (Hussner *et al.*, 2012).

Se desarrolla en aguas estancadas y eutrofizadas, generalmente, con altas concentraciones de nitratos y fosfatos y/o materia orgánica. El alto contenido de fertilizantes en los cuerpos de agua favorece el establecimiento de esta especie que produce la reducción del oxígeno disuelto lo que puede ocasionar la mortalidad de los peces y afectar la vida de los invertebrados (MAAyMA, 2013c).

Se ha reportado que debido a su gran crecimiento y sus propiedades para bioacumular nutrientes, ha sido usada en el tratamiento de agua. Valdivia (2011) encontró que *Hydrocotyle ranunculoides* tiene la capacidad de hiperacumular Fe, Mn, Zn, Cu, Pb y Cr. Sin embargo, se ha reportado que cuando llega a cuerpos de aguas naturales la riqueza de especies nativas puede verse reducida en más del 50 % y las plantas sumergidas incluso llegan a desaparecer debido a que las partes flotantes impiden que la luz penetre y pueda usarse en la fotosíntesis (Hussner *et al.*, 2012).

e) *Lemna gibba*

Es una pequeña planta acuática que presentan las hojas que flotan sobre el agua las cuales miden de 3.5 a 6 mm, poseen una larga raíz sumergida bajo el agua y habita aguas estancadas ricas en nutrientes (Landolt, 1980).

Se reproducen asexualmente por lo que su cultivo en laboratorio lo hace una buena opción para las investigaciones ecotoxicológicas y poseen características únicas que las hacen ideales para la fitorremediación, tales como: a) crecimiento y multiplicación acelerados, b) alto potencial de bioacumulación, c) capacidad de transformar o degradar contaminantes, d) regulan la especiación química, e) capacidad de tratar contaminantes orgánicos e inorgánicos, f) algunas especies han sido comercialmente explotadas para recuperar metales de importancia económica como oro y plata de aguas residuales de minería (Dhir, 2013).

Lemna gibba ha sido probada como una especie con gran capacidad de bioacumular Al (hasta 500 $\mu\text{g Al}\cdot\text{g}^{-1}$ en un día, la capacidad de retención del Al va disminuyendo conforme aumenta la saturación del metal en la planta), por lo que se considera en el tratamiento de aguas residuales secundarias o municipales (Obek y Sasmaz, 2011).

f) *Myriophyllum heterophyllum*

Es una planta perenne que habita ecosistemas acuáticos, posee un estolón sumergido y hojas heterofilas, es considerada una especie, aunque también es usada como planta ornamental en jardines acuáticos (CEH, 2004 y 2011). Comúnmente habita lagos, estanques, corrientes, canales y se establece en ambientes con alto contenido de nutrimentos, existen estudios que reportan a éste género como indicador de contaminación por plaguicidas, entre ellos fungicidas, herbicidas e insecticidas (Turgut, 2012). No se ha documentado su tolerancia a contaminación por metales pesados.

1.6 Bioacumulación e hiperacumulación de metales pesados en vegetación acuática

Este trabajo tuvo como objetivos analizar parámetros fisicoquímicos y la presencia de metales pesados en el agua de las descargas y de la Laguna de Chimaliapan, así como determinar la bioacumulación de metales pesados en la vegetación acuática.

Las primeras investigaciones que buscaban relacionar la concentración de metales pesados en las plantas y el sustrato donde se desarrollaban (agua, suelo o sedimento), mostraban que en condiciones naturales no existían correlaciones significativas. Sin embargo, en condiciones de cultivo en laboratorio, sí se

presentaban correlaciones directas, esto demostró de que las condiciones *in situ* modifican la biodisponibilidad de dichos metales. Las plantas que mantienen esta correlación tanto *in situ* como en condiciones de laboratorio han sido ampliamente estudiadas y utilizadas como biomonitores en distintos ambientes (Maddock *et al.*, 1988).

La bioacumulación implica un aumento en la concentración de sustancias químicas en un organismo durante un cierto periodo de tiempo, comparada con la concentración de dicho producto en el ambiente. Es importante considerar que algunos procesos, como los biogeoquímicos, están relacionados con la movilidad de los elementos que son absorbidos por las plantas, los cuales vuelven a integrarse al ciclo por la descomposición de las raíces y partes aéreas (Carpena y Pilar, 2007; Prieto *et al.*, 2009; López *et al.*, 2013).

La toxicidad de los metales pesados está causada frecuentemente por la imposibilidad de los organismos para mantener los niveles necesarios de excreción. El proceso denominado biomagnificación ocurre durante el paso por las distintas cadenas tróficas, debido a que los niveles de incorporación sufren un fuerte incremento a lo largo de los eslabones sucesivos, siendo en los superiores donde se hallan los mayores niveles de contaminantes (Navarro *et al.*, 2007).

Las especies tolerantes son aquellas que pueden crecer en ambientes con concentraciones de elementos que para otras plantas llegan a ser tóxicas. Mientras que las especies hiperacumuladoras e indicadoras además de ser tolerantes, han demostrado tener distinciones en los mecanismos genéticos involucrados. Por lo tanto, las especies tolerantes no son necesariamente indicadoras o hiperacumuladoras (Peer *et al.*, 2005).

Las plantas hiperacumuladoras absorben, en particular, grandes cantidades de sustancias tóxicas, usualmente de un metal o metaloide. Para lo que Brooks y Baker (1989) definieron que son aquellas que acumulan concentraciones mayores a 1000

$\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco de níquel, cobre, cobalto y plomo; $100 \mu\text{g g}^{-1}$ en peso seco de cadmio; y $10,000 \mu\text{g g}^{-1}$ en peso seco para Zn y Mn.

Existen especies vegetales que acumulan simultáneamente concentraciones elevadas de diferentes metales. Sin embargo, existe también la especificidad de bioacumulación de algún metal en particular. Dentro de los mecanismos biológicos que influyen para que los metales pesados puedan estar bajo formas móviles y biodisponibles intervienen los quelantes, que contribuyen a la desintoxicación amortiguando las concentraciones citosólicas del metal, de esta manera las chaperonas conducen los iones metálicos a los organelos y las proteínas que los requieren. Las clases principales de estos quelantes incluyen: fitoquelatinas, metalotioninas, ácidos orgánicos y aminoácidos (Juwarkar y Yadar, 2010).

Además de la desintoxicación, las fitoquelatinas juegan un papel muy importante en la homeostasis de las plantas. Por una parte, forman complejos con los metales para inactivarlos y almacenarlos en las vacuolas y por otra, transfieren los metales pesados esenciales a las nuevas apoenzimas sintetizadas que los requieren para su actividad catalítica o para las estructuras en los ácidos nucleicos (Carpena y Pilar, 2007; Juwarkar y Yadar, 2010).

Dichos procesos han sido ampliamente estudiados y considerados para la fitorremediación, donde en primera instancia se evalúa el coeficiente de traslocación, el cual mide la capacidad de la planta para trasladar los metales de la raíz al tallo y hojas, sin tomar en cuenta la concentración de los metales externos. Mientras que el coeficiente de bioacumulación mide la capacidad de la planta para acumular metales del medio (Baker y Brooks, 1989).

1.7 Determinación de los factores de bioacumulación y traslocación de metales

El factor de acumulación se obtuvo al dividir la concentración del metal presente en las estructuras de las plantas y la concentración del metal en el medio, de acuerdo con la ecuación:

$$FBA = \frac{A}{B}$$

Donde:

A= concentración del metal en las plantas $\frac{mg}{Kg}$

B= concentración del metal en el medio $\frac{mg}{L}$

La traslocación de metales se obtuvo al dividir la concentración del metal en las estructuras aéreas de la planta entre la concentración del metal en las estructuras sumergidas de acuerdo con la ecuación:

$$FT = \frac{EA}{ES}$$

Donde:

EA= concentración del metal en las estructuras aéreas $\frac{mg}{Kg}$

ES= concentración del metal en las estructuras sumergidas $\frac{mg}{Kg}$

Existen diferentes criterios para considerar si una planta acuática es acumuladora de metales; en el presente trabajo se considerará que una planta acuática puede ser hiperacumuladora si el FBA es ≥ 1000 . Para interpretar los valores obtenidos del FT se tomará como base el criterio de la Tabla 1.3 (Valdivia, 2011).

Tabla 1.3 Criterio para el factor de translocación.

≥ 1	Muy Alta
$< 1 \geq 0.5$	Alta - Media
$< 0.5 \geq 0.2$	Media - Baja
< 0.2	Baja o Nula

1.8 Metales pesados en cuerpos de agua

A continuación se describen los metales pesados que fueron analizados para la realización de este estudio.

a) Cromo (Cr)

Bajo condiciones naturales la atmósfera, el suelo y el agua contienen concentraciones traza de cromo. El cromo hexavalente generalmente existe en forma de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ y CrO_4^{2-} que es altamente móvil, soluble en agua y tóxico en los organismos vivos. Debido a su alta solubilidad, el cromo hexavalente entra fácilmente a las células y produce especies reactivas al oxígeno, que resultan en serios daños oxidativos a los constituyentes de las células. Los efectos principales del cromo hexavalente en humanos son la dermatitis y reacciones graves en pulmones y septos nasales. El cromo es usado en numerosos procesos industriales y actividades antropogénicas, incluyendo el tratamiento de pieles, producción de pigmentos, refinerías, metalurgia, fotografía, imprenta, fertilizantes, entre otros (Nagajyoti *et al.*, 2010; Zhon *et al.*, 2016).

b) Manganeso (Mn)

El manganeso es un micronutriente esencial para los organismos y juega un rol importante en diferentes funciones metabólicas, actividades enzimáticas, sitios receptores, función hormonal y transporte de proteínas en concentraciones específicas (Khan *et al.*, 2005). Sin embargo, si es absorbido en altas concentraciones por las plantas puede inhibir la actividad fotosintética. Las actividades antropogénicas que desechan manganeso de sus procesos son: la minería, el uso de fertilizantes y la producción de cloruros alcalinos (Nagajyoti *et al.*, 2010).

c) Hierro (Fe)

El hierro es un elemento esencial para las plantas en muchos procesos biológicos como la fotosíntesis, el desarrollo de los cloroplastos y la biosíntesis de clorofila. El exceso de hierro en plantas genera rompimiento de las membranas y daños en las proteínas de ADN (Nagajyoti *et al.*, 2010).

Los residuos de hierro pueden ser derivados de actividades como la industria química, colorantes y pigmentos, tratamiento de pieles, industria farmacéutica, textil, por el uso de fertilizantes, producción de cloruros alcalinos, refinería petrolera, entre otros (Nagajyoti *et al.*, 2010).

d) Níquel (Ni)

El níquel es liberado al aire por las plantas de energía y los incineradores de basura. Este se deposita en el suelo o cae en las gotas de lluvia, el níquel puede estar presente también en descargas de aguas residuales, llegando a ser móvil en

condiciones ácidas. Las altas concentraciones de níquel en las aguas superficiales pueden disminuir el crecimiento de algas (Marín y Pérez, 2013).

Entre las actividades antropogénicas que desechan níquel de sus procesos están la industria química, la producción de tintas y pinturas, la fotografía, la industria textil, el uso de fertilizantes y la refinería petrolera (Nagajyoti *et al.*, 2010).

e) Cobre (Cu)

El cobre puede ser liberado al ambiente tanto por actividades antropogénicas como por procesos naturales. Ejemplo de fuentes naturales son: las tormentas de polvo, la descomposición de la vegetación, los incendios forestales; mientras que los ejemplos por actividades humanas son: la minería, la producción de fertilizantes fosfatados, la industria química, uso de colorantes y pigmentos, tratamiento de pieles, industria farmacéutica, industria textil, entre otros (Nagajyoti *et al.*, 2010; Marín y Pérez, 2013).

El cobre es considerado un micronutriente para las plantas y es importante en la asimilación del CO₂ y la síntesis de ATP, pero a concentraciones muy elevadas puede causar daños celulares y estrés oxidativo que altera las rutas metabólicas y daña las macromoléculas afectando el crecimiento de las plantas (Nagajyoti *et al.*, 2010).

f) Zinc (Zn)

El zinc existe de forma natural en el aire, el suelo y el agua, no se considera un elemento peligroso ya que forma parte de la dieta en seres humanos y otros organismos e interviene en distintos procesos metabólicos. Las actividades humanas han hecho que las concentraciones de zinc se incrementen en los

ambientes naturales; entre ellas se pueden mencionar: la industria química, minería, producción de acero, la imprenta, el tratamiento de pieles, uso de fertilizantes, combustión de carbón, producción de cloruros alcalinos y la refinería petrolera (Nagajyoti *et al.*, 2010; Marín y Pérez, 2013; Lenntech, 2016).

En las plantas la toxicidad generada por altas concentraciones de zinc se reflejan en el decremento del crecimiento y desarrollo, inducción de daño oxidativo y alteración en la eficiencia de enzimas catalíticas (Nagajyoti *et al.*, 2010).

g) Plomo (Pb)

El plomo y sus compuestos, son generalmente contaminantes tóxicos. En los humanos los síntomas por la exposición al plomo incluyen cólicos, pigmentación de la piel y parálisis. En las plantas, existen efectos negativos en la morfología, el crecimiento y los procesos fotosintéticos, además de inhibir la germinación e algunas especies (Nagajyoti *et al.*, 2010; Marín y Pérez, 2013).

El plomo que se desecha de las actividades antropogénicas tiene origen de procesos y operaciones mineras, la industria química, colorantes y pigmentos, fotografía y refinería petrolera (Nagajyoti *et al.*, 2010).

En la Laguna de Chimaliapan, si bien la cacería de aves acuáticas está reglamentada por el calendario cinegético, existe una cacería furtiva de las cuales se generan residuos de municiones de plomo, que quedan enterradas en el fondo de ella (Ceballos, 2003).

2. MÉTODO

La evaluación de la bioacumulación de metales pesados en la Laguna de Chimaliapan, Estado de México se llevó a cabo de acuerdo al diagrama de la Figura 2.1.

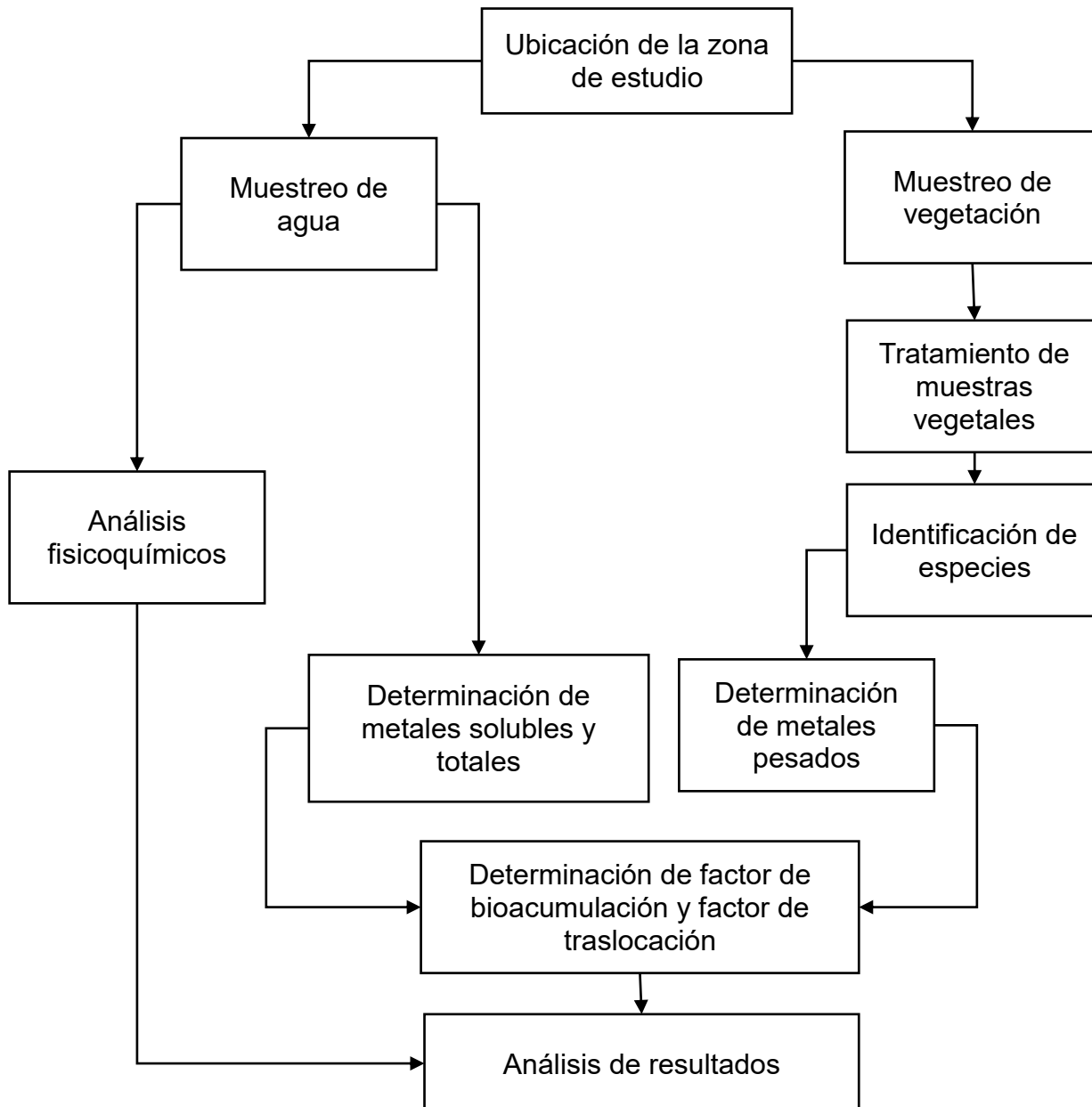


Figura 2.1 Diagrama del desarrollo experimental de la investigación

2.1 Ubicación de la zona de estudio

Para este estudio se tomó como criterio de muestreo la presencia de vegetación acuática flotante en las descargas y dentro de la Laguna de Chimaliapan. Los muestreos se realizaron durante la temporada de estiaje en los meses de marzo y abril, se ha observado en visitas previas que en temporada de lluvias no cambia la vegetación. En la Figura 2.2 se presenta un mapa del área de estudio y en la Tabla 2.1 se muestran las coordenadas de cada punto de muestreo y su identificación.

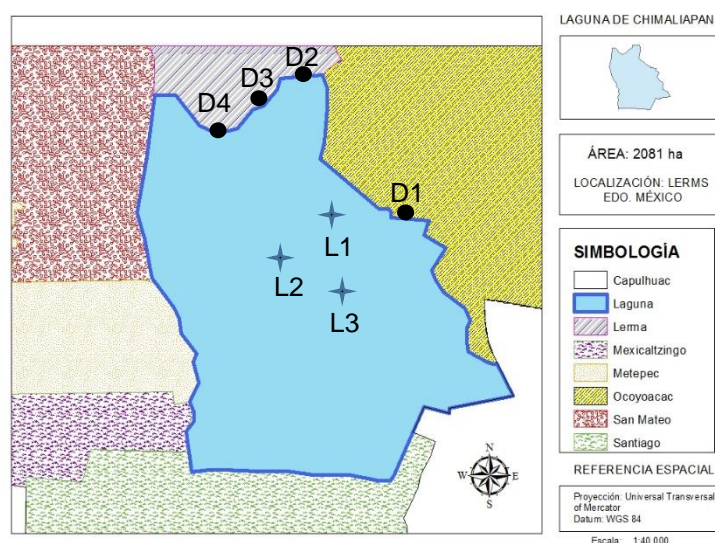


Figura 2.2 Mapa de la zona de estudio y puntos de muestreo

Tabla 2.1 Ubicación e identificación de los puntos de muestreo

Puntos de muestreo	Identificación	Latitud Norte	Longitud Oeste
Descarga 1	D1	19° 14' 52.2" N	99° 29' 11.7" W
Descarga 2	D2	19° 15' 58.8" N	99° 30' 5.5" W
Descarga 3	D3	19° 15' 22.8" N	99° 30' 23.1" W
Descarga 4	D4	19° 15' 30.8" N	99° 30' 35.5" W
Laguna punto 1	L1	19° 14' 39" N	99° 29' 46.57" W
Laguna punto 2	L2	19° 14' 29.1" N	99° 30' 17.46" W
Laguna punto 3	L3	19° 14' 28.3" N	99° 29' 47.18" W

2.2 Metodología para el muestreo y análisis de agua

a) Muestreo de agua en las descargas

En cada una de las descargas se midieron parámetros *in situ*: temperatura, pH y conductividad eléctrica, con un equipo portátil *HACH*, también se empleó un oxímetro marca *Knick* para la medición del oxígeno disuelto y se tomaron muestras de agua se preservaron en las condiciones descritas en la Tabla 2.2 para realizar el análisis de los parámetros fisicoquímicos.

Tabla 2.2 Datos para preservación de muestras de agua

Parámetro	Volumen	Tipo de envase	Preservación	Almacenamiento
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 NMX-AA-028-SCFI-2001	1L	Envase de polietileno o vidrio	4 °C	24 h
Nitritos NMX-AA-099-SCFI-2006	-----	Envase de vidrio o polietileno	4 °C	24 h
Nitratos NMX-AA-082-1986	500mL	Envase de vidrio o polietileno	4 °C	48 h
Fósforo Total NMX-AA-029-SCFI-2001	500mL	Envase de plástico	4° C	28 días
Demanda Química de Oxígeno NMX-AA-030-SCFI-2001	-----	-----	4 ° C pH 2 con Ácido sulfúrico	28 días
Nitrógeno Total y Nitrógeno amoniacal NMX-AA-026-SCFI-2010	2L	Envase de polietileno	Ácido sulfúrico 1:1 pH de 1 o 2 4 °C en oscuridad	30 días

b) Muestreo de agua en la Laguna de Chimaliapan

El acceso a la Laguna de Chimaliapan se dificultó debido a la baja profundidad del agua y la espesa vegetación acuática presente, por lo que fue necesario hacer una brecha para poder ingresar en lancha.

Una vez dentro de la Laguna, se seleccionaron los puntos de muestreo y se hizo el registro de la geoposición de cada uno de ellos mediante un GPS, así mismo se realizó la medición de los parámetros *in situ*, se tomaron aproximadamente 7 L de agua en cada punto de muestreo y se almacenaron en recipientes etiquetados (Figura 2.3).



Figura 2.3 Entrada a la Laguna de Chimaliapan y medición de parámetros *in situ*

c) Análisis de parámetros fisicoquímicos del agua

Se realizó la determinación de parámetros fisicoquímicos de agua para las muestras de los puntos de descarga y dentro de la Laguna, siguiendo las metodologías que se mencionan en las NMX de la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Parámetros para analizar en laboratorio

Norma	Principio
Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 NMX-AA-028-SCFI-2001	El método se basa en medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C.
Determinación de nitritos NMX-AA-099-SCFI-2006	El principio del método consiste en que los nitritos presentes reaccionan en medio ácido (pH = 1,9 a 2,5), para formar ácido nitroso que reacciona con la sulfanilamida por una reacción de diazoación para formar una sal de diazonio, la cual por copulación con el diclorhidrato de N-(1-Naftil) etilendiamina forma un colorante azóico de color purpura rojizo que se mide espectrofotométricamente a 543 nm.
Determinación de nitratos NMX-AA-082-1986	La concentración de nitratos en una muestra de agua se determina midiendo la absorbancia en el ámbito de ultravioleta a 220 nm y comparándola con una curva de calibración. La relación entre absorbancia y concentración es lineal hasta una concentración de 11 µg/L. El mínimo detectable es de 0.01 µg /L.
Determinación de fósforo total NMX-AA-029-SCFI-2001	En una disolución diluida de ortofosfatos, el molibdato de amonio reacciona en condiciones ácidas con el vanadato para formar un heteropoliácido, ácido vanadomolibdofosfórico. En la presencia de vanadio, se forma ácido vanadomolibdofosfórico de color amarillo. La longitud de onda a la cual la intensidad del color es medida depende de la detección requerida. La intensidad del color amarillo es directamente proporcional a la concentración de fosfato.
Determinación de Demanda Química de Oxígeno NMX-AA-030-SCFI-2001	Una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos son oxidados con una mezcla de ácido crómico y sulfúrico a ebullición. La muestra se coloca a reflujo en una disolución de ácido fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio (K ₂ Cr ₂ O ₇). Después de la digestión, el dicromato no reducido se mide por titulación o espectrofotométricamente para determinar la cantidad de dicromato consumido y calcular la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente.
Determinación de Nitrógeno total y Nitrógeno amoniacal NMX-AA-026-SCFI-2010	Se determina mediante el método Kjendahl, el cual se divide en tres procesos básicos: - Digestión: la descomposición del nitrógeno orgánico en la muestra se logra empleando una solución ácida. El resultado final es una disolución de sulfato de amonio. - Destilación: es la adición de un exceso de álcali a la mezcla ácida de digestión para convertir el NH ₄ ⁺ en NH ₃ , seguido por la ebullición y condensación del NH ₃ gas el cual es recibido en una disolución de concentración conocida de ácido bórico. - Cuantificación: la cantidad de nitrógeno en la muestra puede ser calculada de la cantidad cuantificada de iones amoniaco (amonio) en la disolución de concentración conocida de ácido bórico.

d) Determinación de Metales por Fluorescencia de Rayos X (FRX) en agua

La fluorescencia de Rayos X es una técnica nuclear analítica que tiene la ventaja de ser multielemental, rápida y económica. El espectrómetro de rayos X S2 PICOFOX fabricado por Bruker, fue usado para obtener la concentración elemental.

Para la determinación de metales totales se tomaron 500 mL de agua de cada punto de muestreo y una parte se acidificó con ácido nítrico concentrado hasta obtener un pH < 2 para determinar metales totales. Mientras que para la determinación de metales solubles se pasaron 500 mL de agua a través de un filtro *Millipore* de 0.45 μm y se fijó con ácido nítrico concentrado hasta un pH < 2 (Zarazúa, 2008).

Las muestras de agua fueron tratadas y preservadas para su análisis de metales totales y metales solubles por FRX en el Laboratorio de Análisis Químicos del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

Análisis de metales totales: las muestras se sometieron a un proceso de digestión acelerada por microondas en un horno marca MARSX. Posteriormente se tomó una alícuota de 5 mL a la cual se le adicionaron 100 μL de una solución estándar de galio. Se agitó mecánicamente durante 1 minuto, se tomó una alícuota de 20 μL , la cual se depositó sobre un reflector de cuarzo y se secó con una lámpara de luz infrarroja para su posterior análisis por FRX en la modalidad de reflexión total. Cada muestra se preparó por triplicado. Para realizar el análisis de metales solubles, las muestras de agua filtrada por el filtro millipore de 0.45 μm , se procesaron de la misma manera que las de metales totales.

2.3 Metodología para el muestreo, tratamiento de muestras y determinación de metales pesados en la vegetación acuática flotante

El muestreo se realizó con la ayuda de un cuadrante de 50 cm² de área, el cual fue colocado sobre la vegetación acuática flotante y se recolectaron las plantas dentro del cuadrante, se repitió el procedimiento en cada punto seleccionado de la Laguna y en las descargas. Las muestras de vegetación se depositaron en bolsas de polietileno, se etiquetaron con tinta permanente y se transportaron al laboratorio.

Las plantas que fueron recolectadas se extendieron y se lavaron con agua potable hasta que se eliminaron los residuos adheridos a ellas. Cada planta se separó por especie, por punto de muestreo y se llevaron al Laboratorio de Biosorbentes donde se lavaron nuevamente con agua destilada (Figura 2.4).



Figura 2.4 Muestreo de vegetación acuática flotante mediante cuadrantes, lavado y separación por especie de muestras vegetales

Se realizó un cuarteo para obtener una muestra representativa de las especies con mayor abundancia, se seleccionó un ejemplar de cada especie para determinar su nombre científico con la ayuda de claves taxonómicas en la Facultad de Ciencias de la UAEM. Cada planta fue seccionada en estructuras sumergidas y aéreas, las estructuras se etiquetaron por especie y punto de muestreo, se extendieron y se dejaron secar a temperatura ambiente en el Laboratorio de Biosorbentes (Figura 2.5),



Figura 2.5 Plantas seccionadas en estructuras sumergidas y aéreas

Cuando las estructuras de las plantas se secaron, fueron transportadas al Laboratorio de Análisis Químicos del ININ, donde se molieron en un molino eléctrico M20 IKA-WERKE mostrado en la Figura 2.6.



Figura 2.6 Molino eléctrico M20 IKA-WERKE usado en la preparación de muestras vegetales

Las muestras se molieron en el equipo de dos a tres veces durante 30 s debido a su alto contenido de fibra. Después de la molienda cada muestra se tamizó por medio de una malla con apertura de 0.71 mm, las muestras se identificaron y almacenaron (Figura 2.7).



Figura 2.7 Tamizado y almacenamiento de muestras vegetales

Para realizar la digestión se pesaron 0.5 g de cada muestra molida y se colocaron en vasos XP/1500 a los que se les agregaron 6 mL de HNO₃ más 2 mL de HCl, la digestión se llevó a cabo en un horno de microondas MARSX bajo las siguientes condiciones: potencia de 1200 W, rampa de tiempo de 20 min, tiempo de mantenimiento de 10 min, temperatura de 135°C y presión de 180 psi, una vez que se enfriaron las muestras se les añadió 1 mL de H₂O₂, se dejaron reposar durante 2 h y se aforaron con agua ultra pura. Cada muestra aforada se identificó y se almacenó en refrigeración.

El análisis de metales pesados en la vegetación se realizó siguiendo la misma metodología que se usó para la determinación de metales pesados en agua.

3. RESULTADOS y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de la investigación realizada y la discusión de los mismos.

3.1 Resultados de análisis fisicoquímicos del agua en descargas

Se analizaron los resultados de los parámetros fisicoquímicos de las descargas teniendo como referencia los límites máximos permisibles (LMP) de descargas en aguas para la protección de vida acuática de la NOM-001-SEMARNAT 1996 (DOF, 1996). En la Tabla 3.1 se resumen los resultados obtenidos: en todos los puntos se rebasa el LMP de DBO₅ siendo D4 > D2 > D3 > D1, en cuanto al PT el LMP es rebasado en tres descargas D2 > D3 > D4.

Tabla 3.1 Resultados de los parámetros fisicoquímicos analizados en el agua de descargas

Parámetro	D1	D2	D3	D4	LMP
DBO ₅ (mg/L)	119.26	440.51	399.84	449.46	60
DQO (mg/L)	396.4	2086.05	1069.36	1074.63	-
PT (mg/L)	4.64	17.93	14.70	11.46	10
NT (mg/L)	3.66	15.20	17.46	4.8	25
NO ₂ (mg/L)	0.08	0.34	0.33	0.34	-
NO ₃ (mg/L)	22.16	24.05	18.63	24.23	-
OD (mg/L)	2.1	3.4	3.4	3.4	-
pH	6.31	6.46	5.97	6.82	-
T (°C)	17.50	20.70	18.10	16.10	40
CE (µs/cm)	747	1509	1270	1566	-

a) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en descargas

En la Figura 3.1 se muestra la DBO₅ en las descargas, la cual rebasa el LMP en todos los puntos e indican una alta contaminación de materia orgánica, siguiendo el orden D4 > D2 > D3 > D1. Haciendo una comparación con los datos obtenidos por Granados *et al.* (2014) se encontró que la DBO₅ en D2 y D3 rebasaba el LMP.

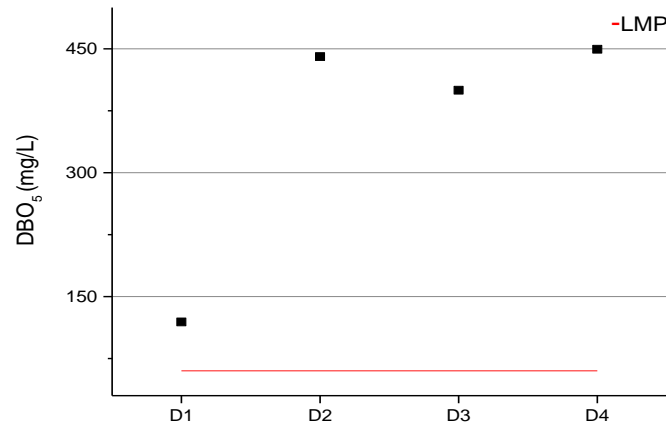


Figura 3.1 DBO₅ en Descargas

b) Demanda química de oxígeno (DQO) en descargas

Para este parámetro no existe valor de LMP establecido en la normatividad para descargas de agua residual. Sin embargo, esta demanda de oxígeno influye en la concentración de oxígeno disuelto en el agua, en la Figura 3.2 se muestra la DQO en los puntos de las descargas, que siguen el orden D2 > D4 > D3 > D1.

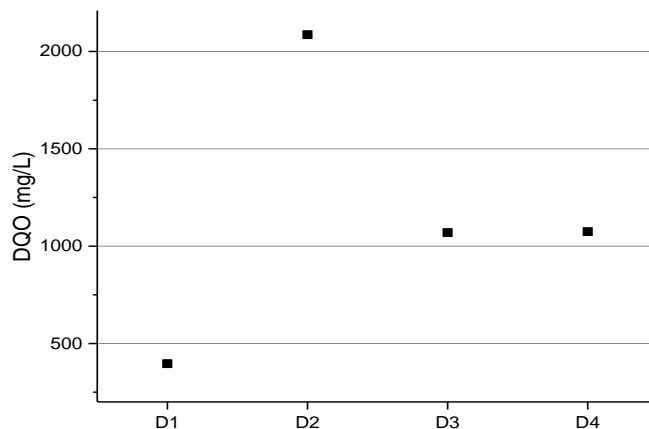


Figura 3.2 DQO en Descargas

Cada descarga tiene características específicas y es importante considerar la relación entre la DBO_5 y DQO para conocer el tipo de contaminación que presenta el agua residual. La Tabla 3.2 representa la relación DBO_5/DQO en este estudio y la reportada por Granados *et al.* (2014); si la relación de la DBO_5 total entre la DQO total es menor a 0.6 el agua presenta influencia industrial (Marín *et al.*, 2013).

Tabla 3.2 Relación DBO_5 total entre DQO total en las descargas

Descarga	Relación DBO_5/DQO	
	Estudio actual	Granados <i>et al.</i> (2014)
D1	0.71	0.21*
D2	0.62	0.42*
D3	0.65	0.37*
D4	0.29	0.30*

*Estudio actual

Se observa que en el año 2014: D1, D2 y D3 tenían valores mayores a 0.6, mientras que D4 presentaba influencia industrial; en el estudio actual se encontró que todas las descargas tienen influencia de actividades industriales.

c) Oxígeno disuelto (OD) en descargas

En la Figura 3.3 se muestra la concentración de OD en las descargas cuyos valores son bajos en todos los puntos, siendo D1 la de menor concentración. Sin embargo en el año 2014 no se detectó OD (Granados *et al.*, 2014).

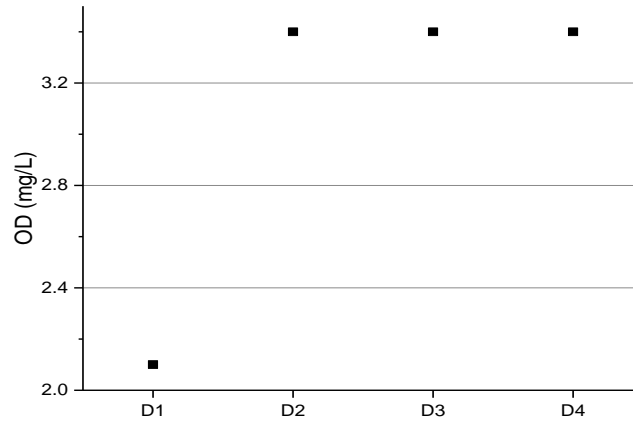


Figura 3.3 OD en Descargas

d) Fósforo total (PT) en descargas

El LMP de PT en aguas residuales es de 10 mg/L. En la Figura 3.4 se muestra la concentración de PT en los puntos de descarga que siguen el orden $D2 > D3 > D4 > D1$. El único valor que está por debajo de lo establecido como LMP es de D1, mientras que los puntos restantes rebasan dicho valor. En el año 2014 las concentraciones de PT eran mayores al LMP (Granados *et al.*, 2014).

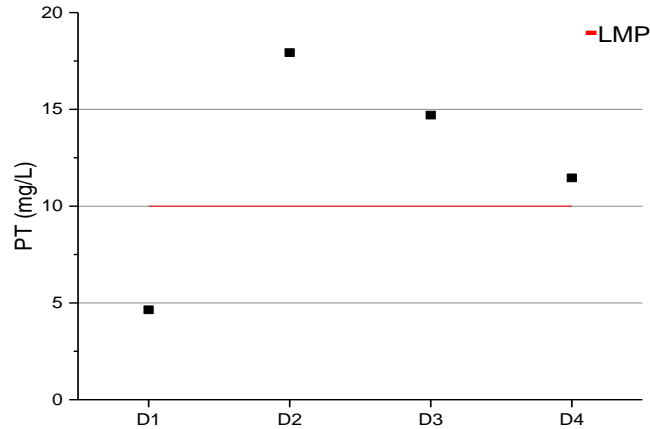


Figura 3.4 PT en Descargas

e) Nitrógeno total (NT) en descargas

Las principales rutas de ingreso de nitrógeno a los cuerpos de agua son las aguas residuales de la industria y los municipios, tanques sépticos, descargas de corrales de ganado, residuos animales (incluyendo aves y peces) y descargas de la emisión de gases de vehículos (Abarca, 2007). Debido a que el nitrógeno es un nutriente esencial para organismos fotosintéticos, es importante el monitoreo y control de descargas del mismo al ambiente. Para este parámetro se establece un LMP de 25 mg/L. Granados *et al.* (2014) reportaron que las cuatro descargas rebasaban el LMP. En la Figura 3.5 se muestra la concentración de NT de este estudio, se observa que ningún punto rebasa el LMP y siguen un orden D3 > D2 > D4 > D1.

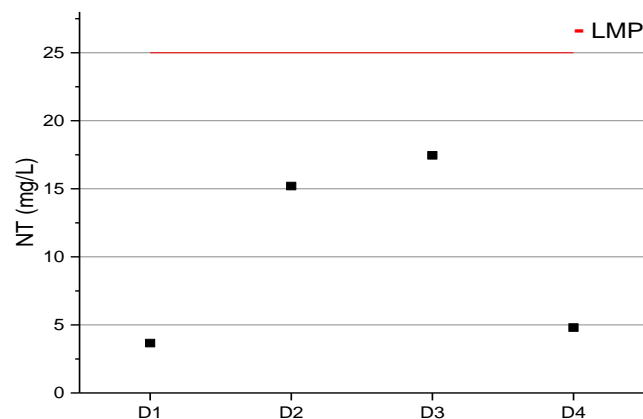


Figura 3.5 NT en Descargas

f) Nitratos (N-NO_3^-) en Descargas

En la Figura 3.6 se muestra la concentración de nitratos en los puntos de las descargas que siguen el orden $\text{D4} > \text{D2} > \text{D1} > \text{D3}$. No hay LMP para este parámetro.

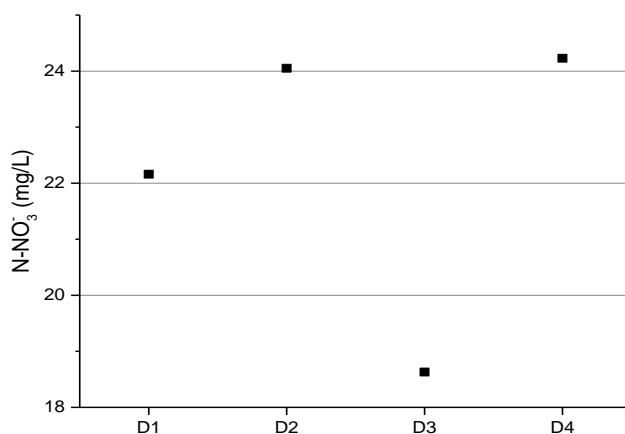


Figura 3.6 N-NO_3^- en Descargas

g) Nitritos (N-NO_2) en Descargas

Los nitritos se presentan por la oxidación biológica de las aminas y el amoníaco o por la reducción del nitrato en condiciones anaeróbicas. No existe un LMP establecido para la concentración de nitritos, la Figura 3.7 muestra la concentración de nitritos en los puntos de Descarga que siguen el orden: $\text{D4} = \text{D2} > \text{D3} > \text{D1}$.

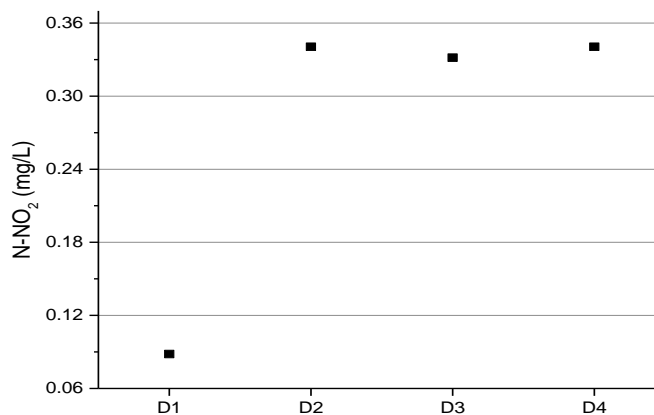


Figura 3.7 N-NO_2 en Descargas

h) Potencial de hidrógeno (pH) en descargas

El pH no es considerado en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para las descargas de agua en cuerpos para la protección de la vida acuática. En la Figura 3.8 se muestran los valores de pH obtenidos en los puntos de las descargas que siguen el orden $D4 > D2 > D1 > D3$. Anteriormente, el pH en las descargas era mayor a 7 en D1 y D4 y mayor a 8 en D2 y D3 (Granados *et al.*, 2014).

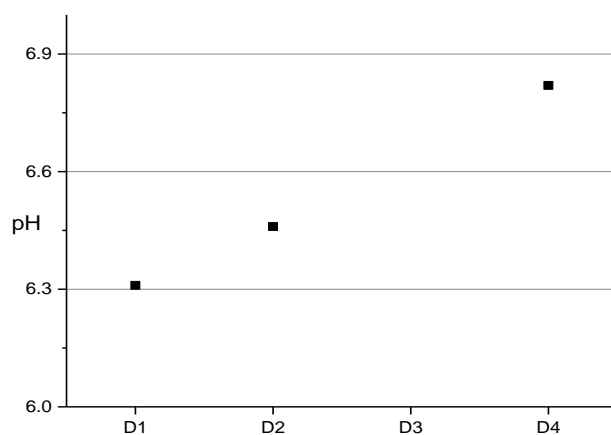


Figura 3.8 pH en Descargas

i) Temperatura (T) en Descargas

El valor del LMP de temperatura en descargas es de 40°C. La Figura 3.9 corresponde a la temperatura registrada en cada punto de descargas, en ella se observa que ningún punto de descarga rebasa el LMP para este parámetro.

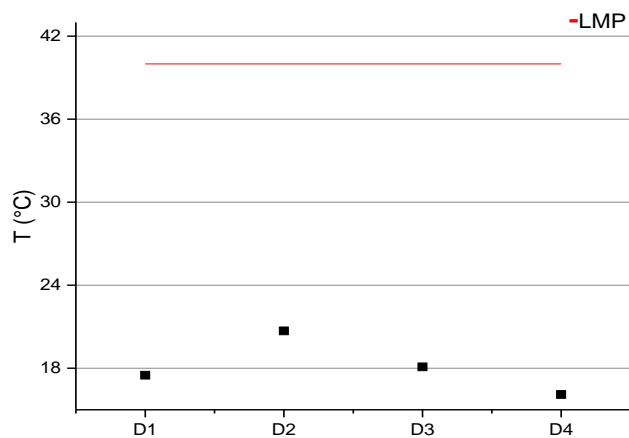


Figura 3.9 Temperatura en Descargas

j) Conductividad eléctrica (CE) en Descargas

El valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, entre los que se encuentran sales, minerales, iones y metales. Este parámetro no tiene LMP en descargas, los valores de CE en los puntos de las descargas siguen el orden $D4 > D2 > D3 > D1$ (Figura 3.10).

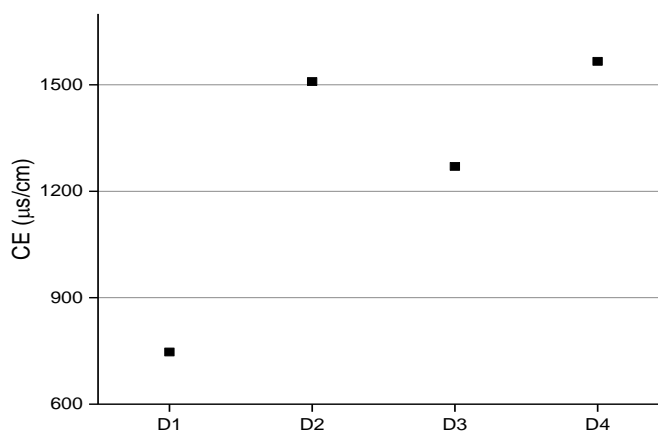


Figura 3.10 CE en Descargas

3.2 Resultados de análisis fisicoquímicos del agua en la Laguna de Chimaliapan

La Tabla 3.3 muestra los resultados de los parámetros fisicoquímicos determinados en el agua de la Laguna de Chimaliapan, los cuales fueron comparados con valores reportados por Ledezma (2014) y se tomaron como referencia los valores recomendados (VR) para la calidad del agua de uso para la protección de vida acuática de la Ley Federal de Derechos del Agua (CONAGUA, 2016).

Tabla 3.3 Parámetros fisicoquímicos del agua en la Laguna de Chimaliapan

Parámetro	L1	L2	L3	Ledezma (2014)	VR
DBO ₅ (mg/L)	22.65	29.49	23.91	18.10±2.00	-
DQO (mg/L)	81.52	55.67	35.79	97.20±57.30	-
PT (mg/L)	6.97	9.63	5.51	0.60±0.30	0.05
NT (mg/L)	2.29	0.96	1.08	-	-
NO ₂ (mg/L)	0.03	0.05	0.05	0.003±0.003	-
N-H ₄ ⁺ (mg/L)	1.93	0.18	0.37	-	0.06
OD (mg/L)	4.4	5.0	6.0	-	5
pH	7.63	8.15	8.38	6.30±0.20	6.5-8.5
T (°C)	16.10	16.65	19.30	-	CN+1.5
CE (µs/cm)	677.50	674.50	454	-	-

*CN= Condiciones naturales

a) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en la Laguna de Chimaliapan

En la Figura 3.11 se muestra la DBO₅ de los puntos muestreados en la Laguna, los cuales siguen el orden L2 > L3 > L1, no se reportan valores recomendables de este parámetro en los lineamientos de calidad del agua. Sin embargo, de acuerdo con

Abarca (2007) se encuentran en un rango aceptable ya que no rebasan los 30 mg/L, lo que significa que existen indicios de contaminación biológica y capacidad de autodepuración. El análisis de varianza mostró diferencias significativas de la concentración de DBO_5 entre de las descargas y la Laguna (Anexo 1).

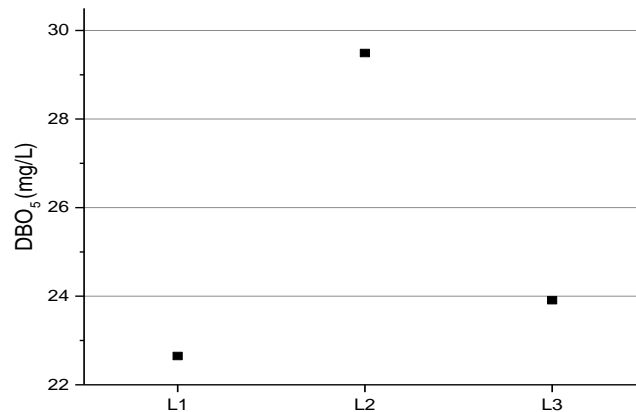


Figura 3.11 DBO_5 en la Laguna de Chimaliapan

b) Demanda química de oxígeno (DQO) en la Laguna de Chimaliapan

En la Figura 3.12 se muestra la DQO en la Laguna que sigue el orden $L1 > L2 > L3$. Para este parámetro no hay valores recomendados, pero existe una escala de clasificación de la calidad del agua con base en la DQO. De acuerdo con esta clasificación L3 se encuentra en un valor aceptable con indicios de contaminación y capacidad de autodepuración, mientras que los valores de L2 y L1 se consideran contaminados por descargas principalmente de origen municipal (Abarca, 2007; CNA, 2005). El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre las concentraciones de DQO en las descargas y la Laguna de Chimaliapan (Anexo 2).

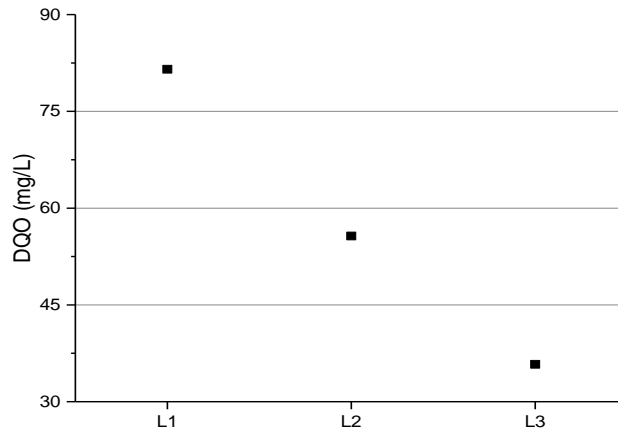


Figura 3.12 DQO en la Laguna de Chimaliapan

c) Oxígeno disuelto (OD) en la Laguna de Chimaliapan

Para los valores de OD en los puntos de la Laguna se establece que el LmR es de 5 mg/L. En la Figura 3.13 se muestra que los valores de OD siguen el orden $L1 < L2 < L3$.

El punto L1 es el más cercano a D1, que es la descarga con menor OD. El valor de L2 está en el límite para la protección de la vida acuática, ahí se encuentra una zona de pesca para los pobladores de la región, ya que comienza a haber mayor abundancia de peces. Por otra parte, L3 es el punto con mayor concentración de OD y en este punto se observó la presencia de peces y una zona de anidación para aves acuáticas.

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre las concentraciones de OD de las descargas y la Laguna de Chimaliapan (Anexo 3).

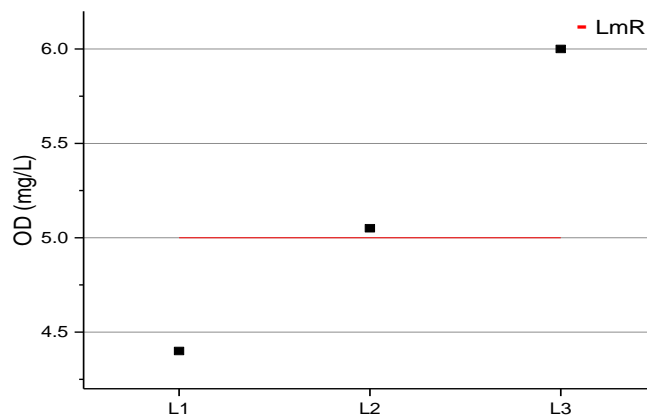


Figura 3.13 OD en la Laguna de Chimaliapan

d) Fósforo total (PT) en la Laguna de Chimaliapan

En la Figura 3.14 se muestra la concentración de PT en los puntos de la Laguna, para lo cuerpos de agua el LMR es de 0.05 mg/L, los valores reportados exceden dicho límite en todos los puntos, siguiendo el orden $L2 > L1 > L3$. No se presentaron diferencias significativas para este parámetro entre las descargas y la laguna (Anexo 4).

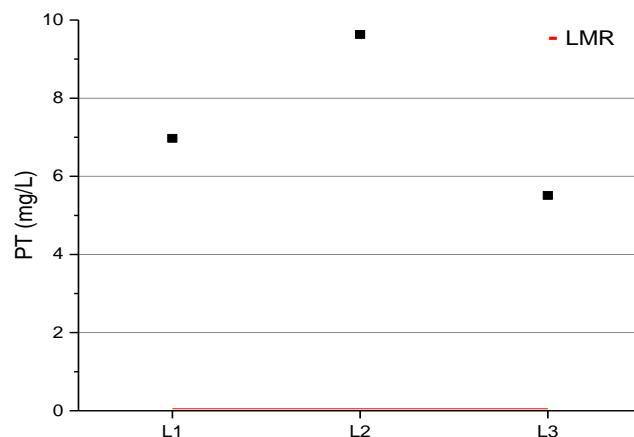


Figura 3.14 PT en la Laguna de Chimaliapan

e) Nitrógeno total (NT) en la Laguna de Chimaliapan

En la Figura 3.15 se muestra la concentración de NT en los puntos de la Laguna que siguen el orden $L1 > L3 > L2$, para este parámetro no hay un límite establecido. El análisis de varianza no mostró diferencias significativas de este parámetro entre las descargas y la Laguna (Anexo 5).

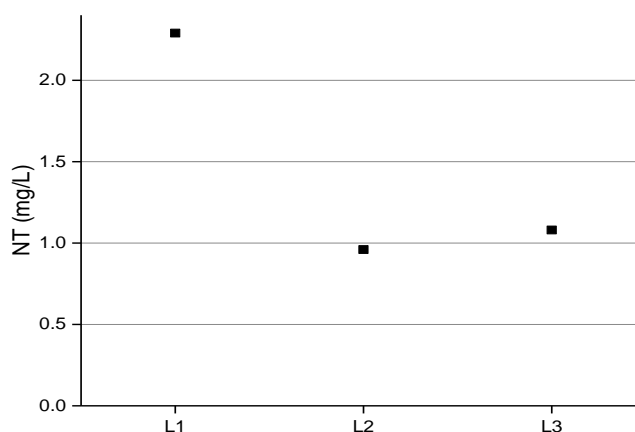


Figura 3.15 NT en la Laguna de Chimaliapan

f) Nitratos ($N-NO_3^-$) en la Laguna de Chimaliapan

La concentración de nitratos no se pudo determinar en los puntos de la Laguna, debido a que la interferencia de materia orgánica en las lecturas espectrométricas rebasaban el 30 % que indica la Norma correspondiente.

g) Nitritos ($N-NO_2$) en la Laguna de Chimaliapan

En la Figura 3.16 se muestra la concentración de nitritos presentes en los puntos de la Laguna donde $L3 = L2 > L1$. El análisis de varianza mostró que existen diferencias significativas entre las concentraciones de nitritos de las descargas y la Laguna de Chimaliapan (Anexo 6).

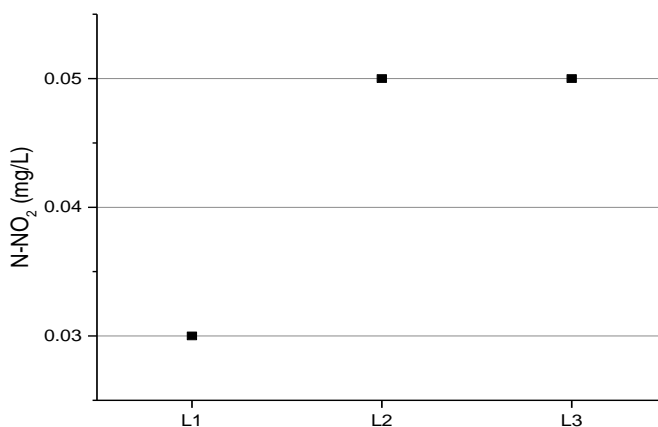


Figura 3.16 N-NO₂ en la Laguna de Chimaliapan

h) Nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) en la Laguna de Chimaliapan

El nitrógeno amoniacal es el nitrógeno combinado en forma de amoniaco (NH₃) o anomio (NH₄⁺), son gases que se producen de forma natural por fermentaciones microbianas de productos nitrogenados, como en la descomposición de proteínas o urea. El límite máximo recomendado para la protección de la vida acuática es de 0.06 mg/L. En la Figura 3.17 se presenta la concentración de nitrógeno amoniacal de los puntos en la Laguna donde se rabasa el límite en todos ellos, siguiendo el orden L1 > L3 > L2.

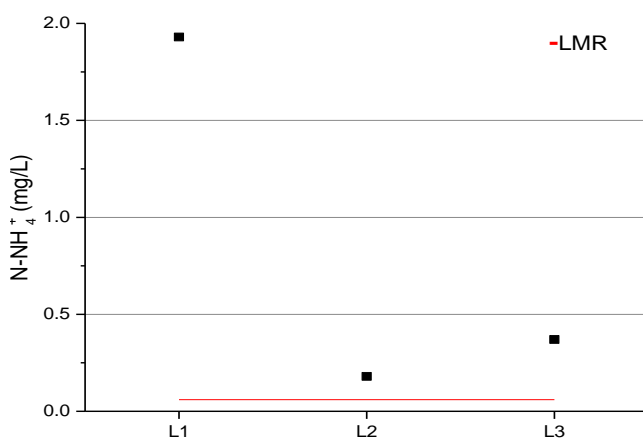


Figura 3.17 N-NH₄⁺ en la Laguna de Chimaliapan

i) Potencial de hidrógeno (pH) en la Laguna de Chimaliapan

El pH es una medida de la acidez o naturaleza básica (alcalina) de una solución. Es también una medida del balance de los iones $[H^+]$ y los iones hidroxilo $[OH^-]$ en el agua. Los valores de pH van de 0 a 14, considerándose neutral el valor de 7. Un intervalo de 6.0 a 9.0 brinda protección a la vida de los peces de agua dulce e invertebrados que habitan en el fondo (Abarca, 2007).

En la Figura 3.18 se muestran los valores de pH en la Laguna, todos los valores se encuentran dentro de los límites recomendados para la protección de la vida acuática siguiendo el orden $L3 > L2 > L1$. El análisis de varianza mostró diferencias significativas de pH entre las descargas y la Laguna de Chimaliapan (Anexo 7).

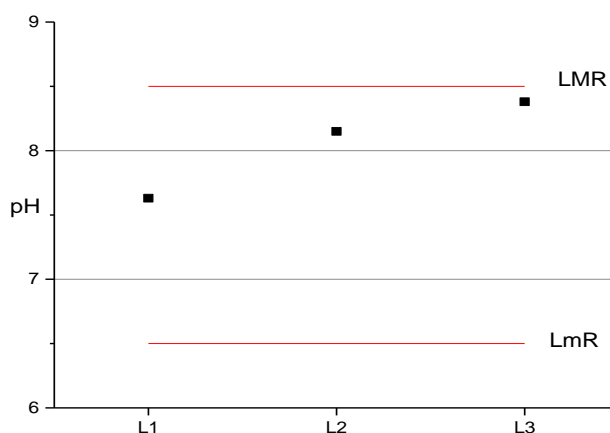


Figura 3.18 pH en la Laguna de Chimaliapan

j) Temperatura (T) de la Laguna de Chimaliapan

La Figura 3.19 muestra la temperatura en los puntos de la Laguna que siguen el orden $L1 < L2 < L3$., se recomienda que mantenga las condiciones naturales del sitio y hasta $1.5^{\circ}C$ mayor. El análisis de varianza no mostró diferencias significativas entre la temperatura de las descargas y la Laguna de Chimaliapan (Anexo 8).

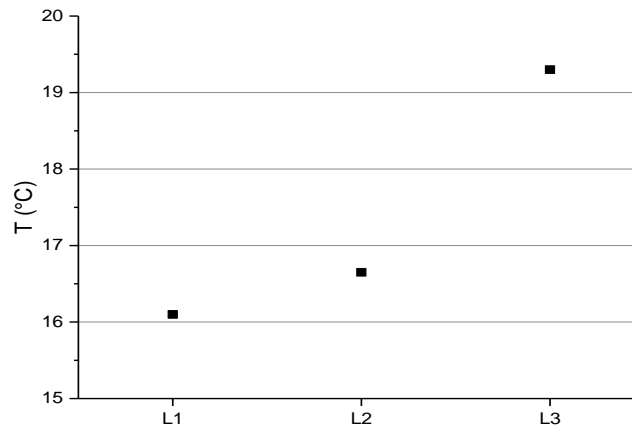


Figura 3.19 Temperatura en la Laguna de Chimaliapan

k) Conductividad eléctrica (CE) de la Laguna de Chimaliapan

En cuanto a los puntos de la Laguna, en la Figura 3.20 se muestra que la CE sigue el orden $L1 > L2 > L3$, siendo L1 el punto con mayor CE y a su vez el más cercano a D1. No existen valores recomendados de la CE para la protección de la vida acuática, sin embargo este parámetro se discutirá más adelante en el análisis de vegetación encontrada. El análisis de varianza mostró diferencias significativas en la CE de las descargas y la Laguna de Chimaliapan (Anexo 9).

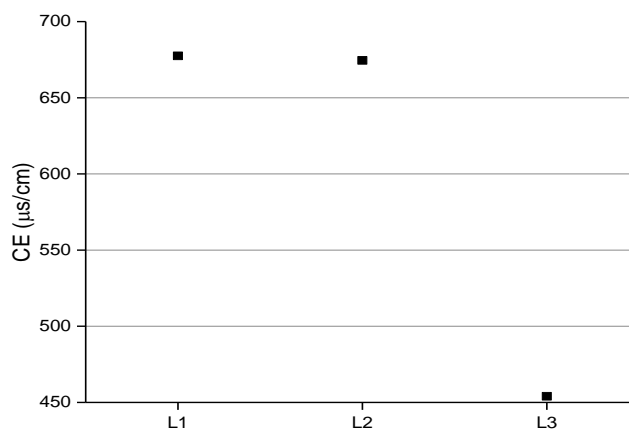


Figura 3.20 CE en la Laguna de Chimaliapan

3.3 Resultados de metales totales y metales solubles en el agua de descargas

En la Tabla 3.4 se observa que los metales totales determinados en el agua de las descargas no rebasan los LMP que marca la NOM-001-SEMARNAT 1996 (DOF, 1996).

Tabla 3.4 Concentración de metales totales en el agua de las descargas

Metales totales (mg/L)	D1	D2	D3	D4	LMP
Cr	< 0.004	0.014 \pm 0.001	0.006 \pm 0.001	0.006 \pm 0.001	1.0
Mn	0.143 \pm 0.009	0.169 \pm 0.005	0.073 \pm 0.003	0.141 \pm 0.005	-
Fe	1.932 \pm 0.021	3.378 \pm 0.012	0.791 \pm 0.028	1.621 \pm 0.029	-
Ni	0.079 \pm 0.011	0.240 \pm 0.004	0.049 \pm 0.001	0.413 \pm 0.017	4.0
Cu	0.075 \pm 0.001	0.063 \pm 0.003	0.054 \pm 0.001	0.085 \pm 0.011	1.0
Zn	0.226 \pm 0.007	0.458 \pm 0.006	0.228 \pm 0.009	0.259 \pm 0.006	20
Pb	0.008 \pm 0.001	0.015 \pm 0.001	0.008 \pm 0.001	0.008 \pm 0.001	0.4

Granados *et al.* (2014) reportaron la presencia de Mn, Fe, Cu, Zn, Br, Rb y Sr. Se observa que en ambos estudios los metales Mn, Fe, Cu y Zn se desechan en las cuatro descargas. Por otra parte en el estudio actual se determinó la presencia de Cr en las D2, D3 y D4, mientras que el Pb se detectó en los cuatro puntos de descarga.

La Tabla 3.5 muestra las concentraciones de la fracción soluble de metales en el agua de las descargas. Esta fracción representa los iones de metales libres y/o complejos metálicos disueltos, que están disponibles para la absorción de las plantas. Se determinó la fracción soluble de los metales Mn, Fe, Ni, Cu, Zn y Pb.

Tabla 3.5 Concentración de fracción soluble de metales en las descargas

Metales solubles (mg/L)	D1	D2	D3	D4
Cr	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Mn	0.100 ±0.004	0.050 ±0.002	0.045 ±0.002	0.087 ±0.002
Fe	0.468 ±0.008	0.233 ±0.014	0.251 ±0.002	0.340 ±0.057
Ni	0.006 ±0.001	0.015 ±0.001	0.020 ±0.001	0.008 ±0.001
Cu	0.030 ±0.002	0.028 ±0.001	0.027 ±0.002	0.051 ±0.002
Zn	0.179 ±0.012	0.189 ±0.004	0.149 ±0.003	0.124 ±0.009
Pb	0.004 ±0.001	0.005 ±0.001	0.004 ±0.001	0.005 ±0.002

a) Cromo (Cr) en descargas

Las concentraciones de cromo total en las descargas se muestran en la Figura 3.21. El valor cromo en la Descarga 1 fue menor a 0.004 mg/L, límite de detección para Cr en este estudio, los valores de cromo soluble tampoco rebasaron los 0.004 mg/L.

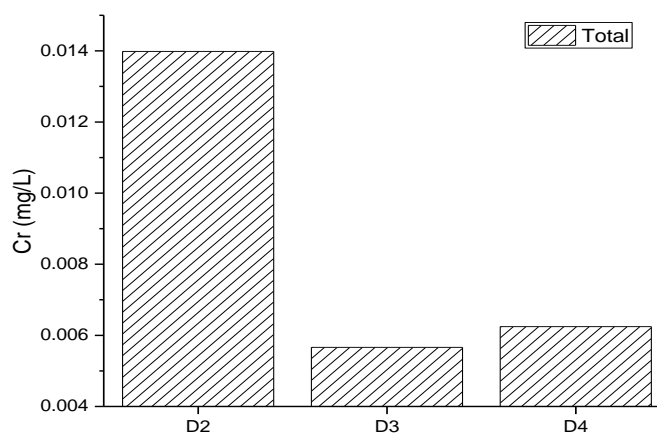


Figura 3.21 Cr en Descargas

b) Manganeso (Mn) en descargas

Los resultados del análisis de manganeso en agua de las descargas se muestran en la Figura 3.22 donde D2 presenta la mayor concentración de manganeso total seguida por D1, D4 y D3.

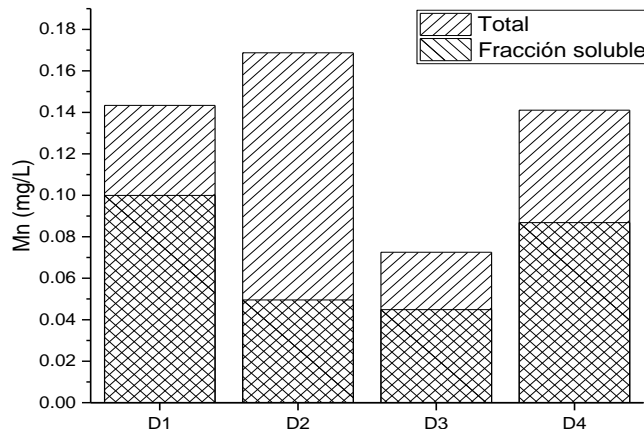


Figura 3.22 Mn en Descargas

c) Hierro (Fe) en descargas

La Figura 3.23 muestra la concentración de hierro total y soluble en las descargas, para éste elemento no se reporta LMP en la NOM-001-1996, los resultados presentan que D2 es el punto de mayor concentración de hierro con un valor mayor a 3 mg/L, seguido por D1, D3 y D4. Sin embargo, el hierro soluble en las descargas no supera los 0.5 mg/L.

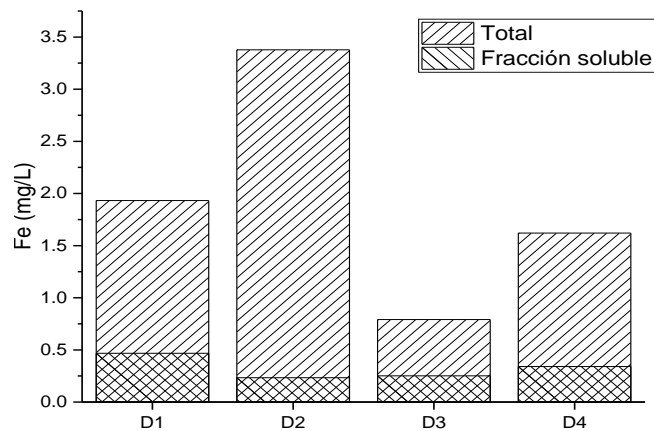


Figura 3.23 Hierro en Descargas

d) Níquel (Ni) en descargas

En la Figura 4.26 se presentan las concentraciones de níquel total en las descargas, donde D4 es la de mayor valor con 0.4 mg/L.

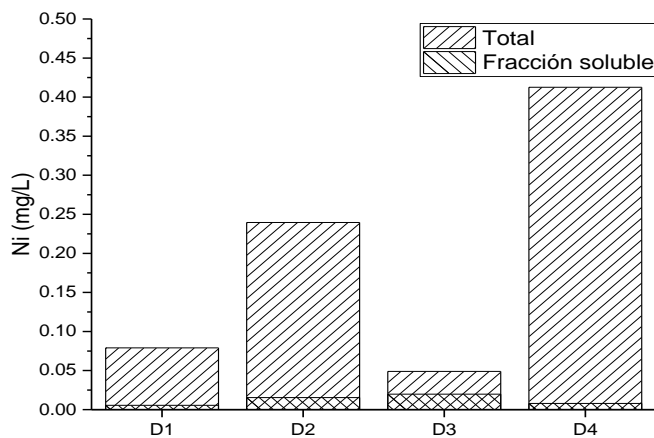


Figura 3.24 Ni en Descargas

e) Cobre (Cu) en descargas

Las descargas no mostraron rebasar el LMP de 6.0 mg/L de cobre total (Figura 3.25), con valores oscilando entre 0.05 y 0.09 mg/L.

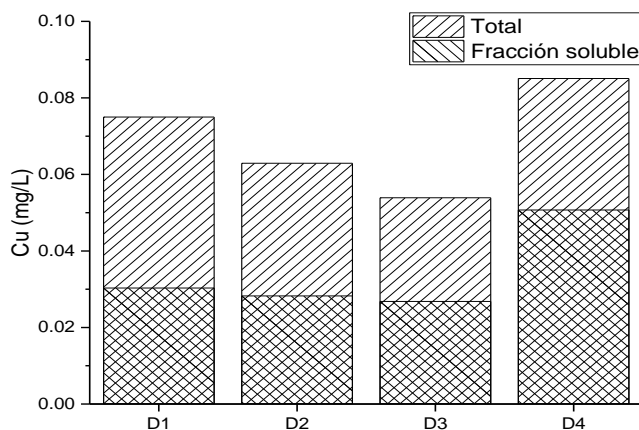


Figura 3.25 Cu en Descargas

f) Zinc (Zn) en descargas

El LMP de zinc en descargas es de 20 mg/L, el punto con mayor concentración de zinc total fue D2 con aproximadamente 0.5 mg/L (Figura 3.26), ningún punto rebasó el límite establecido.

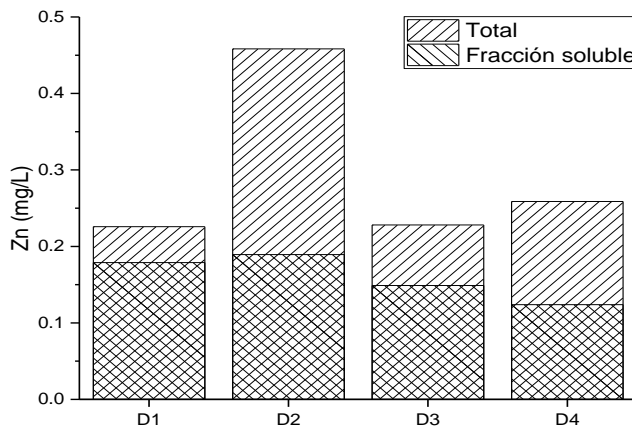


Figura 3.26 Zn en Descargas

g) Plomo (Pb) en descargas

Los resultados del análisis de plomo en las descargas se muestran en la Figura 3.27, el LMP es de 0.4 mg/L, que no fue rebasado en ningún punto de las descargas.

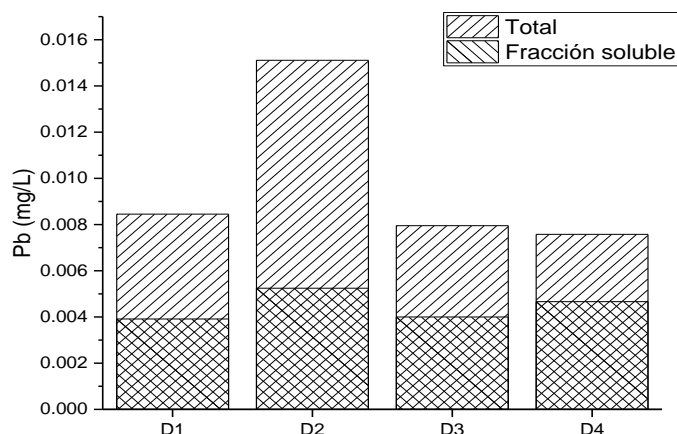


Figura 3.27 Pb en Descargas

De acuerdo con el coeficiente de correlación entre metales totales y los parámetros fisicoquímicos en descargas (Anexo 10) el pH tuvo mayor correlación positiva, seguida por la DQO y CE; con NT presentó coeficientes negativos en su mayoría.

Los coeficientes de correlación entre metales solubles y parámetros fisicoquímicos en descargas (Anexo 11) tuvieron en general valores negativos en NT, OD, PT, DBO y pH; la CE presentó correlación positiva.

3.4 Resultados de totales y solubles en el agua de la Laguna de Chimaliapan

En la tabla 3.6 se muestran las concentraciones de metales totales en el agua de la laguna de Chimaliapan y los VR de la calidad del agua para la protección de la vida acuática (CONAGUA, 2016), se encontró que L3 rebasa el valor recomendado de Cu y en los tres puntos muestreados se excede el VR de Zn.

Tabla 3.6 Concentración de metales totales en el agua de la Laguna de Chimaliapan

Metales totales (mg/L)	L1	L2	L3	VR
Cr	< 0.004	< 0.004	< 0.004	0.05
Mn	0.248 ±0.013	0.145 ±0.001	0.159 ±0.001	-
Fe	0.336 ±0.004	0.366 ±0.005	0.236 ±0.005	1.0
Ni	0.049 ±0.002	0.012 ±0.001	0.012 ±0.001	0.6
Cu	0.042 ±0.002	0.022 ±0.001	0.054 ±0.001	0.05
Zn	0.119 ±0.007	0.037 ±0.001	0.065 ±0.001	0.02
Pb	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.03

En la Tabla 3.7 se muestran las concentraciones de la fracción soluble de metales en la Laguna de Chimaliapan, donde Fe y Zn tienen los valores más altos en los tres puntos de muestreo.

Tabla 3.7 Concentración de la fracción soluble de metales en el agua de la laguna de Chimaliapan

Metales solubles (mg/L)	L1	L2	L3
Cr	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Mn	0.009 ±0.000	0.003 ±0.000	0.006 ±0.000
Fe	0.167 ±0.002	0.185 ±0.020	0.151 ±0.011
Ni	0.024 ±0.002	0.004 ±0.000	0.004 ±0.000
Cu	0.009 ±0.001	0.008 ±0.001	0.020 ±0.001
Zn	0.064 ±0.002	0.035 ±0.003	0.031 ±0.002
Pb	< 0.002	< 0.002	< 0.002

En la Laguna los metales Cr y Pb no rebasaron los límites de detección de 0.004 y 0.002 mg/L respectivamente.

a) Manganeso (Mn) en la Laguna de Chimaliapan

En la Figura 3.28 se muestran las concentraciones de manganeso total y soluble en la Laguna siendo L1 el punto más alto, seguido por L3 y finalmente L2. Para éste metal no se reportan límites máximos recomendados.

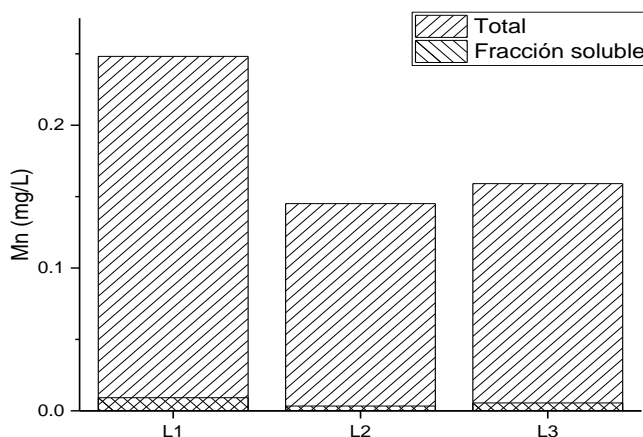


Figura 3.28 Mn en la Laguna de Chimaliapan

b) Hierro (Fe) en la Laguna de Chimaliapan

El límite recomendado de hierro en el agua para uso de protección a la vida acuática es de 1.0 mg/L, las concentraciones de hierro en la Laguna no rebasaron ese límite como se muestra en la Figura 3.29.

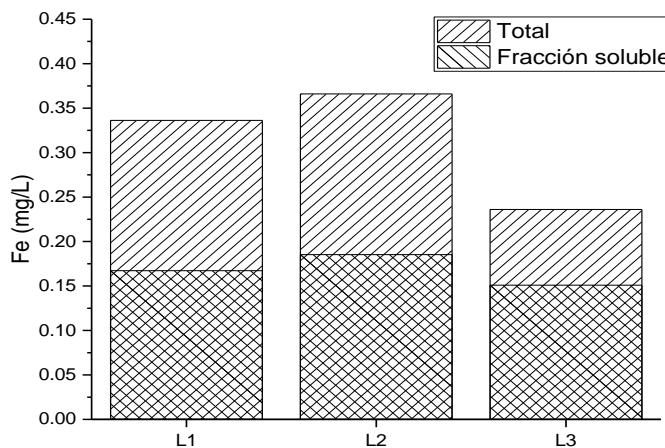


Figura 3.29 Hierro en la Laguna de Chimaliapan

c) Níquel (Ni) en la Laguna de Chimaliapan

Las concentraciones de Ni total y soluble en la Laguna se muestran en la Figura 3.30.

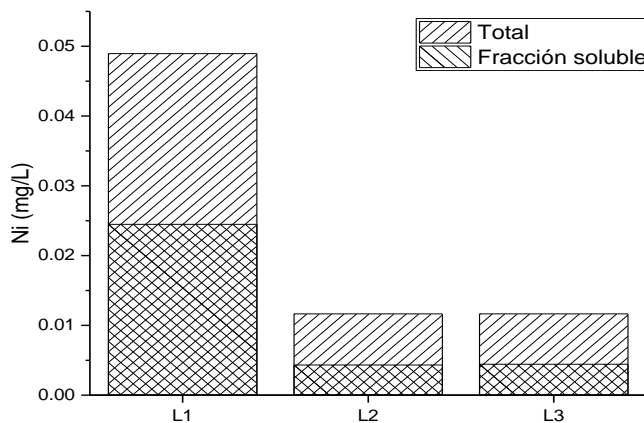


Figura 3.30 Ni en la Laguna de Chimaliapan

d) Cobre (Cu) en la Laguna de Chimaliapan

El valor máximo recomendable de cobre en agua para uso de protección para la vida acuática es de 0.05 mg/L, en la Figura 3.31 se observa que sólo un punto de muestreo (L3) rebasa ese valor con una concentración de 0.054 mg/L de cobre total.

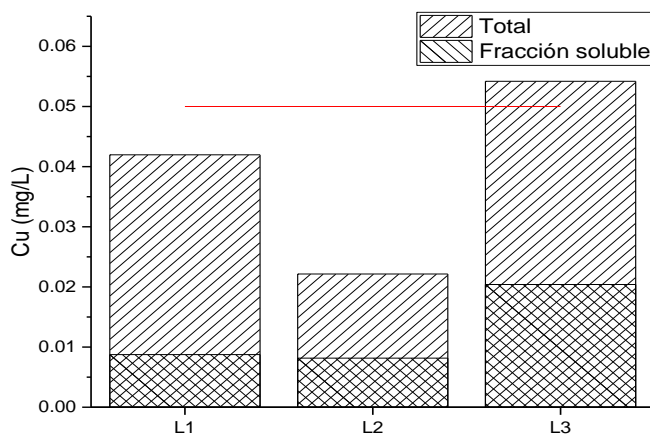


Figura 3.31 Cu en la Laguna de Chimaliapan

e) Zinc (Zn) en la Laguna de Chimaliapan

El valor recomendado de zinc en agua con uso de protección para la vida acuática es de 0.02 mg/L, en la Figura 3.32 se observa que en todos los puntos de Laguna el zinc total rebasa dicho límite; siendo L1 el punto más alto, seguido por L3 y L2.

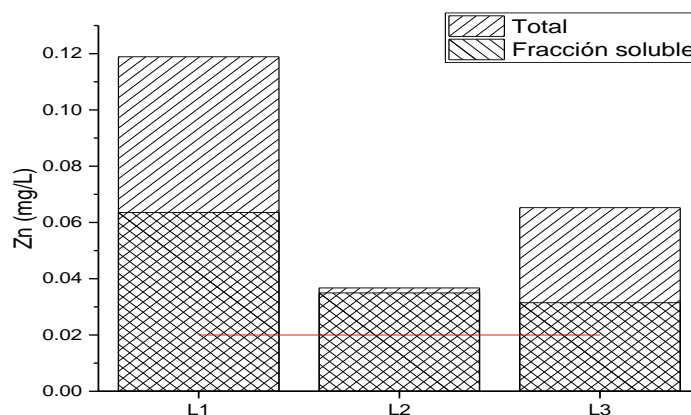


Figura 3.32 Zn en la Laguna de Chimaliapan

Los coeficientes de correlación entre metales totales y parámetros fisicoquímicos fueron positivos en: NT, DQO y CE; en cambio para pH, DBO, OD y PT se presentaron correlaciones negativas (Anexo 12).

En cuanto a los metales solubles y parámetros fisicoquímicos en la Laguna se encontró que NT, DQO y CE tienen correlaciones positivas en su mayoría; mientras que OD, pH, DBO y PT presentan valores de correlación negativa (Anexo 13).

3.5 Vegetación acuática encontrada en las descargas y en la Laguna de Chimaliapan

Las especies muestreadas dentro de la Laguna de Chimaliapan fueron: *Arenaria paludicola* (Figura 3.33), *Bidens aurea* (Figura 3.34), *Eichhornia crassipes* (Figura 3.35), *Hydrocotyle ranunculoides* (Figura 3.36) y *Myriophyllum heterophyllum*

(Figura 3.37). En las descargas de agua residual se muestrearon las especies *Hydrocotyle ranunculoides* y *Lemna gibba* (Figura 3.38)

Arenaria paludicola

Taxonomía

Reino: Plantae

División Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Caryophyllales

Familia: Caryophyllaceae

Género: *Arenaria*

Ubicación: L1



Figura 3.33 *Arenaria paludicola* en la laguna de Chimaliapan

Bidens aurea

Taxonomía

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Asterales

Familia: Asteraceae

Género: *Bidens*

Ubicación: L2 y L3



Figura 3.34 *Bidens aurea* (CONABIO, 2009)

Eichhornia crassipes

Taxonomía

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Pontederiales

Familia: Pontederiaceae

Género: *Eichhornia*

Ubicación: L1, L2 y L3



Figura 3.35 *Eichhornia crassipes* en la Laguna de Chimaliapan

Hydrocotyle ranunculoides

Taxonomía

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Apiales

Familia: Apiaceae

Género: *Hydrocotyle*

Ubicación: L1, L2 y L3.

D1, D2, D3 y D4



Figura 3.36 *Hydrocotyle ranunculoides* en la Laguna de Chimaliapan

Myriophyllum heterophyllum

Taxonomía

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Haloragales

Familia: Haloragaceae

Género: *Myriophyllum*

Ubicación: L1 y L3



Figura 3.37 *Myriophyllum heterophyllum* en la Laguna de Chimaliapan

Lemna gibba

Taxonomía

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Arales

Familia: Lemnaceae

Género: *Lemna*

Ubicación: D3



Figura 3.38 *Lemna gibba* en descarga

3.6 Metales en la vegetación acuática analizada

En esta sección se sintetizan los resultados obtenidos de las concentraciones de metales en la vegetación acuática, así como los factores de bioacumulación de metales totales, metales solubles y traslocación.

La Tabla 3.8 resume las concentraciones de metales en la vegetación acuática estudiada en las descargas y en la Laguna de Chimaliapan.

Tabla 3.8 Concentración de metales en la vegetación acuática

Especies y ubicación	Cr mg/Kg	Mn mg/Kg	Fe mg/Kg	Ni mg/Kg	Cu mg/Kg	Zn mg/Kg	Pb mg/Kg
<i>H. ranunculoides</i> D1-D4	5.28 ±3.73	349.67 ±147.25	4,044.50 ±1,833.67	8.69 ±8.36	36.37 ±19.18	160.90 ±97.41	5.77 ±2.41
<i>L. gibba</i> D3	5.31	125.61	1,849.93	38.97	16.15	40.67	3.67
<i>H. ranunculoides</i> L1-L3	ND	1,955.58 ±533.21	805.71 ±512.73	4.03 ±4.54	44.91 ±45.70	54.29 ±35.86	3.34 ±2.45
<i>E. crassipes</i> L1-L3	ND	5,496.43 ±1,640.65	1,592.48 ±638.59	5.07 ±0.83	21.60 ±5.39	61.08 ±29.39	5.36 ±3.01
<i>M. heterophyllum</i> L1, L3	ND	2,631.28 ±1,762.89	1,178.39 ±414.60	2.90 ±0.63	28.14 ±11.33	38.23 ±10.32	1.78 ±0.58
<i>B. aurea</i> L2, L3	ND	1,741.35 ±739.27	759.79 ±754.26	2.67 ±0.72	16.57 ±1.05	41.14 ±5.85	1.69 ±0.81
<i>A. paludicola</i> L1	1.74	766.22	990.84	2.65	18.67	54.47	4.98

De la especies muestreadas en las descargas *H. ranunculoides* obtuvo mayores concentraciones de los metales determinados a excepción de Ni. Para las especies encontradas en la Laguna: se registraron mayores concentraciones de Mn, Fe, Ni, Zn y Pb; en *E. crassipes* la concentración más alta de Ni se encontró en *H. ranunculoides*; y *A. paludicola* fue la única especie dentro de la Laguna en la que se encontró Cr.

a) Factor de bioacumulación de metales totales en la vegetación acuática

El factor de bioacumulación relaciona la concentración de los metales en el agua con su concentración en las plantas. En la Tabla 3.9 se encuentran los resultados de este factor en cada especie vegetal ubicada en las descargas y en la Laguna de Chimaliapan. Toda la vegetación analizada, en las descargas y en la Laguna, tuvo valores mayores a 1000 en el FBA de Mn y Fe lo que indica el potencial de estas especies de hiperacumular ambos metales. En la Laguna, *Hydrocotyle ranunculoides* también mostró potencial para hiperacumular Cu y Zn.

b) Factor de bioacumulación de la fracción soluble de metales en la vegetación acuática

La Tabla 3.10 contiene los resultados del FBA de la fracción soluble de metales. Se encontró que en las descargas la especie *H. ranunculoides* bioacumuló $Fe > Mn > Pb > Zn > Cu > Ni$ y *L gibba* presentó $Fe > Mn > Ni > Pb > Cu > Zn$.

En la vegetación de la Laguna de Chimaliapan el FBA de metales solubles en *H. ranunculoides*, *E. crassipes*, *M. heterophyllum* y *A. paludicola* fue: $Mn > Fe > Cu > Zn > Ni$; mientras que para *B. aurea* se encontró $Mn > Fe > Cu > Zn > Ni$.

3. RESULTADOS y DISCUSIÓN

Tabla 3.9 Media y desviación estándar del factor de bioacumulación de la fracción total de metales

Especies y ubicación	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
<i>H. ranunculoides</i> D1-D4	849.81 ±913.03	2,893.71 ±1,440.16	2,753.43 ±2,339.33	62.9 ±55.37	510.55 ±179.16	610.96 ±408.19	672.95 ±380.58
<i>L. gibba</i> D3	937.83	1,731.28	2,339.33	796.05	299.62	178.26	460.85
<i>H. ranunculoides</i> L1-L3	ND	15,058.87 ±5,353.17	3,491.81 ±1,491.71	230.35 ±38.27	1,547.36 ±1,002.66	1,010.59 ±72.73	ND
<i>E. crassipes</i> L1-L3	ND	32,750.72 ±15,308.8	5,178.78 ±1,867.74	319.27 ±195.22	596.63 ±211.06	878.83 ±199.55	ND
<i>M. heterophyllum</i> L1, L3	ND	14,976.47 ±13291.56	4,063.58 ±442.44	139.64 ±100.64	616.53 ±346.66	428.43 ±64.21	ND
<i>B. aurea</i> L2, L3	ND	11,631.52 ±5,616.8	2,246.47 ±1820.09	229.34 ±62.09	536.9 ±346.35	850.69 ±222.11	ND
<i>A. paludicola</i> L1	ND	3,086.47	2,946.76	54.06	444.94	458.22	ND

*ND= No determinado

3. RESULTADOS y DISCUSIÓN

Tabla 3.10 Media y desviación estándar del factor de bioacumulación de la fracción soluble de metales

Especies y ubicación	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
<i>H. ranunculoides</i> D1-D4	ND	5,712.71 ±2,896.10	13,705.42 ±7,733.82	967.37 ±1,146.71	1,028.49 ±183.95	1,118.74 ±912.43	1,349.72 ±684.41
<i>L. gibba</i> D3	ND	2,799.28	7,373.92	1,966.73	602.49	273.15	916.33
<i>H. ranunculoides</i> L1-L3	ND	499,995.82 ±291308.78	6,465.27 ±3,125.53	564.57 ±144.9	6,043.22 ±5,910.47	1,668.2 ±513.3	ND
<i>E. crassipes</i> L1-L3	ND	1,110,788.5 ±621,403.16	9,568.46 ±3,911.8	824.39 ±553.32	1,915.31 ±483.39	1,391.32 ±199.46	ND
<i>M. heterophyllum</i> L1, L3	ND	425,426.73 ±388,957.9	7,331.83 ±2,074.35	345.86 ±295.44	2,561.42 ±2,226.74	849.81 ±188.04	ND
<i>B. aurea</i> L2, L3	ND	444,990.73 ±318,015.7	4,239.2 ±3,873.34	609.06 ±155.61	1,448.96 ±951.91	1,248.39 ±269.05	ND
<i>A. paludicola</i> L1	ND	83,217.55	5,924.33	108.13	2,135.74	857.6	ND

*ND= No determinado

c) Factor de traslocación de metales en la vegetación acuática

El factor de traslocación relaciona la concentración de metales que se encuentran en las estructuras aéreas de las plantas (tallos y hojas) con la concentración de metales en las estructuras sumergidas (raíces y estolones). De acuerdo con el criterio para el factor de traslocación las plantas presentan resultados muy variables, incluso la misma especie en diferentes condiciones ambientales responde de distinta manera (Tabla 3.11).

De los metales que se trasladaron a la parte aérea de las plantas el Mn y el Zn están asociados con catalizadores o activadores de enzimas. Estos metales son considerados micronutrientes en las plantas, su factor de traslocación mayor a uno puede deberse a los requerimientos de cada especie para la fotosíntesis. El Mn está involucrado en el sistema de evolución del O₂ en la fotosíntesis y en las enzimas arginasa y fototransferasa; el Zn es componente de varias deshidrogenasas, proteínasas y peptidasas involucradas en la respiración celular; mientras que el Cu está involucrado en la síntesis de ATP (Cruz, 2006).

Aunque el hierro también se considera un micronutriente componente de las ferrozimas, clave en la fotosíntesis, fijación de nitrógeno y transferencia de electrones, este metal tuvo los valores menores en el factor de traslocación en todas las plantas, lo que indica su mayor concentración en las raíces.

Tabla 3.11 Medias y desviación estándar del factor de traslocación de metales en la vegetación

Especies y ubicación	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
<i>H. ranunculoides</i> D1-D4	0.16 ±0.75	1.21 ±0.37	0.09 ±0.02	0.29 ±0.65	0.44 ±0.11	0.73 ±0.05	0.09 ±0.04
CFT	B	MA	B	M	M	A	B
<i>H. ranunculoides</i> L1-L3	ND	0.18 ±0.06	0.166 ±0.044	0.82 ±0.044	0.88 ±0.25	1.07 ±0.56	ND
CFT	-	B	B	A	A	MA	-
<i>E. crassipes</i> L1-L3	ND	0.19 ±0.11	0.75 ±0.01	0.64 ±0.22	0.61 ±0.4	1.16 ±0.02	ND
CFT	-	B	A	A	A	MA	-
<i>M. heterophyllum</i> L1, L3	ND	1.14 ±1.09	0.12 ±0.005	0.67 ±0.23	1.09 ±0.86	1.15 ±0.16	ND
CFT	-	MA	B	A	MA	MA	-
<i>B. aurea</i> L2, L3	ND	0.66 ±0.01	0.35 ±0.34	0.58 ±0.4	0.60 ±0.1	1.41 ±0.1	ND
CFT	-	A	M	A	A	MA	-
<i>A. paludicola</i> L1	0.77	0.21	0.10	0.48	0.31	0.36	0.07
CFT	A	M	B	M	M	M	B

*CFT= Criterio para el factor de traslocación, MA= Muy alta, A= Alta, M= Media, B= baja, ND= No determinado

3.7 Bioacumulación de metales en vegetación acuática flotante en Descargas

A continuación se detallan los resultados de la bioacumulación de metales de la vegetación analizada en cada punto de descarga.

a) Descarga 1

Los resultados del FBA de metales totales muestran que *H. ranunculoides* puede hiperacumular Fe y Mn del medio.

Metal	Fe	Mn	Pb	Zn	Cu	Ni
	2,729.01 >	1,125.42 >	599.36 >	459.06 >	385.74 >	44.83

Por su parte, el FBA de metales solubles en *H. ranunculoides* siguen la tendencia de acumular Fe, Mn y Pb en mayor concentración en la planta.

Metal	Fe	Mn	Pb	Cu	Ni	Zn
	11,266.10 >	1,614.31 >	1,294.04 >	954.72 >	639.77 >	579.43

En la Figura 3.39 se observan las concentraciones de metales en las estructuras sumergidas y aéreas de *H. ranunculoides*.

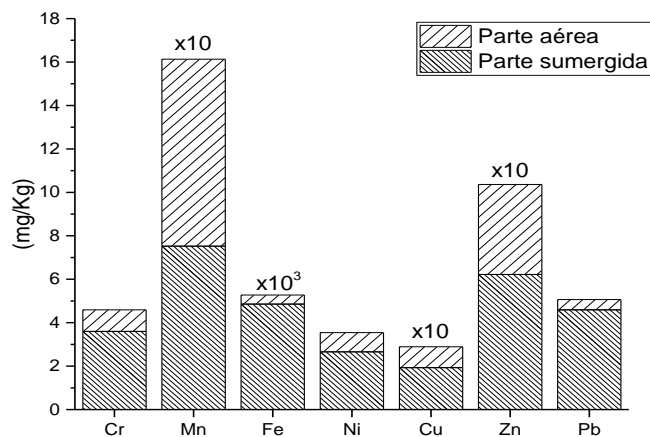


Figura 3.39 Metales en *Hydrocotyle ranunculoides* de Descarga 1

De acuerdo con FT de metales en *H. ranunculoides*, el Mn es el metal que se trasloca en mayor proporción a la parte aérea, los demás metales analizados son retenidos en la parte sumergida de la planta, siendo el Fe el metal que más se concentra en las raíces y estolones.

Metal	Mn	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb	Fe
	1.14 >	0.67 >	0.50 >	0.33 >	0.28 >	0.10 >	0.09

b) Descarga 2

En este punto *H. ranunculoides* mostró hiperacumulación de Mn y Fe. La Descarga 2 mostró tener la mayor concentración de Mn, Fe, Zn y Pb total en el agua.

Metal	Mn	Fe	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
	2,411.81>	1,422.74>	381.46>	227.75>	221.46>	219.27>	13.64

Esta descarga tiene el valor más alto de Zn y Pb soluble, sin embargo el factor de acumulación presentó que el Fe y el Mn son los metales que se encuentran en mayor concentración en *H. ranunculoides*.

Metal	Fe	Mn	Cu	Pb	Zn	Ni
	20,619.13 >	8,214.36 >	849.43 >	656.23 >	535.94 >	211.64

La Figura 3.40 muestra las concentraciones de metales en las estructuras aéreas y sumergidas de *H. ranunculoides*.

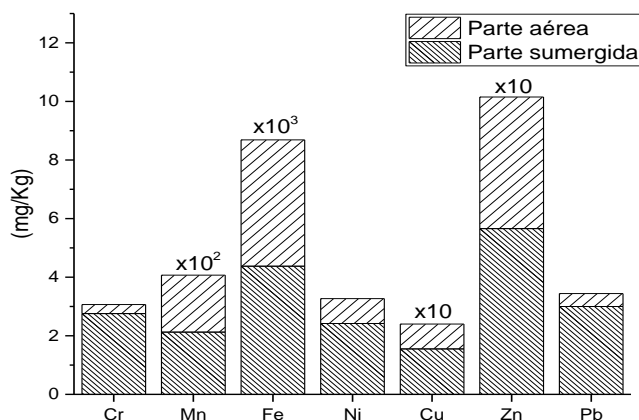


Figura 3.40 Metales en *Hydrocotyle ranunculoides* de Descarga 2

En esta descarga se encontró que el factor de traslocación de metales fue menor a uno, es decir que los metales se concentraron en la parte sumergida de la planta,

siendo el Mn el metal con mayor valor de traslocación y el Fe con el menor valor, al igual que en la Descarga 1.

Metal	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb	Cr	Fe
	0.91 >	0.79 >	0.54 >	0.35 >	0.14 >	0.11 >	0.09

c) Descarga 3

En la Descarga 3 se encontraron dos especies de plantas: *H. ranunculoides* y *L. gibba*, de las descargas estudiadas, en esta se presentaron las menores concentraciones de: Mn y Cu total y soluble, Ni y Zn total y Pb soluble.

H. ranunculoides tuvo factores de hiperacumulación de Fe, Mn, Cr y Pb, ya que presentaron valores mayores a 1000 mg/Kg

Metal	Fe	Mn	Cr	Pb	Zn	Cu	Ni
	6,050.9>	4,425.9>	1,896.8>	1,151.8>	582.9>	511.3>	142.2

De acuerdo con los valores de acumulación de metales solubles *H. ranunculoides* acumuló en mayor concentración Fe, Mn y Pb y en menor concentración Ni.

Metal	Fe	Mn	Pb	Cu	Zn	Ni
	19,073.37>	7,156.18>	2,290.26 >	1,028.29>	893.19>	351.53

En *H. ranunculoides* el Fe, al igual que en los puntos de descargas anteriores, fue el metal con mayor concentración en la parte sumergida como se muestra en la Figura 3.41.

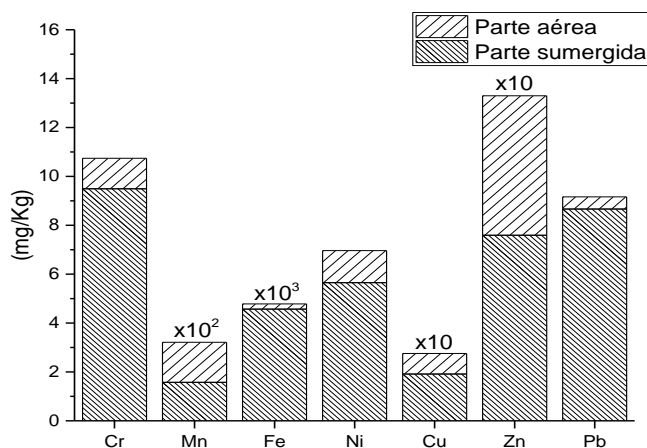


Figura 3.41 Metales en *Hydrocotyle ranunculoides* de Descarga 3

El factor de traslocación mostró que el Mn tuvo un valor mayor a 1, lo cual indica que la mayor concentración de este metal se encuentra en la parte aérea y una vez más se observa que el Fe tiene el menor valor de traslocación.

Metal	Mn	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb	Fe
	1.03 >	0.75 >	0.44 >	0.23 >	0.13 >	0.05 >	0.04

Los valores del factor de bioacumulación de metales totales indicaron que *L. gibba* puede hiperacumular Fe y Mn.

Metal	Fe	Mn	Cr	Ni	Pb	Cu	Zn
	2,339.3 >	1,731.2 >	937.8 >	796 >	460.8 >	299.6 >	178.26

Mientras que el factor de acumulación de metales solubles indicó que Fe, Mn y Ni se absorbieron en mayor proporción por la planta.

Metal	Fe	Mn	Ni	Pb	Cu	Zn
	7,373.92 >	2,799.28 >	1,966.73 >	916.33 >	602.49 >	273.15

L. gibba se analizó completa debido al pequeño tamaño de sus estructuras aéreas, en la Figura 3.42 se presenta la concentración de metales en esta planta acuática, donde el Fe tiene la mayor concentración, seguido por Mn, Zn, Cu, Cr, Ni y Pb.

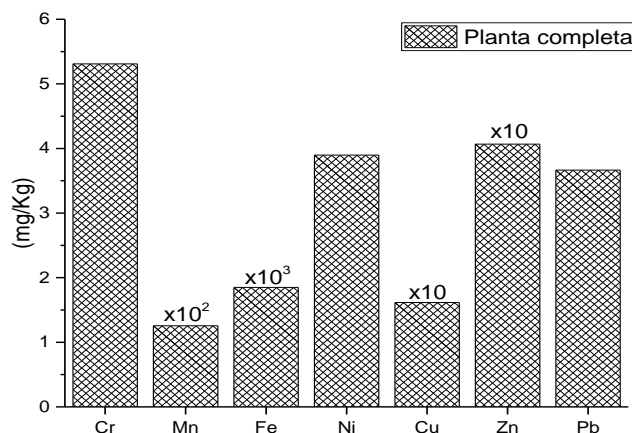


Figura 3.42 Metales en *Lemna gibba* de Descarga 3

d) Descarga 4

En la Descarga 4 se encontraron las mayores concentraciones de Cu y Ni total en el agua, los valores del factor de bioacumulación de metales totales indicó que Mn y Zn son hiperacumulados por *H. ranunculoides*.

Metal	Mn	Zn	Fe	Cu	Pb	Cr	Ni
	3,611.69>	1,180.43>	811.08>	763.64>	712.84>	433.34>	50.84

Por su parte, los valores del factor de acumulación de metales solubles mostraron que *H. ranunculoides* absorbió mayor concentración de metales esenciales que los no esenciales.

Metal	Mn	Fe	Ni	Zn	Cu	Pb
	5,865.97>	3,863.08>	2,666.53 >	2,466.41>	1,281.51>	1,158.37

La Figura 3.43 presenta la concentración de los metales en las estructuras sumergidas y aéreas de *H. ranunculoides*.

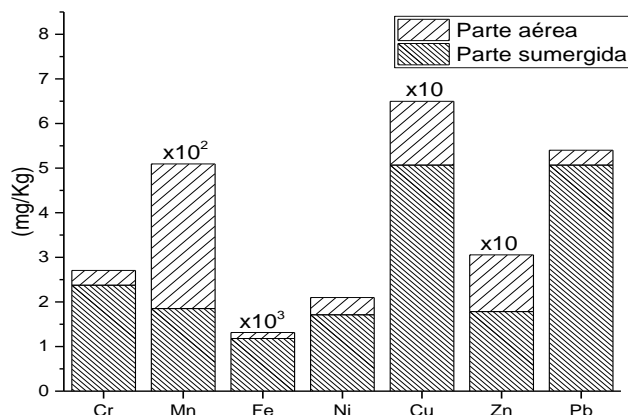


Figura 3.43 Metales en *Hydrocotyle ranunculoides* de Descarga 4

El factor de traslocación indicó para el Mn un valor mayor a 1, por lo tanto la mayor concentración de este metal se encuentra en la parte aérea de la planta, en éste caso los metales con menor valor de traslocación fueron Pb y Fe, los cuales se concentraron en la parte sumergida de la planta.

Metal	Mn	Zn	Cu	Ni	Cr	Fe	Pb
	1.75 >	0.71 >	0.28	0.22 >	0.13 >	0.11 >	0.06 >

3.8 Bioacumulación de metales en vegetación acuática flotante en la Laguna de Chimaliapan

A continuación se describen los resultados de la bioacumulación de metales de la vegetación analizada en cada punto de la Laguna de Chimaliapan.

a) Laguna punto 1

Las concentraciones de Mn, Ni y Zn totales en el agua tuvieron los valores más altos en este punto de muestreo, el factor de bioacumulación muestra la hiperacumulación de Mn, Fe y Cu en *H. ranunculoides*.

Metal	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni
	9,540.26 >	4,942.65 >	2,671.64 >	929.32 >	216.6

El factor de acumulación de metales solubles mostró que la especie absorbe en mayor proporción los metales esenciales de acuerdo a su requerimiento nutritivo.

Metal	Mn	Cu	Fe	Zn	Ni
	257,224.95 >	12,823.89 >	9,936.96 >	1,739.29 >	433.2

En la Figura 3.44 se presentan las concentraciones de los metales en las estructuras sumergidas y aéreas de *Hydrocotyle ranunculoides*, donde se observa la mayor concentración de Mn y Fe, seguidas por Cu, Zn, Cr, Ni y Pb.

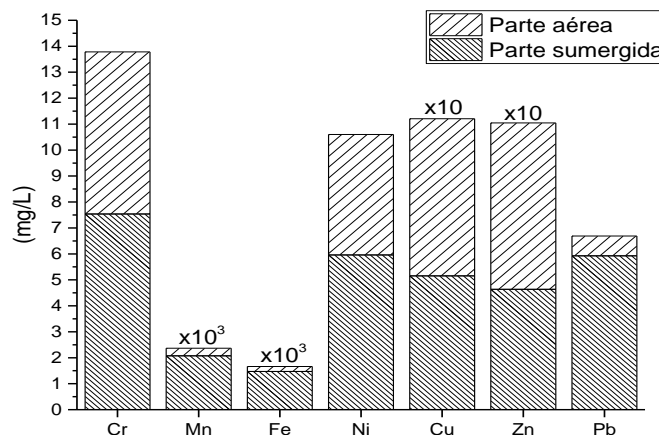


Figura 3.44 Metales en *Hydrocotyle ranunculoides* de Laguna punto 1

De acuerdo con los resultados del factor de traslocación, el Zn y el Cu mostraron valores mayores a la unidad, lo cual indica que dichos metales se localizan en mayor concentración en la parte aérea de la planta.

Metal	Zn	Cu	Cr	Ni	Mn	Fe	Pb
	1.38 >	1.17 >	0.82 >	0.77 >	0.14 >	0.13 >	0.12

La especie *E. crassipes* mostró en este punto hiperacumulación de Mn y Fe.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	15,555.49 >	6,921.98 >	797.11 >	439.66 >	108.53

Los valores del factor de acumulación de metales solubles, tuvieron la misma tendencia que los valores de acumulación de metales totales.

Metal	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni
	419,407.66 >	13,916.32 >	2,110.36 >	1,491.84 >	217.07 >

En la Figura 3.45 se muestran las concentraciones de los metales analizados en las estructuras aéreas y sumergidas de *E. crassipes* en el punto 1 de la Laguna, se observan las concentraciones de Mn, Fe, Zn, Cu, Pb, Ni y Cr.

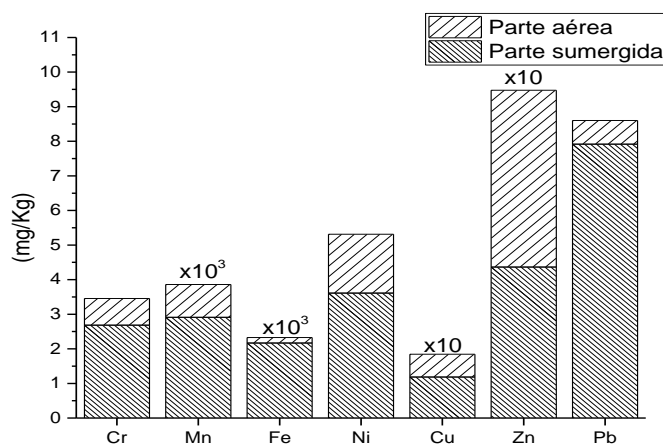


Figura 3.45 Metales en *Eichhornia crassipes* de Laguna punto 1

El factor de traslocación tuvo un valor mayor a uno en Zn, los valores más bajos de traslocación fueron de Pb y Fe.

Metal	Zn	Cu	Ni	Mn	Cr	Pb	Fe
	1.17 >	0.55 >	0.47 >	0.32 >	0.28 >	0.08 >	0.07

En el punto 1 de la Laguna otra especie encontrada fue *M. heterophyllum*, la cual mostró hiperacumulación de Mn y Fe.

Metal	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni
	5,577.91 >	4,376.43 >	861.66 >	383.02 >	68.47

Los valores del factor de acumulación de metales solubles mostraron la misma tendencia que para los metales totales.

Metal	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni
	150,391.96 >	8,798.62 >	4,135.96 >	716.84 >	136.95

Como se presenta en la Figura 3.46 los metales analizados siguen el orden descendente Fe, Mn, Zn, Cu, Cr y Pb en la planta.

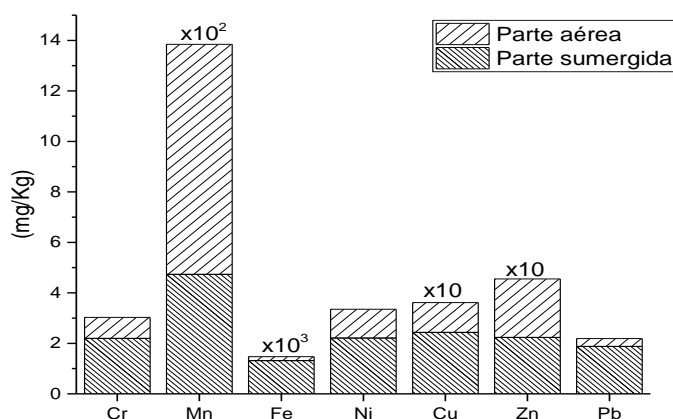


Figura 3.46 Metales en *Myriophyllum heterophyllum* de Laguna punto 1

M. heterophyllum tuvo valores traslocación muy alta para Mn y Zn; alta para Ni; media para Cu y Cr; y baja para Pb y Fe.

Metal	Mn	Zn	Ni	Cu	Cr	Pb	Fe
	1.92 >	1.03 >	0.51 >	0.48 >	0.37 >	0.16 >	0.12

Por último, en este punto de muestreo se encontró la especie *A. paludicola*. Se encontraron valores de hiperacumulación de Mn y Fe. La bioacumulación de metales totales en *A. paludicola* fue la más baja en la vegetación de este punto.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	3,086.47 >	2,946.76 >	458.22 >	444.94 >	54.06

En relación con el factor de acumulación de metales solubles, Mn y Fe tuvieron los valores más altos seguidos por Cu, Ni y Zn.

Metal	Mn	Fe	Cu	Ni	Zn
	83,217.55 >	5,924.33 >	2,135.74 >	108.13 >	857.6

La Figura 3.47 presenta la concentración de metales en las estructuras aéreas y sumergidas de *A. paludicola*.

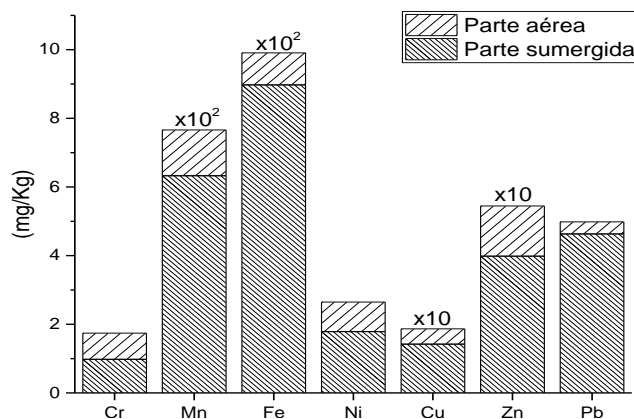


Figura 3.47 Metales en *Arenaria paludicola* de Laguna punto 1

Los valores del factor de traslocación fueron menores a uno en esta especie y en este caso el Cr fue el metal más trasladado a las estructuras aéreas de la planta, mientras que el Pb se concentró en la parte sumergida.

Metal	Cr	Ni	Zn	Cu	Mn	Fe	Pb
	0.77 >	0.48 >	0.36 >	0.31 >	0.21 >	0.1 >	0.07

b) Laguna punto 2

En el segundo punto de muestreo de la Laguna se encontraron tres especies de plantas: *H. ranunculoides*, *E. crassipes* y *B. aurea*, cuyos resultados de bioacumulación se describirán en ese orden.

En este punto de la Laguna *H. ranunculoides* hiperacumuló Mn, Fe y Cu.

Metal	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni
	15,406.71 >	1,962.34 >	1,224.68 >	1,069.59 >	200.85

Los valores del factor de acumulación de metales solubles mostraron la misma tendencia que los metales totales.

Metal	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni
	661,426.1 >	3,875.32 >	3,324.13 >	1,123.09 >	540.51

La Figura 3.48 muestra las concentraciones de metales en *H. ranunculoides* donde existe mayor Mn, seguido por Fe, Zn, Cu, Ni y Pb. Solo se reporta Pb en la parte sumergida, ya que los valores de la parte aérea fueron menores al límite de detección.

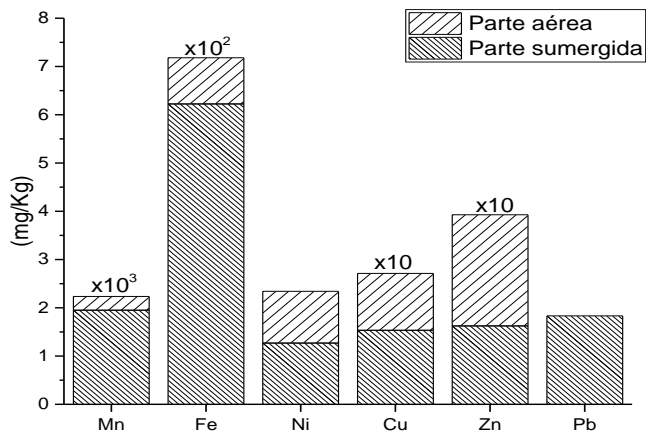


Figura 3.48 Metales en *Hydrocotyle ranunculoides* de Laguna punto 2

El factor de traslocación de fueron muy altos para Zn; altos para Ni y Cu; y bajos para Fe y Mn.

Metal	Zn	Ni	Cu	Fe	Mn
	1.41 >	0.84 >	0.76 >	0.15 >	0.14 >

En cuanto a *E. crassipes* en el punto 2 de la Laguna se encontró hiperacumulación de Mn, Fe y Zn. En todos los puntos de muestreo de la Laguna el Zn total y soluble rebasó el valor recomendado para la protección de la vida acuática, en el punto dos se registró la mayor cantidad de Fe total y soluble.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	37,798.31 >	3,207.45 >	1,106.27 >	836.57 >	355.31

El factor de acumulación de metales solubles mostró que *E. crassipes* absorbe grandes cantidades de Mn, seguido de Fe, Cu, Zn y Ni.

Metal	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni
	1,622,720.63 >	6,334.21 >	2,270.7 >	1,161.59 >	956.17

Se encontró mayor concentración de Mn, Fe y Zn en las estructuras de *E. crassipes* (Figura 3.49).

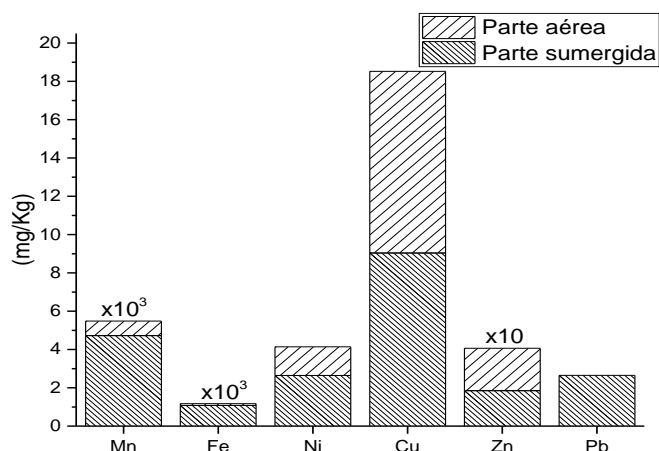


Figura 3.49 Metales en *Eichhornia crassipes* de Laguna punto 2

El factor de traslocación fue muy alto para Zn y Cu; alto en Ni y bajo para Mn y Fe. El Pb sólo se detectó en las estructuras sumergidas.

Metal	Zn	Cu	Ni	Mn	Fe
	1.19 >	1.04 >	0.56 >	0.16 >	0.08

La siguiente especie reportada para el punto 2 de la Laguna es *B. aurea*. El factor de bioacumulación de metales totales mostró la hiperacumulación de Mn, Fe y Zn.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	15,603.2 >	3,533.48 >	1,007.75 >	781.81 >	185.43

El factor de acumulación de metales solubles sigue la misma tendencia que en la acumulación de metales totales.

Metal	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni
	669,861.78 >	6,978.07 >	2,122.07 >	1,058.14 >	499.03

Las concentraciones de metales en las estructuras aéreas y sumergidas son representadas en la Figura 3.50.

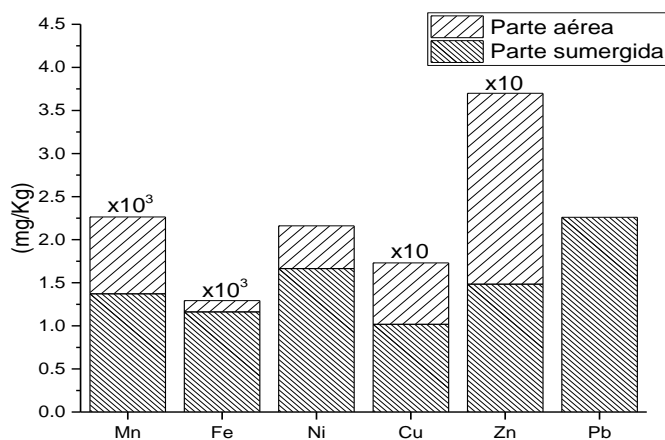


Figura 3.50 Metales en *Bidens aurea* de Laguna punto 2

Al igual que en *H. ranunculoides* y *E. crassipes* el factor de traslocación en *B. aurea* fue muy alto para Zn, alto para Cu y Mn, medio para Ni y bajo en Fe

Metal	Zn	Cu	Mn	Ni	Fe
	1.49 >	0.7 >	0.65 >	0.29 >	0.11

c) Laguna punto 3

El último punto de muestreo en la Laguna es el punto 3 donde se encontraron la especies: *H. ranunculoides*, *E. crassipes*, *M. heterophyllum* y *B. aurea*.

En este punto de muestreo *H. ranunculoides* mostró la hiperacumulación de Mn, Fe y Zn.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	20,229.65 >	3,570.69 >	1,032.87 >	745.77 >	273.6

El factor de acumulación de metales solubles mostró la misma tendencia de acumulación de metales totales, absorbiendo una alta cantidad de Mn principalmente y menores cantidades de Cu y Ni disponibles.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	581,336.49 >	5,583.52 >	2,142.26 >	1,981.63 >	720

La Figura 3.51 muestra las concentraciones de metales encontrados en las estructuras aéreas y sumergidas de *H. ranunculoides*.

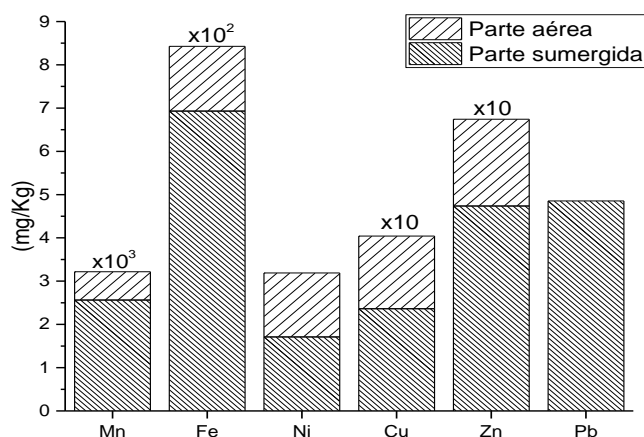


Figura 3.51 Metales en *Hydrocotyle ranunculoides* de Laguna punto 3

Ningún valor del factor de traslocación fue mayor que uno, Ni y Cu tuvieron los valores altos de traslocación; Zn y Mn presentaron valores medios y Fe por otra parte tuvo un valor bajo; en cuanto al Pb sólo se registró en las estructuras sumergidas de la planta.

Metal	Ni	Cu	Zn	Mn	Fe
	0.86 >	0.71 >	0.42 >	0.25 >	0.21

El factor de bioacumulación de metales totales en *E. crassipes* muestra la hiperacumulación de Mn y Fe.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	44,898.36 >	5,406.96	733.11 >	513.65 >	493.97 >

En este punto se presenta un alto factor de acumulación de Mn soluble y los valores siguen la tendencia que el factor de acumulación de metales totales.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	1,290,237.17 >	8,454.84	1,520.53 >	1,364.86 >	1,299.92 >

Para *E. crassipes* en el punto 3 de la Laguna, los metales en las estructuras aéreas y sumergidas se muestran en la Figura 3.52, donde nuevamente el Mn y Fe se encuentran en mayor concentración.

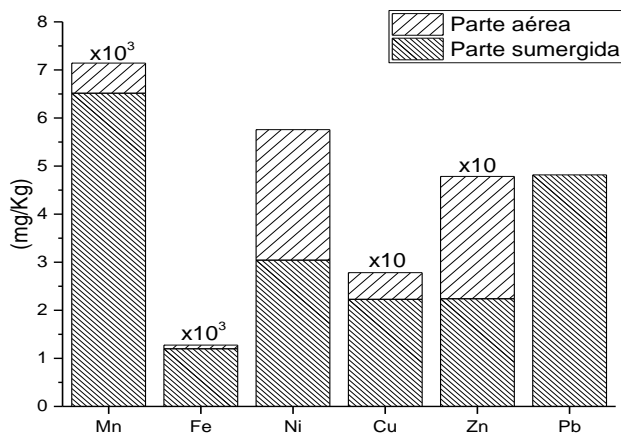


Figura 3.52 Metales en *Eichhornia crassipes* de Laguna punto 3

De acuerdo con el factor de traslocación los resultados fueron: muy alto en Zn; alto en Ni, medio en Cu y bajos para Mn y Fe. El Pb sólo se reporta en la parte sumergida.

Metal	Zn	Ni	Cu	Mn	Fe
	1.13 >	0.89 >	0.24 >	0.096 >	0.06

El factor de bioacumulación de metales totales en *M. heterophyllum* mostró la hiperacumulación de Mn y Fe.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	24,375.03 >	3,750.73 >	473.84 >	371.4 >	210.81

Para el factor de acumulación de metales solubles se encontró un alto valor de Mn, y en menores cantidades Fe, Cu, Zn y Ni.

Metal	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni
	700,461.49 >	5,865.04 >	986.88 >	982.78 >	554.77

M. heterophyllum acumuló en sus estructuras Mn > Fe > Zn > Cu > Ni > Pb, como se muestra en la Figura 3.53.

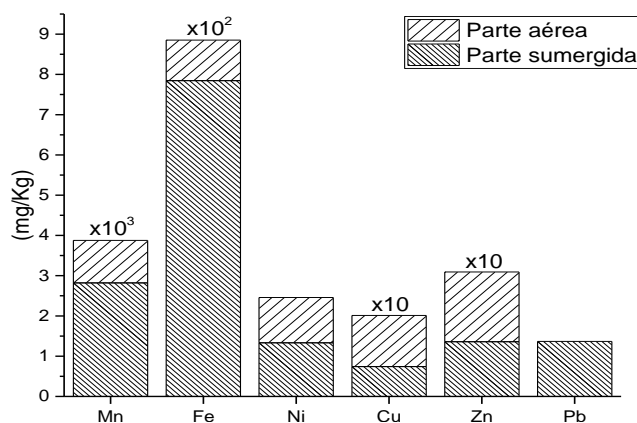


Figura 3.53 Metales en *Myriophyllum heterophyllum* de Laguna punto 3

El factor de traslocación, mostró que para Cu y Zn los valores fueron muy altos, lo que indica que estos metales se encuentran en mayor proporción en las partes aéreas de la especie, mientras que para Ni la traslocación fue alta, para Mn media y en Fe baja. El Pb sólo se determinó en las estructuras sumergidas.

Metal	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe
	1.71 >	1.27 >	0.84 >	0.37 >	0.12

Finalmente *B. aurea* en el punto 3 de la Laguna tuvo hiperacumulación de Mn.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	7,659.84 >	959.47 >	693.63 >	291.99 >	273.25

El factor de acumulación de metales solubles mostró la misma tendencia que la acumulación de metales totales.

Metal	Mn	Fe	Zn	Cu	Ni
	220,119.68 >	1,500.33 >	1,438.65 >	775.86 >	719.04

La Figura 3.54 presenta las concentraciones de metales en las estructuras aéreas y sumergidas de esta especie.

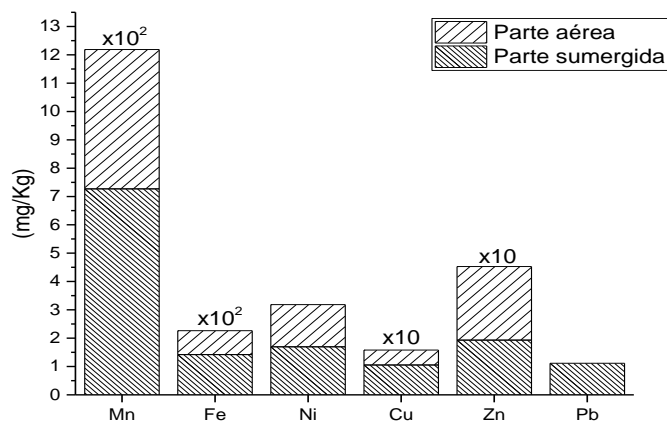


Figura 3.54 Metales en *Bidens aurea* de Laguna punto 3

El factor de traslocación mostró que para Zn es muy alta, mientras para Ni, Mn, Fe y Cu es alta.

Metal	Zn	Ni	Mn	Fe	Cu
	1.34 >	0.87 >	0.67 >	0.59 >	0.5

CONCLUSIONES

- De acuerdo con el factor de bioacumulación, la vegetación analizada en las descargas y en la Laguna tiene el potencial de hiperacumular Mn y Fe. Además, en la Laguna, *Hydrocotyle ranunculoides* mostró potencial para hiperacumular los metales Cu y Zn.
- La bioacumulación de metales pesados en la vegetación depende de las condiciones en las que se encuentre cada especie, así como de su capacidad para absorber los metales y hacerlos parte de su metabolismo o retenerlos en estructuras (sumergidas) donde no tengan efectos nocivos.
- En las descargas las concentraciones de metales se encuentra debajo de los límites máximos permisibles. Sin embargo, existe contaminación de tipo doméstico e industrial, que llega a la Laguna de Chimaliapan de manera constante a través de las descargas identificadas.
- En la Laguna los metales que presentaron valores mayores a los recomendados son el cobre (L3) y el zinc (L1, L2 y L3). El zinc presentó mayor correlación positiva con la presencia de nitrógeno total en la Laguna. La alta concentración de estos metales en el agua, puede estar relacionada con las infiltraciones de residuos de fertilizantes, ya que las poblaciones aledañas hacen uso del suelo para la agricultura.
- Las especies identificadas en este estudio fueron: *Bidens aurea*, que no tolera altas concentraciones de nutrientes, *Arenaria paludicola* que es resistente a condiciones de contaminación y tres especies que son consideradas resistentes e invasivas en los cuerpos de agua (*Eichhornia crassipes*, *Hydrocotyle ranunculoides* y *Myriophyllum heterophyllum*).

- En la Laguna se presenta contaminación orgánica con altas concentraciones de nutrientes que pueden provocar eutroficación y consecuentemente la pérdida de biodiversidad acuática, debido a que existe el riesgo de que la flora autóctona sea desplazada por especies que son tolerantes a contaminantes y que sus altas tasas de evapotranspiración y reproducción contribuyan a la desecación de la Laguna de Chimaliapan.

RECOMENDACIONES

- Especies como *E. crassipes* y *H. ranunculoides* pueden ser aprovechadas en el tratamiento secundario o terciario en el agua de las descargas analizadas, mientras que *A. paludicola* y *M. heterophyllum* podrían ser estudiadas como especies indicadoras y acumuladoras de contaminantes en la Laguna.
- Se sugiere el monitoreo continuo de las condiciones en la Laguna de Chimaliapan y la regulación de las descargas de agua residual, así como la reducción del uso de productos agroquímicos en los cultivos de las zonas agrícolas circundantes.
- Se recomienda el control y el manejo adecuados de especies como *E. crassipes* e *H. ranunculoides* en la Laguna de Chimaliapan. Lo cual permitiría recuperar el equilibrio natural de las comunidades vegetales e impediría la reincorporación, al ambiente acuático, de los contaminantes acumulados por estas especies.

REFERENCIAS

- Abarca F. J. (2007). Técnicas para la evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos. 113-135. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos. INE - SEMARNAT. México.
- Aburto M. A., D. Castillo, I. Ortiz, E. Hernández, Rurik List, Eric Adetutu. (2015). Microbial community and pollutants survey in sediments of billogically important wetlands in Lerma, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 31(1): 7-22.
- Ávila P. (1995). Evaluación de los metales pesados Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb y Hg en agua, sedimento y lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) de la presa José Antonio Alzate, Estado de México. Tesis de Maestría. Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Ávila P. (2001). Dinámica de metales pesados no esenciales en la interacción agua-sedimento-biota de la Presa José Antonio Alzate. Tesis de Doctorado. Centro Interamericano de Recursos de Agua. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Baker, A. J. M., and J. M. Brooks. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements- a review of ecology and phytochemistry. Biorecovery 1: 811-826.
- Brekken A, Steinnes E. (2004). Seasonal concentrations of cadmium and zinc in native pasture plants: consequences for grazing animals. Sci Total Environ 326:181–195.
- Bontrager M., Webster K., Elvin M., Parker I. M. (2014). The effects of hábitat and competitive/ facilitative interactions on reintroduction success of the endangered wetland herb, *Arenaria paludicola*. Plant Ecol 215: 467-478. Springer- USA.
- Carrión C., C. Ponce-de León, S. Cram., I. Sommer, M. Hernandez, C. Vanegas. (2012). Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en Xochimilco para fotorremediación de metales. Agrociencia. Vol. 46, número 6:609-620.

- Capó, M.A. (2003). La Ecotoxicología, una ciencia de hoy. Medicina Balear. Vol. 18. No. 3. Madrid.
- CCA Comisión para la Cooperación Ambiental. (1999). Áreas Importantes para la Conservación de las aves de América del Norte. Directorio de 150 sitios relevantes. Quebec.
- CEH Center for Ecology & Hydrology. (2004). Information sheet *Myriophyllum aquaticum* Parrot's feather. CAMP, CEH, Crowmarsh Gifford, Oxon.
- CEH Center for Ecology & Hydrology. (2011). *Myriophyllum aquaticum* (vell.) Verdcourt. A guide to identification, Risk Assesment and Managment. PlantProtectionService, UK.
- Ceballos, G. (2003). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Instituto de Ecología UNAM. México.
- CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2009). Malezas de México - Ficha: *Bidens aurea*. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/bidens-aurea/fichas/ficha.htm>
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2014). Estadísticas del agua en México. SEMARNAT. México.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2016). Ley Federal de Derechos. Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales. pp 20-24. México.
- CONANP. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2012). Humedales mexicanos registrados como sitios Ramsar. <http://ramsar.conanp.gob.mx/sitios.php>
- Connell, D.W., G.J. Miller. (1984). Chemistry and Ecotoxicology of Pollution. John Wiley & Sons, NY.
- Cordes K. B., Mehra A., Farago M. E., Banerjee D. K. (2000). Uptake of Cd, Cu, Ni and Zn by the water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms from pulverized fuel ash (PFA) leachates and slurries. *Environmental Geochemistry and Health* 22: 297-316.
- Corona Moreno M. G, M. T. Reyes Ruiz, J. A. Dorasco Rodríguez, P. Rodríguez Salinas, O. de la Fuente Araujo, E. J. López Patiño. Estudio de Caso:

- Ciénegas del Lerma. Diplomado en Humedales y otros Ecosistemas Acuáticos. (2005). INE. México.
- Crites R. y Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Edit. Mc Graw Hill. Colombia.
- Curt Fernández de la Mora M. D. Macrofitas de interés en fitodepuración. (http://www.cienciasmarinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%207.pdf) Consultado: junio, 2015.
- Cruz F., G. (2006). Ecología del suelo. Un enfoque hacia la nutrición mineral de plantas superiores. Laboratorio de Edafología y nutrición vegetal, FES Zaragoza, UNAM.
- Dhir B. (2013). Aquatic plant species and removal of contaminants. Phytoremediation: Role of aquatic plants in environmental clean-up. Springer-India.
- DOF. Diario Oficial de la Federación. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECO-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- Duman F., M. Cicek, G. Sezen. (2007). Seasonal changes of metal accumulation and distribution in common club rush (*Schoenoplectus lacustris*) and common reed (*Phragmites australis*). Ecotoxicology. 16: 457-463. Springer Science+Business Media LLC.
- ECOS. Environmental Conservation Online System. (2016). Marsh sandwort (*Arenaria paludícola*). http://ecos.fws.gov/tess_public/profile/speciesProfile.action?sPCODE=Q25H
- Fraume Restrepo Nestor (2007). Diccionario ambiental. Ed. ECOE. Panamá 465p.
- Granados S. I. S., M. del C. Carreño-De León, G. Zarazúa-Ortega, C. Hernández-Becerril, I De la Rosa-Gómez. (2014). Determinación de metales en las descargas de la Laguna de Chimaluapan en San Pedro Tultepec, Lerma, Estado de México. Departamento de Ingeniería Química y División de Estudios de Posgrado e Investigación. Instituto Tecnológico de Toluca.
- Hussner, A., Denys, L. and van Valkenburg, J. (2012): NOBANIS – Invasive Alien Species Fact Sheet – *Hydrocotyle ranunculoides* – From: Online Database

- of the European Network on Invasive Alien Species – NOBANIS
www.nobanis.org Date of access: 20/11/2016.
- Juwarkar, A. A., and S. K. Yadar. (2010). Bioaccumulation and biotransformation of heavy metals. *Biorremediation Technology: Recent Advances*. Capital Publishing Company. 266-284.
- Landolt, E. (1980). Biosystematic investigation of the family of duck weeds (Lemnaceae), 1. Tech. Hochschule, Stiftung Rübél, Zürich. 270pp.
- Lenntech (2016). Zinc and water. Zinc and water: reaction mechanisms, environmental impact and health effects. <http://www.lenntech.com/periodic/water/zinc/zinc-and-water.htm#ixzz4S0g1z3W6>
- Ledezma M., J. A. (2013). Estrategia de conservación *in situ* para *Ambystoma lermaense*. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Universidad Autónoma del Estado de México.
- López J., García O., Grima J., Ballesteros B., Pérez O. (2013). Técnicas de Biorrecuperación *in situ* en acuíferos contaminados por metales pesados. Instituto geológico y minero de España. 233 -243.
- Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971). (2006). 4a. edición. Gland (Suiza): Secretaría de la Convención de Ramsar.
- Marín O. A. y O. M. Pérez. (2013). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales: proceso de lodos activados. Manual de procedimientos. Comisión estatal del agua de Jalisco.
- MAAyMA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013a). Catálogo Español de especies exóticas invasoras. España.
- MAAyMA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013b). Protocolo de muestreo de otro tipo de flora acuática (macrófitos) en lagos. España.

- MAAyMA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013c). Catálogo Español de especies exóticas invasoras. *Hydrocotyle ranunculoides*. España.
- Mesjasz- Przybilowicz J., A. Barbanas, W. Przybilowics. (2007). Comparision of cytology and distrubution of nickel of Ni-hyperaccumulating and non hyperaccumulating genotypes of *Senecio coronatus*. Plant soil. 293: 61-78. Springer Science+Business Media B.V.
- Nagajyoti P. C., Lee K. D., Sreekanth T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. Environ Chem Lett 8:199-216. Springer-Verlag.
- Nava R., C. y Méndez A., M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio) Arch Neurocién (Mex) Vol. 16, No. 3: 140-147; 2011 ©INNN.
- Navarro A., J.P., Aguilar A. I., López M., J.R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Ecosistemas 16 (2): 10-25. Valencia, España.
- Obek E., Sasmaz A. (2011). Bioaccumulation of Aluminium by *Lemna gibba* L. from secondary treated municipal waste water effluents. Environ Contam Toxicol. 86: 217-220. Springer.
- Ochieng Z. E., Lalah J. O., Wandiga S. O. (2007). Analysis of heavy metals and surface sediment in five rift valley lakes in Kenya for assessment of recent increase in anthropogenic activities. Bull Environ Contam Toxicol. 79:570-576. Springer
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Sivaci A., Elmas E., Gümüs F., Ridvan S. E. (2008). Removal of cadmiun by *Myriophyllum heterophyllum* Michx. And *Potamogeton crispus* L. and its effect on pigments and total phenolic compounds. 54: 612-618. Springer.
- Turgut C., Fomin A. (2002). Establishment of standardized growth conditions of *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdcourt to uptake and translocation

- pesticides via roots as requirement for using it in the sediment toxicity testing. *J Appl Bot* ; 76:62 – 5. Springer.
- Valdivia B., M. (2011). Evaluación de la capacidad fitorremediadora a metales pesados de una especie vegetal en el Curso Alto del Río Lerma. Tesis de grado de Maestro en Ciencias En Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Toluca-ININ.
- Viesca G. F. C., Flores S. J. L, Romero C. A. T., Garduño M. M., Quintero S. B. (2011). El impacto de la desecación de la Laguna e Lerma en la gastronomía lacustre se San Pedro Tultepec de Quiroga, Estado de México. *El Periplo Sustentable*. 21: 101-138.
- Zarazúa O. G. (2008). Evaluación de las contribuciones naturales y antropogénicas de los metales pesados Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb y su distribución en el agua y sedimento en el Curso Alto del Río Lerma. Tesis de grado de Doctor en Ingeniería con Énfasis en Ciencias del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México – Centro Interamericano de Recursos del Agua.
- Zarazúa O. G., P. Ávila-Pérez, S. Tejeda, M. Valdivia-Barrientos, C. Zepeda-Gómez, G. Macedo-Miranda. (2013). Evaluación de los metales pesados Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb en sombrerillo de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) del curso alto del río Lerma, México *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29 Suplemento 2: 17-24.
- Zepeda G. C., Antonio N. X., Lot H. A., Madrigal U. D. (2012a). Análisis del cambio de uso de suelo en las Ciénegas de Lerma (1973-2008) y su impacto en la vegetación acuática. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 78: 46-61.
- Zepeda G. C., Antonio N. X., Lot H. A., Madrigal U. D. (2012b). Florística y diversidad de las Ciénegas del río Lerma Estado de México, México. *Acta botánica*. 98: 23-49.

ANEXOS

a) Análisis de varianza de parámetros fisicoquímicos

Anexo 1. Análisis de varianza DBO₅

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	183214.375	1	183214.375	12.4103315	0.01686814	6.60789097
Dentro de los grupos	73815.2619	5	14763.0524			

Anexo 2. Análisis de varianza DQO

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2070327.6	1	2070327.6	7.1039681	0.04459782	6.60789097
Dentro de los grupos	1457162.8	5	291432.559			

Anexo 3. Análisis de varianza OD

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	7.38107143	1	7.38107143	14.4020906	0.01269315	6.60789097
Dentro de los grupos	2.5625	5	0.5125			

Anexo 4. Análisis de varianza PT

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	39.703125	1	39.703125	1.88148501	0.22851498	6.60789097
Dentro de los grupos	105.510075	5	21.102015			

Anexo 5. Análisis de varianza NT

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	133.862876	1	133.862876	4.44148541	0.08890521	6.60789097
Dentro de los grupos	150.696067	5	30.1392133			

Anexo 6. Análisis de varianza N-NO₂

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.09218158	1	0.09218158	9.82380469	0.02583197	6.60789097
Dentro de los grupos	0.04691745	5	0.00938349			

Anexo 7. Análisis de varianza Ph

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	4.74287619	1	4.74287619	35.5076576	0.00190387	6.60789097
Dentro de los grupos	0.66786667	5	0.13357333			

Anexo 8. Análisis de varianza T

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.96428571	1	0.96428571	0.28403114	0.61689793	6.60789097
Dentro de los grupos	16.975	5	3.395			

Anexo 9. Análisis de varianza CE

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	771841.714	1	771841.714	8.55528674	0.03282484	6.60789097
Dentro de los grupos	451090.5	5	90218.1			

b) Coeficientes de correlación entre metales y parámetros fisicoquímicos

Anexo 10. Coeficiente de correlación entre metales totales y parámetros fisicoquímicos de agua en descargas

Metales	Parámetros fisicoquímicos						
	DBO	DQO	OD	pH	CE	PT	NT
Mn	-0.07	0.34	-0.19	0.7	0.11	-0.04	-0.42
Fe	0.08	0.65	-0.0008	0.39	0.2	0.3	0.02
Ni	0.57	0.35	0.46	0.94	0.72	0.21	-0.35
Cu	-0.16	-0.35	-0.28	0.85	0.01	-0.55	-0.91
Zn	0.45	0.91	0.40	0.25	0.51	0.69	0.41

Anexo 11. Coeficiente de correlación entre metales solubles y parámetros fisicoquímicos de agua en descargas

Metales	Parámetros fisicoquímicos						
	DBO	DQO	OD	pH	CE	PT	NT
Mn	-0.65	-0.71	-0.72	0.48	-0.5	-0.9	-0.98
Fe	-0.86	-0.84	-0.89	0.17	0.27	-0.98	-0.88
Ni	0.57	0.56	0.66	-0.61	0.4	0.8	0.98
Cu	0.31	-0.13	0.22	0.85	0.43	-0.18	-0.61
Zn	-0.41	0.27	-0.41	-0.4	0.04	0.21	-0.41

Anexo 12. Coeficiente de correlación entre metales totales y parámetros fisicoquímicos de agua en la Laguna

Metales	Parámetros fisicoquímicos						
	DBO	DQO	OD	pH	CE	PT	NT
Mn	-0.73	0.83	-0.72	-0.90	0.39	-0.28	0.99
Fe	0.53	0.68	-0.80	-0.57	0.97	0.89	0.22
Ni	-0.64	0.90	-0.80	-0.95	0.51	-0.16	0.99
Cu	-0.84	-0.30	0.47	0.16	-0.78	-0.99	0.21
Zn	-0.86	0.69	-0.55	-0.79	0.18	-0.49	0.96

Anexo 13. Coeficiente de correlación entre metales solubles y
parámetros fisicoquímicos de agua en la Laguna

Metales	Parámetros fisicoquímicos						
	DBO	DQO	OD	pH	CE	PT	NT
Mn	-0.87	0.68	-0.53	-0.77	0.16	-0.51	0.95
Fe	0.78	0.40	-0.56	0.27	0.84	0.99	-0.11
Ni	-0.63	0.90	-0.80	-0.95	0.51	-0.16	0.99
Cu	-0.38	-0.80	0.89	0.70	-0.99	-0.79	-0.38
Zn	-0.56	0.93	-0.86	-0.97	0.59	-0.06	0.98