



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE

"EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN LAS PLANTAS
ACUÁTICAS JACINTO DE AGUA (*Eichhornia crassipes*) Y TUL (*Thypa spp*)
UTILIZADAS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES LA
CERRA, VILLA CANALES POR MEDIO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X"

LICDA. EN QUÍMICA INGRID LORENA BENÍTEZ PACHECO

ASESORADA POR

M. Sc. ZENÓN MUCH SANTOS

GUATEMALA, AGOSTO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

"EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN LAS PLANTAS ACUÁTICAS JACINTO DE AGUA (*Eichhornia crassipes*) Y TUL (*Thypa spp*) UTILIZADAS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES LA CERRA, VILLA CANALES POR MEDIO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X"

TESIS

PRESENTADA AL COMITÉ DE LA MAESTRÍA EN CIENCIA Y
TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE

POR

LICDA. QUÍMICA INGRID LORENA BENÍTEZ PACHECO

ASESORADA POR

M Sc. ZENÓN MUCH SANTOS

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO
AMBIENTE

GUATEMALA, AGOSTO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

HONORABLE JUNTA DIRECTIVA

Decano: Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
Secretaria: Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas
Vocal I: Inga. Glenda Patricia García Soria
Vocal II: Inga. Alba Maritza Guerrero Spinola
Vocal III: Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
Vocal IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz

JURADO EXAMINADOR QUE PRACTICÓ EL
EXAMEN PRIVADO DE TESIS

Decano: Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
Secretaria: Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas
Examinador: Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Examinador: Ing. César Augusto Akú Castillo
Examinador: Inga. Gloria Estela Hernández Samayoa

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de tesis titulado

"EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN LAS PLANTAS ACUÁTICAS JACINTO DE AGUA (*Eichhornia crassipes*) Y TUL (*Thypha spp*) UTILIZADAS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES LA CERRA, VILLA CANALES POR MEDIO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X"

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado en junio de 2007

LICDA. INGRID LORENA BENÍTEZ PACHECO

AGRADECIMIENTOS

A DIOS: Por la bendición de permitirme cumplir mis metas y anhelos, sobre todo concederme la vida y una familia que me apoya y nunca me abandona.

A MIS ASESORES Doctora Ma. Dolores Galindo Riaño por su tiempo, experiencia y compromiso con la educación.

Ing. Zenón Much Santos, por el apoyo brindado.

Ing. César Alfonso García Guerra, por su experiencia, buena voluntad y compromiso con la investigación.

A LAS INSTITUCIONES Que contribuyeron con la asesoría, investigación y ejecución de este proyecto, Universidad de Cádiz, Universidad de San Carlos de Guatemala, Autoridad para el manejo sustentable del lago de Amatitlán, -AMSA- Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Facultad de Ingeniería y Centro de Investigaciones de Ingeniería.

A PROFESIONALES,
TÉCNICOS Y PERSONAL
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

LA CERRA –AMSA- Por su invaluable colaboración que sin su apoyo no se realiza este estudio.

DEDICATORIA

- MI PAPÁ Gregorio Benítez Girón por su ejemplo, su amor, lucha, apoyo y consejos, papito gracias por estar siempre a mi lado.
- MI MAMÁ Aura Pacheco de Benítez, siempre estas en mi corazón, una oración a tu memoria.
- MI ESPOSO Hugo Pascual R, *vida te amo*, eres mi fortaleza, mi lucha, la palabra de aliento que me empuja a seguir que con tu apoyo, ayuda y amor completé otra meta.
- MIS HIJOS Rodrigo Alejandro, Susana Paola y Erick Andrés, los amo bebes, son mi regalo más preciado convertido en amor, lucha e inspiración.
- MIS HERMANAS Claudia y Karla, las amo y las necesito deseo compartir con ustedes metas iguales.
- Fernanda, Javier, Julio, Liliana y Gaby vamos que ustedes siguen.
- TIOS, TIAS Por sus consejos y cariño gracias.
- COMPAÑEROS EN GENERAL Mi amistad sincera

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	No. Página
Índice de ilustraciones	V
Índice de Tablas	IX
Lista de símbolos	XI
Glosario	XIII
Resumen	XVII
Objetivos	XIX
Hipótesis	XXI
Introducción	XXIII
Antecedentes	XXVII
Justificación	XIX

CAPÍTULO 1

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA PLANTA

1.1 Área del Proyecto	1
1.2 Geología de la Zona	1
1.3 Características ambientales de la zona	1
1.4 Flora y fauna	2
1.5 Climatología	2
1.6 Hidrometría	2
1.7 Mapa de ubicación de la planta	3

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES EN ESTUDIO

2.1 Jacinto acuático (<i>Eichhornia crassipes</i>)	5
2.2 Tul (<i>Thypha spp</i>)	8
2.3 Mecanismos de depuración	11
2.3.1 Eliminación de sólidos en suspensión	11
2.3.2 Eliminación de materia orgánica	11

2.3.3	Eliminación de nitrógeno	12
2.3.4	Eliminación de fósforo	12
2.3.5	Eliminación de microorganismos patógenos	12
2.3.6	Trazas de metales	12
2.4	Interrelación de las macrófitas y el efecto depurador	12
2.5	El Efecto depurador	19
2.6	La Biorremediación	19
2.6.1	Degradación enzimática	20
2.6.2	Remediación microbiana	20
2.6.3	Fitoremediación	21
2.7	Aplicación de las plantas como mecanismos correctivos para la contaminación por metales pesados	22
2.7.1	Fitoextracción o fitoacumulación	22
2.7.2	La Rizofiltración	23

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1	Materiales y Métodos	25
3.1.1	Trabajo de campo	25
3.1.2	Trabajo de Laboratorio	26
3.1.2.1	Digestión ácida del material vegetal (hoja y raíz)	28
3.1.2.2	Cuantificación mineral	30
3.2	Infraestructura física	32
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1	Especie Jacinto Acuático (<i>Eichhornia crassipes</i>)	34
4.1.1	Biofiltro 1 Canal 2	34
4.1.2	Biofiltro 2 Canal 2	38
4.1.3	Biofiltro 3 Canal 2	40
4.1.4	Laguna anaeróbica 3	41

4.2	Especie Tul (<i>Thypa spp</i>)	43
4.2.1	Biofiltro 1 Canal 4	44
4.2.2	Biofiltro 2 Canal 4	46
4.2.3	Biofiltro 3 Canal 4	47
	CONCLUSIONES	53
	RECOMENDACIONES	55
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
	ANEXO A	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

No.	FIGURAS	PAG.
1	Mapa de ubicación de la Planta de Tratamiento La Cerra de Villa Canales	03
2	Especie Jacinto Acuático – <i>Eichhornia crassipes</i> -	05
3	Características morfológicas del Jacinto Acuático	05
4	Morfología de la Raíz del Jacinto Acuático	06
5	Vista Laguna anaeróbica 3 Planta de Tratamiento La Cerra de Villa Canales	08
6	Especie Tul – <i>Thypha spp</i>	09
7	Sistema Rizomático del Tul	10
8	Proceso de Fitoacumulación en la Planta	23
9	Proceso de rizofiltración en la macrófitas	24
10	Muestreo laguna anaeróbica 3	26
11	Muestreo en el biofiltro 1 (canal 2)	26
12	Proceso de secado, Secador solar de la Facultad de Agronomía-USAC	27
13	Balanza de Humedad, Laboratorio de Química Industrial	27
14	Molienda de las diferentes fracciones de las macrófitas	27

15	Muestras de Jacinto acuático y Tul, molidas e identificadas por fracción de la planta	28
16	Determinación de pesos de las diferentes fracciones de las muestras	29
17	Mufla, Sección de Química Industrial	29
18	Digestión ácida de las muestras	29
19	Equipo de Fluorescencia de Rayos X, Lab. De Fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia- USAC	31
20	Lámpara UV. Lab. Fisicoquímica. Facultad CCQQ y Farmacia.	31
21	Uso del Programa SAX.	31
22	Río Villalobos, Guatemala	33
23	Concentraciones de metales en la raíz <i>E. crassipes</i> del biofiltro 1, canal No. 2	37
24	Concentraciones de metales en la hoja <i>E. crassipes</i> del biofiltro 1, canal No. 2	37
25	Concentraciones de metales en la raíz <i>E. crassipes</i> del biofiltro 2, canal No. 2	39
26	Concentraciones de metales en la hoja <i>E. crassipes</i> del biofiltro 2, canal No. 2	39
27	Concentraciones de metales en la raíz <i>E. crassipes</i> del biofiltro 3, canal No. 2	41

28	Concentraciones de metales en la hoja <i>E. crassipes</i> del biofiltro 3, canal No. 2	41
29	Concentraciones de metales en la raíz <i>E. crassipes</i> de la Laguna anaeróbica 3	43
30	Concentraciones de metales en la hoja <i>E. crassipes</i> de la Laguna anaeróbica 3	43
31	Concentraciones de metales en la raíz de la especie <i>Thypha</i> spp del biofiltro 1, canal No. 4	45
32	Concentraciones de metales en la hoja de la especie <i>Thypha</i> spp del biofiltro 1, canal No. 4	45
33	Concentraciones de metales en la raíz de la especie <i>Thypha</i> spp del biofiltro 2, canal No. 4	47
34	Concentraciones de metales en la hoja de la especie <i>Thypha</i> spp del biofiltro 2, canal No. 4	47
35	Concentraciones de metales en la raíz de la especie <i>Thypha</i> spp del biofiltro 3, canal No. 4	48
36	Concentraciones de metales en la hoja de la especie <i>Thypha</i> spp del biofiltro 3, canal No. 4	49

ÍNDICE DE TABLAS

No.	DESCRIPCIÓN	PAG
1	Concentraciones de metales en muestras de <i>E. crassipes</i> (hoja y raíz) del biofiltro 1 en el canal No. 2	35
2	Metales descritos en la bibliografía según su toxicidad y disponibilidad en un ambiente hidrológico (Wodd 1974).	36
3	Concentraciones de metales en muestras de <i>E. crassipes</i> (hoja y raíz) del biofiltro 2 en el canal No. 2	38
4	Concentraciones de metales en muestras de <i>E. crassipes</i> (hoja y raíz) del biofiltro 3 en el canal No. 2	40
5	Concentraciones de metales en muestras de <i>E. crassipes</i> (hoja y raíz) de la laguna anaeróbica	42
6	Concentraciones de metales en muestras de <i>Thypha spp</i> (hoja y raíz) del biofiltro 1 en el canal No. 4	44
7	Concentraciones de metales en muestras de <i>Thypha spp</i> (hoja y raíz) del biofiltro 2 en el canal No. 4	46
8	Concentraciones de metales en muestras de <i>Thypha spp</i> (hoja y raíz) del biofiltro 3 en el canal No. 4	48
9	Concentraciones máximas y mínimas detectadas en las	

	macrófitas <i>E. crassipes</i> y <i>Thypha spp</i> en la planta de tratamiento de Villa Canales	49
10	Factores de distribución F_D (R/H) de la especie <i>E. crassipes</i> en los biofiltros de la Planta de tratamiento de Villa Canales	50
11	Factores de distribución F_D (R/H) de la especie <i>Thypha spp</i> en los biofiltros de la Planta de tratamiento de Villa Canales	51

LISTA DE SÍMBOLOS

AMSA	Autoridad para el Manejo sustentable del Lago de Amatitlán
F_D (R/H)	Factor de distribución Raíz / Hoja
g	Gramos
mL	Mililitros
NTK/Ha.d	Nitrógeno total por método Kiehljald por hectárea y día
ND	No detectable
PM	Peso molecular
ppm	Partes por millón
Ca	Calcio
V	Vanadio
Mn	Manganeso
Fe	Hierro
Ni	Níquel
Cu	Cobre
Zn	Zinc
As	Arsénico
Pb	Plomo
Rb	Rubidio
K	Potasio
Cr	Cromo
Sr	Estroncio
Ti	Titanio
Hg	Mercurio

GLOSARIO

Biofiltro	También denominados filtros biológicos, son dispositivos que eliminan una amplia gama de compuestos contaminantes de una corriente de fluido (aire o agua) mediante un proceso biológico.
Bioacumulación	El término bioacumulación hace referencia a la acumulación neta, con el paso del tiempo, de metales (u otras sustancias persistentes) en un organismo a partir de fuentes tanto bióticas (otros organismos) como abióticas (suelo, aire y agua).
Biomasa	Es el conjunto de recursos forestales, plantas terrestres y acuáticos, residuos y subproductos agrícolas, ganaderos urbanos e industriales. Esta fuente energética puede ser aprovechada mediante su combustión directa a través de su transformación en biogás, bioalcohol, etcétera.
Fitoremediación	Uso de plantas, y de su microbiota asociada para reparar suelos o aguas subterráneas contaminadas, Las técnicas de fitoremediación incluyen la utilización de enmiendas de suelo y técnicas agrónomas para trasladar, contener o convertir los contaminantes del medio en una forma química que disminuya su disponibilidad química o biológica.

- Fluorescencia de Rayos X** La espectroscopia de rayos X, es un método de análisis elemental cualitativo y cuantitativo no destructivo, basado en la medición de longitudes de onda o energía de rayos X, emitidas por la muestra después de ser bombardeada por una radiación primaria,
- Laguna anaeróbica** Son lagunas profundas y en las mismas casi no se encuentra oxígeno disuelto. Actúan como un digestor en la que las bacterias anaeróbicas descomponen la materia orgánica. Son usadas principalmente para realizar el tratamiento de aguas urbanas e industriales con alta carga orgánica. El objeto primordial es la reducción de contenido en sólidos y materia orgánica.
- Planta Acuática** También llamadas plantas hidrófilas, hidrófitas, hidrófiláceas o higrófitas. Son plantas adaptadas a los medios muy húmedos o acuáticos. Éstas plantas pueden encontrarse tanto entre las algas como entre los vegetales vasculares: briofitos, pteropsidas y angiospermas (familia de las monocotiledóneas y de las dicotiledóneas). Su adaptación al medio acuático es variable. Se pueden encontrar diferentes grupos de plantas: unas totalmente sumergidas, otras las más numerosas, parcialmente sumergidas o con hojas flotantes.
- Metales pesados** Elementos químicos del grupo de los metales con densidad superior a 4.5 g/cm^3 y masa atómica alta.

Macrófitas

Son plantas superiores, algas, musgos o briofitas macroscópicas, adaptadas a la vida en el medio acuático. Son importantes componentes ecológicos de los sistemas acuáticos al ser productoras primarias que proveen hábitat para invertebrados.

RESUMEN

En Guatemala no se dispone de estudios que hayan documentado concentraciones de metales pesados en plantas acuáticas que estén siendo utilizadas como depuradoras de aguas residuales.

En este estudio se realizó un muestreo de 2 tipos de plantas acuáticas (macrófitas) Jacinto Acuático (*Eichhornia crassipes*) y Tul (*Thypha spp*) de la laguna anaeróbica 3 y del sistema de biofiltros (canales de depuración) respectivamente de la Planta de Tratamiento La Cerra de Villa Canales actualmente administrada por la autoridad para el manejo sustentable del lago de Amatitlán –AMSA- (Ver figura 1).

Las muestras se ensayaron por medio de fluorescencia de rayos x analizando dos secciones de la planta, raíz y hojas, con el objetivo de determinar la concentración de metales pesados y establecer el nivel y la distribución de los mismos en las fracciones de la planta.

Los resultados muestran la presencia de elementos como calcio, vanadio, manganeso, hierro, níquel, cobre, zinc, arsénico, plomo, rubidio, potasio, cromo, estroncio y titanio, en las diferentes fracciones de la plantas y con cierta tendencia a presentar concentraciones relativamente importantes, constituyendo una preocupación especial cuando se requiera dar un uso final a la biomasa obtenida después de que ha terminado su actividad depuradora dentro de los biofiltros y laguna anaeróbica en la planta de tratamiento.

Como conclusión general se puede afirmar que este sistema, aunque poco difundido en Guatemala, es una buena alternativa para tratar los efluentes de actividades industriales. La fitoremediación es un proceso de bajo costo y

rápido con el que pueden llevarse a cabo ciertos procesos degradativos, pero requieren de un control final de la biomasa que se produce y su contenido es un potencial contaminante.

Las dos plantas acuáticas estudiadas (jacinto acuático y tul) mostraron bioacumulación de calcio, vanadio, manganeso, hierro, níquel, cobre, zinc, arsénico, plomo, rubidio, potasio, cromo, estroncio y titanio en niveles significativos y variables y se hizo más evidente en las raíces que en las hojas independientemente de su origen, es decir, laguna anaeróbica o biofiltros.

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar y analizar la distribución de metales pesados en las plantas acuáticas jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y tul (*Thypha spp*) utilizados en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Cerra” de Villa Canales medio de la técnica de fluorescencia de rayos X.

ESPECÍFICOS

1. Establecer la presencia de metales pesados en el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) utilizados en la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra.
2. Evaluar y analizar las concentraciones de metales pesados distribuidos en las hojas y raíces del jacinto de agua utilizado en la laguna anaeróbica 3 de la planta de tratamiento de Villa Canales.
3. Establecer la presencia de metales pesados en el tul (*Thypha spp*) utilizado en la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra.
4. Evaluar y analizar las concentraciones de metales pesados distribuidos en las hojas y raíces del tul utilizada en el sistema de biofiltros en la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra.
5. Comparar en los diferentes tejidos (hojas y raíces) del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y tul (*Thypha spp.*) las variaciones de metales pesados.

HIPÓTESIS

Existen variaciones significativas de metales pesados en los diferentes tejidos (hoja y raíces) de los biofiltros jacinto de agua y tul utilizados como depuradores en la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra, Villa Canales.

INTRODUCCIÓN

Los humedales han protagonizado durante su existencia en forma equilibrada plantas de tratamiento de las aguas residuales de la naturaleza. Estas hacen usos de un complejo ecosistema en el cual se combinan microorganismos invertebrados y macrófitas (plantas acuáticas) que degradan y reciclan los nutrientes que se encuentran en el agua.

La sociedad a medida que ha avanzado en su desarrollo **ha pasado de verter los residuos líquidos en los humedales y ha construido obras de concreto**, especializadas para reducir las cargas contaminantes de los mismos. Las plantas de tratamiento de residuos líquidos son estructuras altamente demandantes de energía, por lo que en la actualidad son costosas de construir y operar.

Con la moderna arquitectura, se ha reiniciado la utilización de organismos vivos para descontaminación de residuos. Sin embargo, ya no se hace directamente en la naturaleza, sino bajo condiciones controladas, en estructuras construidas para cultivar los organismos vivos.

Actualmente, se han desarrollado diversas biotecnologías para el tratamiento de aguas residuales, tales como: los sistemas de macrófitas en lagunas, macrófitas de flujo subsuperficial y los de macrófitas en flotación entre otros. En Guatemala, en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Cerra” de Villa Canales específicamente, se ha desarrollado un sistema de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico e industrial, haciendo uso de un sistema de macrófitas en lagunas y macrófitas en flotación denominado *filtro verde* o *biofiltros*, el

cual consiste en poner en flotación las plantas acuáticas que, normalmente, se enraízan en el fondo de los humedales.

La principal función de los biofiltros es la de un tratamiento terciario de aguas residuales donde se remueven los nutrientes útiles para las plantas, siendo los principales nutrientes a remover el nitrógeno (N) y el fósforo (P). La forma química de nitrógeno que las plantas asimilan de mejor manera es el ión nitrato (NO_3^-), y del fósforo es el ión fosfato (PO_4^{-3}), los cuales se logran a partir de aguas residuales crudas, atravesando por sistemas de tratamiento primario y secundario.

La descontaminación por los filtros verdes se da a través de dos mecanismos. Primero, por una densa maraña de raíces en donde son retenidos físicamente los residuos clarificando el agua; segundo, en los residuos retenidos se encuentran el nitrógeno y fósforo en las formas aprovechables por las macrófitas los cuales son absorbidos de forma directa. También existen otras formas de nitrógeno y de fósforo, que aún no están disponibles para las macrófitas las cuales son atacadas por una gran cantidad de microorganismos asociados al sistema radicular, los cuales degradan dichas formas a nitrato y fosfato haciéndolos disponibles para las mismas.

Poco a poco, el sistema radicular de las macrófitas va formando por acumulación de sólidos un sustrato de apariencia lodosa, sobre el cual germinan semillas de gran variedad de especies vegetales traídas por la ornitofauna asociada a las macrófitas sembradas originalmente creando de esta manera un complejo ecosistema que combina lo natural con lo artificial. Debido a que el objetivo de poner a flotar macrófitas que, por naturaleza enraízan en el suelo es crear con sus raíces un denso

filtro, no se puede permitir que dichas raíces lleguen a tener contacto con el suelo o fondo natural del sistema acuático.

En Guatemala los filtros verdes han sido recientemente introducidos por AMSA (Autoridad para el manejo sustentable de la cuenca del lago de Amatitlán), instalando un sistema piloto en una planta de tratamiento convencional, que posee una pila de oxidación y un sedimentador de lodos. Dicha planta fue diseñada y construida en la década de los setenta. Para instalar el biofiltro, se amplió el área y se excavaron canales (capacidad total de 775m³ y 8,5 horas de tiempo de residencia del agua), que posteriormente se impermeabilizaron para hacer la siembra de la planta filtrante.

Los biofiltros que posee AMSA en la planta de tratamiento de aguas residuales de Villa Canales, son crecimiento foliares de *Thypha* spp (comúnmente conocida como Tul) de un crecimiento aproximado de 3 a 5 cm por día, lo que supone una alta tasa de remoción de nutrientes de las agua residuales. Además, ésta se encuentra ampliamente difundida en las riberas del Lago de Amatitlán. Asimismo, la laguna anaeróbica 3 se encuentra completamente poblada de la especie *Eichhornia crassipes* (ninfa o jacinto acuático) la cual ayuda a obtener buenas eficiencias en la remoción de los contaminantes más comunes.

El sistema de biofiltros es el encargado de dar el tratamiento terciario a las aguas del río Villalobos y del afluente captado de parte de la población de Villa Canales siendo éstas de origen doméstico e industrial. En aguas residuales domésticas, que no presentan altas concentraciones de metales pesados, el follaje del tul puede ser utilizado para la alimentación animal, caso que no sucede en Guatemala debido a

que una fuente grande de contaminación que llega a la planta de tratamiento de Villa Canales lo constituye el agua de uso doméstico no tratada y de cerca de unas 3193 industrias reportadas distribuidas en varias ramas como: textiles, alimenticias, metalúrgicas, galvanoplásticas, químicas, agroquímicas, curtiembres, jabones y cosméticos, yeso, cerámica, entre otras. Éstas se encuentran principalmente en las zonas 11 y 12 de la ciudad Capital y en el Municipio de Villa Canales.

Actualmente, en Guatemala, es reducido el uso de macrófitas como plantas acuáticas que actúan como filtros biológicos que pueden absorber o estabilizar **metales pesados** o bien degradar componentes orgánicos, realizando una fitocorrección de los efluentes contaminados. Es por ello, que el objetivo de la presente investigación es realizar una evaluación del contenido de metales pesados que poseen las plantas acuáticas jacinto acuático (*E. crassipes*) y tul (*Thypha spp*) utilizadas actualmente en la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra de Villa Canales.

ANTECEDENTES

Las plantas de tratamiento de aguas residuales han sido objeto de diversos estudios, de manera separada con la finalidad de conocer los diversos comportamientos y concentraciones de contaminantes y los sistemas de depuración que se llevan a cabo. En la planta de tratamiento de aguas residuales “la Cerra” de Villa Canales la actividad depuradora es intensa y variada puesto que su función radica en el tratamiento de una fracción del río Villalobos previo a su ingreso al Lago de Amatitlán (ver figura 1).

La autoridad para el manejo sustentable de la cuenca del Lago de Amatitlán -AMSA- ha realizado varios estudios con el fin de determinar las condiciones óptimas de depuración de las aguas del río Villalobos con la finalidad de preservar la belleza del Lago de Amatitlán.

En la actualidad, las plantas acuáticas son utilizadas en el biomonitoreo y fitoremediación de metales en aguas contaminadas que AMSA ha desarrollado en su sistema de tratamiento, haciendo uso de sistema de macrófitas en flotación denominado filtro verde, el cual consiste en poner en flotación las plantas acuáticas. El sistema de biofiltros será el encargado de dar el tratamiento terciario a las aguas del Río Villalobos

En Guatemala no se dispone de estudios que hayan documentado concentraciones de metales pesados en plantas acuáticas que estén siendo utilizadas como depuradoras de aguas residuales de origen doméstico e industrial, por ello, esta investigación será de gran utilidad para conocer la actividad depuradora de sus filtros verdes y poder determinar una función final a la biomasa obtenida en el proceso de depuración.

JUSTIFICACIÓN

La contaminación de los recursos hídricos superficiales es un problema cada vez más grave, debido a que éstos se usan como destino final de residuos domésticos e industriales, sobre todo en las áreas urbanas. Estas descargas son las principales responsables de la alteración de la calidad de las aguas naturales, que en algunos casos llegan a estar tan contaminadas que su potabilización resulta muy difícil y costosa.

El riesgo que representa a la salud la presencia de sustancias químicas es distinto al que suponen los contaminantes microbiológicos porque, por lo general, estos últimos tienen efectos más agudos. Por otra parte, son pocas las sustancias químicas que causan problemas a la salud con efectos inmediatos, en las concentraciones que normalmente pueden detectarse en el agua contaminada, éstos se manifiestan tras largos períodos de exposición, por lo que las sustancias químicas que revisten especial importancia están representadas por los contaminantes acumulativos.

El ambiente puede asimilar efluentes industriales a través de dos rutas principales: mediante la descomposición química en compuestos que ingresan a los ciclos naturales o como alimento para organismos vivos cuyos residuos también pueden ingresar a los ciclos naturales. En algunos casos, la asimilación hace que el tóxico sea más accesible a formas animales superiores. Por ejemplo, las sales de mercurio en los sedimentos pueden ser metiladas por bacterias ingeridas por peces como el metilmercurio y con el tiempo se acumulan en el cuerpo humano.

Según se incrementa la contaminación, en particular en centros urbanos con altas concentraciones de población e industria, la sobrecarga de la capacidad acumulativa natural se vuelve evidente en corrientes de agua, tierra y aire.

Por tal razón, las sustancias tóxicas pueden tener efectos perjudiciales sobre la salud humana y es importante determinar estas concentraciones en los cuerpos de agua y en este caso en los mecanismos de depuración que se utilizan para su recuperación. Actualmente se están utilizando los biofiltros Jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*) y tul (*Thypha spp*), como macrófitas depuradoras pero hasta la fecha se desconocen las concentraciones de metales pesados que se absorben por sus raíces y se distribuyen y acumulan en la planta, por lo que es importante determinar esos niveles de bioacumulación con la finalidad de encontrar los posibles usos de la biomasa que se retira periódicamente de dichos biofiltros y lagunas respectivamente.

CAPÍTULO 1

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

1.1 Área del proyecto.

La planta de tratamiento de aguas se encuentra en el Municipio de Villa Canales al pie del accidente geográfico conocido como la Cerra, aproximadamente a 4 kilómetros hacia el sur de la cabecera municipal sobre la trayectoria del río Villalobos. Se llega al área a través de la ruta departamental que conduce de Villa Canales hacia el Relleno del ferrocarril en el lago, aproximadamente 3 kilómetros asfaltados y un kilómetro de terracería (ver figura 1).

1.2 Geología de la zona.

El área del proyecto se encuentra ubicada en la parte baja de la cuenca localizado dentro del área de aluvión. La formación de estos suelos es sumamente reciente, producto de las actividades antrópicas que se realizan en la parte alta de la cuenca y cuyos sedimentos son arrastrados por las corrientes pluviales, principalmente en los meses lluviosos y depositados a orillas del lago compuestos por limos y arenas volcánicas principalmente. Estos suelos tienen la característica de ser poco cohesivos y permeables, ricos en nutrientes, producto de la actividad agrícola urbana e industrial, por lo que la vegetación crece de manera exuberante.

1.3 Características ambientales de la zona.

El área donde se ubica el proyecto se encuentra contaminada ya que en sus inmediaciones se encuentra el río Villalobos que es el receptor y transporte de la contaminación que se genera en la parte alta de la cuenca. En las aguas del río Villalobos se han hecho monitoreos,

encontrándose contaminantes patógenos y químicos de alta peligrosidad para la salud humana.

1.4 Flora y Fauna.

El área se caracteriza por ser eminentemente agrícola, pudiéndose observar en las inmediaciones de la zona de estudio el cultivo de caña de azúcar, maíz y frijol. Con respecto a la fauna, se pueden observar aves (cenzontle, palomas, clarineros, sanates), reptiles, roedores, marsupiales (tacuacín) y conejos entre otros.

1.5 Climatología.

El clima de la zona es cálido húmedo con temperaturas que oscilan entre 25 °C (la máxima) y 15 °C (la mínima). La altitud del área es de 1206 msnm (metros sobre el nivel del mar) Por último, se estima que la intensidad de lluvia para el área es de 1150 mm de media anual divididos en 120 días de lluvia con una media diaria de 9,6 mm.

1.6 Hidrometría.

El río Villalobos es el afluente principal del lago de Amatitlán. Este río es alimentado por aproximadamente 24 ríos y quebradas que en los últimos 40 años ha visto modificado su caudal, producto del crecimiento urbano y la deforestación, modificando su cauce y longitud de 21,5 kilómetros a 17 kilómetros, lo que viene a incidir en la velocidad y si sumamos el caudal esto está provocando la destrucción de la infraestructura vial, servicios y vivienda, así como el acarreo de 1,500,000 toneladas/año de sedimentos y 80,000 m³ de residuos sólidos, que tienen como receptor final al lago de Amatitlán.

El caudal medio estimado para el río en época seca es de $0,77 \text{ m}^3/\text{s}$., mientras que en época lluviosa se ha estimado en $3 \text{ m}^3/\text{s}$. No obstante, la media anual de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$. En los últimos 20 años la mayor crecida reportada fue para el año de 1,998 (Tormenta Mitch) estimándose en aproximadamente en $700 \text{ m}^3/\text{s}$. En época de lluvia este río puede crecer en un par de horas de $3 \text{ m}^3/\text{s}$. a $80 \text{ m}^3/\text{s}$. convirtiendo este río muy inestable.

1.7 Mapa de ubicación de la Planta de Tratamiento

La planta de Tratamiento La Cerra está ubicada en el Departamento de Guatemala, municipio de Villa Canales (Figura 1)

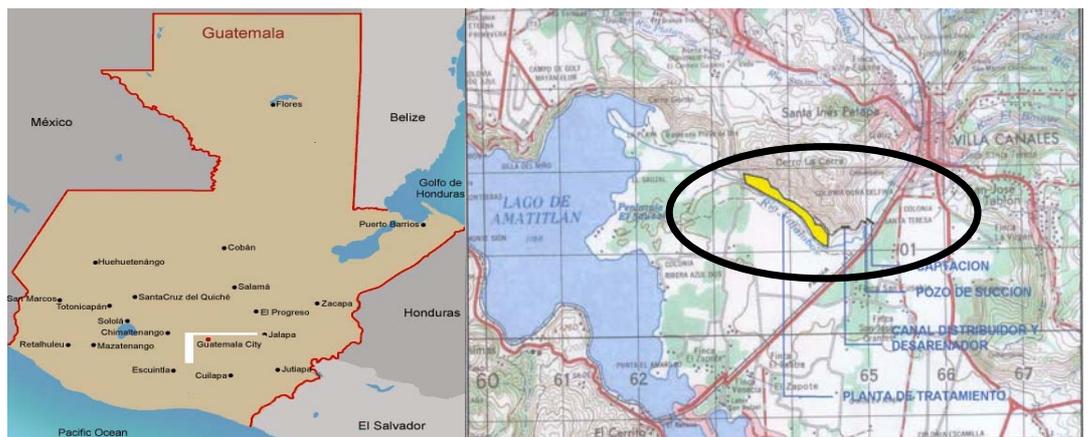


Figura 1. Mapa de ubicación de la planta de tratamiento La Cerra, Villa Canales

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES EN ESTUDIO

2.1 Nombre científico o latino: *Eichhornia crassipes*



Figura 2. Especie jacinto acuático- *Eichhornia crassipes*-

Nombre común o vulgar: Jacinto de agua, Camalote, Lampazo, Violeta de agua, Buchón, Taruya, Lirio de agua Lechuga de agua, Lechuguín ^[1]

Familia: Pontederiaceae (Pontederiáceas).

Origen: cursos de agua de la cuenca del Amazonas, en América de Sur ^[1]. Se han distribuido prácticamente por todo el mundo, láminas acuáticas de jardines en climas templados y cálidos ^[6].



Figura 3. Características morfológicas del jacinto acuático

Características morfológicas: Son consideradas malas hierbas, que pueden obstruir en poco tiempo una vía fluvial o lacustre^[1].

Es una especie flotante de raíces sumergidas. Carece de tallo aparente, provisto de un rizoma, muy particular, emergente, del que se abre un rosetón de hojas que tienen una superficie esponjosa notablemente inflada en forma de globo y forma una vejiga llena de aire (ver Figura 3), mediante la que el vegetal puede mantenerse sobre la superficie acuática^[6].



Figura 4. Morfología de la raíz del jacinto acuático

Las raíces son muy características, negras con las extremidades blancas cuando son jóvenes, (ver figura 4) negro violáceo cuando son adultas^[6].

Usos: para adornar pequeños lagos, embalses, pero sobre todo para estanques y también acuarios^[6].

Ofrece un excelente refugio para los peces protegiéndolos del sol excesivo, de las heladas y a los alevines del embate de los benteveos (*Pitangus sulphuratus*)^[6].

Las raíces constituyen un excelente soporte para el desove de las especies ovíparas (carasisus, carpas, etc.). Incluso aquellos aficionados que críen a sus peces en acuario, en época de reproducción les sería muy útil hacerse de algún ejemplar joven de esta planta para el acuario de cría donde desovarán sus peces ^[6].

Las raíces del Camalote no sólo le servirán de soporte para los huevos, si no que son un refugio para los alevines, e incluso en ellas se desarrolla una microflora que sirve como alimento inicial para los mismos ^[6].

Luz: Necesita para su desarrollo la luz del sol o semisombra. Requiere iluminación intensa, que, si es artificial, deberá ser proporcionada por una rampa luminosa completa. ^[6]

Temperatura: Su desarrollo requiere en invierno que la planta esté protegida de climas fríos y temperaturas heladas, manteniéndola siempre en agua ^[1].

Se cultiva a una temperatura entre 20-30°C. No resiste los inviernos fríos (hay que mantenerla entre 15-18°C en contenedores con una profundidad de al menos 20 cm y una capa delgada de turba en el fondo). Puede rebrotar en primavera si se hiela. Necesita aguas estancadas o con poca corriente e intensa iluminación ^[1].

Reproducción: Esta planta se multiplica mediante división de los rizomas. ^[1]

Durante el verano se reproduce fácilmente por medio de estolones que produce la planta madre, llegan formarse verdaderas “islas” de gran porte ^[1].

Esta especie está considerada entre las 100 especies más invasoras del mundo por la Unión internacional para la conservación de la Naturaleza y Recursos Naturales – UICN-. Es por ello que hoy en día se no se aconseja su utilización, para evitar que se siga extendiendo esta plaga a los ríos, por imprudencia en su uso ^[1].

La consecuencia de su proliferación en ríos y lagos, es cubrir como una manta toda la superficie del río, (ver figura 5) por su fácil reproducción vegetativa y sexual. Esto se debe a que es una especie alóctona sin predadores, ni competidores en muchos sitios.

Como es invasora, puede que al retirar el exceso de un estanque o acuario particular, vaya a parar a entornos naturales y cause estos daños ecológicos ⁽¹⁾.



Figura 5. Vista laguna anaeróbica 3 planta de tratamiento La Cerra de Villa Canales

2.2 Nombre científico o latino: *Thypha spp.*

Nombre común o vulgar: -tul, tutoras, espadañas o aneas,

Familia: Typhaceae Orden Typhales, Subclase Commelinidae ^[5].

Origen: Las **totoras, espadañas, o aneas** (*Typha* spp.) son un género de unas pocas especies de plantas herbáceas acuáticas oriundas del hemisferio norte, y hoy distribuidas en buena parte del mundo. Son frecuentes en pantanos y humedales, formando densas colonias a veces impenetrables. Las colonias de totoras son muchas veces un paso importante en la desecación de lagunas y pantanos, formando una capa de denso tejido orgánico sobre la cual se deposita la tierra. Se las considera en general el único género de la familia de las tifáceas, aunque algunas clasificaciones incluyen también en ella a *Sparganium* ^[5].



Figura 6. Tul (*Thypha spp.*). –Biofiltros–

Las especies de *Typha* son hierbas anuales o perennes, de 1 a 3 m de altura, salvo en *Typha mínima*, que no supera el metro (ver figura 6). Muestran hojas lineares o tubuladas, alternas, en la base de un único tallo floral desnudo; presentan rizomas superficiales que echan zarcillos, constituyendo éste su principal forma de propagación ^[5].

Las plantas son monoicas, anemófilas, con flores aclamídeas que forman densos racimos en forma de espiga al cabo del tallo floral. La flor

masculina aparece exactamente en la punta y se reduce a 2 a 5 estámenes desnudos; por debajo de ésta se forma la densa inflorescencia femenina, de entre 10 y 40 cm de longitud y 1 a 4 cm de diámetro. Las flores femeninas tienen el ovario unilocular. El fruto es aqueniforme; las semillas tienen alrededor de 0,2 mm de largo, y se dispersan por anemocoria gracias a un vilano flexible y piloso ^[5].

Hábitat: Las espadañas aparecen en los márgenes lacustres, pantanos y humedales, siendo una de las primeras especies en colonizarlos. *T. latifolia* se encuentra en todas las regiones templadas del hemisferio norte; *T. angustifolia*, también cosmopolita, soporta peor el frío y se extiende por ello menos hacia el norte. Las restantes especies tienen distribuciones más limitadas, siendo *T. domingensis* nativa del sur de los Estados Unidos y Centroamérica, mientras que *T. laxmannii*, *T. mínima* y *T. shuttleworthii* crecen en el sur de Europa y partes de Asia ^[5].



Figura 7. Sistema rizomático del Tul

Función ecológica y usos: El denso sistema rizomático favorece la fijación del suelo, (ver figura 7) previniendo la erosión; en su interior se alojan numerosos insectos y proporciona cobijo a batracios y aves lacustres. Otras aves emplean los restos de la inflorescencia para tapizar

sus nidos. Sin embargo, la facilidad de su aparición hace que se las considere malas hierbas en algunos entornos controlados ^[5].

El rizoma se aprovecha como verdura, con un alto contenido en almidón; esta planta cocida y su polen se emplea como suplemento alimenticio mezclado con harina ^[5].

2.3 Mecanismos de depuración de las macrófitas

Los principales mecanismos de depuración en los que participan las macrófitas y que actúan sobre las aguas residuales industriales son los siguientes:

2.3.1 Eliminación de sólidos en suspensión: Los sólidos se eliminan por sedimentación, decantación, filtración y del conjunto que forma el sustrato del humedal con las raíces y rizomas del tul ^[7].

2.3.2 Eliminación de materia orgánica: La eliminación de la materia orgánica del agua es realizada por los microorganismos que viven adheridos al sistema radicular de la planta y que reciben el oxígeno a través de un sistema de aireación muy especializado. Una parte de la aireación del agua también se realiza por difusión del oxígeno del aire a través de la superficie del agua. También se elimina una parte de la materia orgánica por sedimentación ^[7].

- 2.3.3** Eliminación de nitrógeno: El nitrógeno se elimina por diversos procesos: absorción directa por la planta y, en menor medida, por fenómenos de nitrificación-desnitrificación y amonificación, realizados por bacterias^[7].
- 2.3.4** Eliminación de fósforo: El fósforo se elimina por absorción en el tul, adsorción sobre las partículas de arcilla y precipitación de fosfatos insolubles, principalmente con hierro y aluminio, en suelos ácidos y con calcio en suelos básicos^[7].
- 2.3.5** Eliminación de microorganismos patógenos: Por filtración y adsorción en partículas de arcilla, acción predatoria de otros organismos (bacteriófagos y protozoos), toxicidad por antibióticos producidos por las raíces y por la radiación UV contenida en los rayos solares^[7].
- 2.3.6** Trazas de Metales: Tienen una alta afinidad por adsorción y complejación con materia orgánica y pueden ser acumulados en los humedales. También existen transformaciones microbianas y asimilación por la planta mediante la raíz, la cual atrapa y fija entre sus tejidos concentraciones de metal de hasta de 100 mil veces superiores a las del agua que las rodea^[7].

2.4 Interrelación de las macrófitas y el efecto depurador

En el medio ambiente natural, cuando interacciona el agua, el suelo, las plantas y microorganismos y la atmósfera, se producen procesos físicos,

químicos y biológicos. Los sistemas de tratamiento se diseñan para aprovechar estos procesos con objeto de proporcionar tratamiento al agua^[8].

Los procesos que intervienen en los sistemas de tratamiento natural incluyen muchos de los utilizados en las plantas de tratamiento^[8].

- Sedimentación
- Filtración
- Transferencias de gases
- Adsorción
- Intercambio iónico
- Precipitación química
- Conversión y descomposición biológica
- Procesos propios como la fotosíntesis, la foto-oxidación, y la asimilación de las plantas

A diferencia de los sistemas mecánicos en los que los procesos se llevan a cabo de forma secuencial en diferentes tanques y reactores a velocidades aceleradas como consecuencia del aporte energético, en estos sistemas los procesos se producen a velocidades "naturales" y tienden a realizarse de forma simultánea en un único "ecosistema"^[8].

El sistema de macrófitas es un filtro vivo, es un sistema de tratamiento de aguas a bajo costo, hecho por el hombre de tal forma de emular y maximizar los procesos naturales de purificación conocidos y que se producen en estos sistemas^[8].

Los sistemas de las plantas acuáticas bombean oxígeno desde el aire (atmósfera) hacia las raíces para así poder sobrevivir dentro de su hábitat^[8].

Estos tratamientos son capaces de eliminar, hasta cierto punto, casi todos los constituyentes del agua considerada como contaminantes, tales como:

- Sólidos suspendidos
- Materia Orgánica
- Nitrógeno
- Elementos traza
- Compuestos orgánicos de traza
- Microorganismos

Estos procesos ocurren de la siguiente forma:

- a. *Sólidos suspendidos.*- Los sólidos suspendidos del agua se eliminan por sedimentación, potenciada por las reducidas velocidades de circulación, por la escasa profundidad y por filtración a través de las formas vivas y de los desechos vegetales. En la interfase suelo se produce una eliminación adicional^[8].
- b. *Materia orgánica.*- La materia orgánica degradable presente en el agua, ya sea soluble o insoluble, se elimina por degradación microbiana. Los microbios responsables de esta degradación suelen estar asociados a películas que se desarrollan sobre la superficie de las partículas del suelo, vegetación y desechos vegetales. En general, estos sistemas se diseñan y explotan de

modo que resulte posible mantener condiciones aeróbicas, con la intención de que la degradación de la materia orgánica se realice, principalmente, gracias a la acción de microorganismos aeróbicos, ya que la descomposición aeróbica tiende a ser mas rápida y completa que la anaerobia y por lo tanto, se consiguen evitar los problemas de olores asociados a los procesos de descomposición anaerobia ^[8].

c. *Nitrógeno*.- El nitrógeno es un elemento esencial puesto que forma parte de las proteínas. Las fuentes de nitrógeno en un estanque incluyen principalmente nitrógeno atmosférico (N_2) y productos de descomposición provenientes de materias orgánicas presentes en el estanque. La transformación y eliminación de nitrógeno en estos sistemas implica una serie de procesos y reacciones complejas. Los mecanismos implicados en la eliminación de nitrógeno del agua dependen de la forma en que está presente el nitrógeno, que puede ser como:

- Nitrógeno orgánico
- Nitrógeno amoniacal (NH_3 amoniaco libre o no ionizado y NH_4 amonio ionizado)
- Nitrógeno en forma de nitratos (Nitrito NO_2 y Nitrato NO_3)

Nitrógeno orgánico. El nitrógeno orgánico asociado a los sólidos suspendidos presentes en el agua, se elimina por sedimentación y filtración. El nitrógeno orgánico en fase sólida se puede incorporar directamente al humus del suelo, que consiste en moléculas orgánicas complejas de gran tamaño que contienen carbohidratos complejos, proteínas, substancias proteínicas y ligninas. Parte del nitrógeno orgánico se hidroliza para formar aminoácidos que se

pueden descomponer adicionalmente para producir iones amonio (NH_4)^[8].

Nitrógeno amoniacal.- En estos sistemas de tratamiento, el nitrógeno amoniacal puede seguir diferentes vías de descomposición. El amoniaco soluble se puede eliminar por volatilización directa a la atmósfera en forma de amoniaco gas. Esta vía de eliminación es de un 10%^[8].

Sin embargo, la mayor parte del amoniaco afluyente y del amoniaco convertido se absorbe temporalmente, mediante reacciones de intercambio iónico, sobre las partículas del suelo y sobre las partículas orgánicas dotadas de carga. El amoniaco absorbido es apto para el consumo por la vegetación y los microorganismos, o para la conversión a nitrógeno en forma de nitrato mediante la nitrificación biológica bajo condiciones aeróbicas^[8].

Nitrógeno en forma de nitrato.- No sufre reacciones de intercambio iónico debido a su carga negativa, permanece en disolución, y es transportado como parte del agua percollada. Si no se elimina por consumo de las plantas o por procesos de desnitrificación, el nitrato es lixiviado o percolado alcanzando las aguas subterráneas subyacentes. La vegetación puede asimilar los nitratos, pero ello solo se produce en las proximidades de las raíces durante los periodos de crecimiento activo, la que posteriormente se debería recoger y retirar de sistema.

Los nitratos son fácilmente asimilados para nuevos tejidos por las plantas, o se convierte en nitrógeno elemental por la bacteria de desnitrificación. Algunos nitratos se pierden en los sedimentos^[8].

Esta forma química del nitrógeno participa del proceso denominado desnitrificación o nitrificación biológica, donde los nitratos también se eliminan biológicamente con posterior liberación del óxido nitroso gaseoso y del nitrógeno molecular a la atmósfera. En los sistemas acuáticos la desnitrificación biológica es el principal mecanismo de eliminación de nitrógeno. Para que la desnitrificación sea completa, es necesario que la relación carbono/nitrógeno sea de al menos 2:1^[8].

En la nitrificación, la bacteria del genero *Nitrosomonas* convierte el amoníaco en nitrito, y la bacteria del genero *Nitrobacter* convierte nitrito en nitrato bajo ciertas condiciones. Estas formas inorgánicas pueden ser tóxicas. Por esta razón la amonificación, nitrificación y desnitrificación son procesos importantes en los sistemas de acuicultura^[8].

- d. *Fósforo*.- Los principales procesos de eliminación de fósforo que se producen en los sistemas acuáticos son por adsorción, precipitación química y por el consumo de las plantas. El fósforo, normalmente presente en forma de ortofosfato, es absorbido por minerales arcillosos y determinadas fracciones orgánicas de la matriz del suelo. La precipitación química con calcio (a valores de pH neutros o alcalinos) o con hierro o aluminio (a valores de pH ácidos), se produce a menor velocidad que los fenómenos de adsorción. Así estos sistemas acuáticos, presentan un potencial de eliminación de fósforo limitado^[8].

e. *Elementos traza.*- La eliminación de los elementos traza (principalmente metales) se produce, fundamentalmente, por el mecanismo de adsorción (término que engloba reacciones de adsorción y precipitación) y, en menor grado, mediante la asimilación de algunos metales por parte de las plantas.

Normalmente los metales son retenidos en el suelo o en los sedimentos de los sistemas acuáticos. Así, los rendimientos de eliminación suelen ser menores al 80% debido al contacto limitado con sólidos y sedimento ^[8].

f. *Compuestos Orgánicos a nivel de traza.*- Los compuestos orgánicos de traza se eliminan del agua por volatilización y adsorción, y en menor medida por degradación biológica o fotoquímica ^[8].

En general, los sistemas permiten eliminar una fracción importante de los compuestos orgánicos traza; sin embargo los datos de que se dispone en la actualidad no permiten predecir los rendimientos de eliminación de compuestos individuales.

g. *Microorganismos.*- Los mecanismos de eliminación de las bacterias y parásitos (protozoos y helmintos) comunes en éstos sistemas de tratamiento natural son la muerte, retención, sedimentación, atrapamiento, depredación, radiación, desecación y adsorción. Los virus se eliminan casi exclusivamente por adsorción y posteriormente muerte ^[8].

2.5 Efecto Depurador ⁽⁷⁾

Se ha demostrado que el uso de las plantas macrófitas pueden producir buenas eficiencias en la remoción de los contaminantes más comunes de aguas residuales, siendo significativo las remociones en carga de nitrógeno entre 7 y 38 Kg. de NTK/Ha.d (nitrógeno total por método Kiehdal por hectárea y día) y cargas de fósforo entre 0,9 y 13 Kg. de Pt/Ha.d, (fósforo total por hectárea y día) observándose que el tamaño de la planta así como su sistema radicular influyen en la remoción de contaminantes. Las plantas utilizadas presentan velocidades de crecimiento entre 123 y 487 g/m².d (gramo metro cuadrado por día) (peso húmedo), con un contenido de proteínas entre 25 y 30% (base seca).

2.6 La biorremediación

La biodegradación es el proceso natural por el cual los microorganismos degradan o alteran moléculas orgánicas transformándolas en moléculas más pequeñas y no tóxicas. Sin embargo, este proceso es muy lento y puede acelerarse introduciendo determinadas bacterias o plantas en los ambientes contaminados. Esta intervención se denomina “biorremediación” o “biocorrección” y se define como el empleo de organismos vivos para eliminar o neutralizar contaminantes del suelo o del agua. En los procesos de biorremediación generalmente se emplean mezclas de microorganismos, aunque algunos se basan en la introducción de cepas definidas de bacterias u hongos. Actualmente se están desarrollando microorganismos, algas (especialmente cianobacterias o algas azules) y plantas genéticamente modificadas para ser empleadas en biorremediación.

Básicamente, los procesos de biorremediación pueden ser de tres tipos:

2.6.1 Degradación enzimática

Consiste en el empleo de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Dichas enzimas son previamente producidas en bacterias transformadas genéticamente. Esta aplicación de la biotecnología lleva décadas en el mercado y hoy las compañías biotecnológicas ofrecen las enzimas y los microorganismos genéticamente modificados para tal fin.

2.6.2 Remediación microbiana

Se refiere al uso de microorganismos directamente en el foco de la contaminación. Estos microorganismos pueden ya existir en ese sitio o pueden provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser inoculados en el sitio contaminado (proceso de inoculación). Cuando no es necesaria la inoculación de microorganismos, suelen administrarse más nutrientes con el fin de acelerar el proceso.

Hay bacterias y hongos que pueden degradar con relativa facilidad petróleo y sus derivados, benceno, tolueno, acetona, pesticidas, herbicidas, éteres, alcoholes simples, entre otros. También pueden degradar, aunque parcialmente, otros compuestos químicos como el PCB, arsénico, selenio, o cromo. Los metales pesados como uranio, cadmio y mercurio no son biodegradables, pero las bacterias pueden concentrarlos para que sean eliminados más fácilmente. Estas características también pueden lograrse por ingeniería genética.

2.6.3 Fitoremediación

La fitoremediación es el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados. Aunque se encuentra en desarrollo, constituye una estrategia muy interesante, debido a la capacidad que tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radioactivos, etc. Las ventajas que ofrece la fitoremediación frente a los procesos descritos anteriormente son el bajo costo y la rapidez con que pueden llevarse a cabo ciertos procesos degradativos ^[10].

Según la planta y el agente contaminante, la fitoremediación puede producirse por:

- acumulación del contaminante en las partes aéreas de la planta (Ej. metales pesados de la atmósfera),
- absorción, precipitación y concentración del contaminante en raíces (Ej. metales pesados, isótopos radioactivos).
- reducción de la movilidad del contaminante para impedir la contaminación de aguas subterráneas o del aire (Ej. lagunas de deshecho de yacimientos mineros)
- desarrollo de bacterias y hongos que crecen en las raíces y degradan contaminantes (Ej. hidrocarburos del petróleo, benceno, etc.).
- captación y modificación del contaminante para luego liberarlo a la atmósfera con la transpiración (Ej. mercurio, selenio y metales clorados).

- captación y degradación del contaminante para originar compuestos menos tóxicos (Ej. pesticidas, herbicidas, TNT, etc.)^[10].

2.7 Aplicación de plantas como medidas correctoras para la contaminación por metales

En lugares contaminados con metales, se usan plantas para estabilizar o retirar los metales del suelo y de las aguas subterráneas por medio de dos mecanismos: fitoextracción y rizofiltración^[10].

2.7.1 fitoextracción o fitoacumulación: Consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas (ver figura 8).

Existen variedades de plantas muy adecuadas para este uso debido a que absorben gran cantidad de metales, en comparación con otras especies^[10].

El primer paso para la aplicación de esta técnica es la selección de las especies de planta más adecuada para los metales a eliminar y las características del emplazamiento. Una vez completado el crecimiento vegetativo de la planta el siguiente paso es cortarlas y proceder a su incineración, procediéndose al traslado de las cenizas a un vertedero de seguridad. También se pueden transformar las plantas en abono vegetal para reciclar los metales. El proceso se puede repetir ilimitadamente hasta que la concentración remanente de metales en el suelo esté dentro de los límites considerados aceptables^[10].

La utilidad del método reside en que las cenizas apenas ocuparán el 10% del volumen que ocuparían los desechos en el caso de que el suelo fuese excavado para tratarlo.

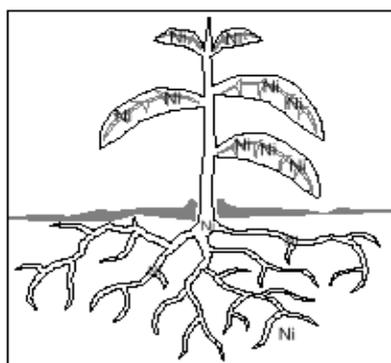


Figura 8. Proceso de fitoacumulación en la planta

Los mejores candidatos para la fitoextracción son el níquel, el cinc y el cobre porque son los preferidos de las 400 plantas, aproximadamente que se sabe que absorben cantidades extraordinarias de metales. Actualmente se están estudiando y experimentando con plantas que absorben plomo y cromo^[10].

2.7.2 La rizofiltración

Es una técnica, aún en proceso de investigación, para descontaminar agua con presencia de metales.

Aunque la rizofiltración es una técnica parecida a la fitoextracción en esta las plantas que se utilizan para descontaminar se cultivan en invernaderos con las raíces sumergidas en agua, en vez de en tierra (ver figura 9).

Cuando el sistema radicular de la planta está bien desarrollado se recoge el agua contaminada del emplazamiento a restaurar, se transporta hasta el lugar de crecimiento de las plantas (invernadero) y se colocan las plantas en esa agua. Las raíces van a absorber los contaminantes del agua. A medida que las raíces se van saturando en agua se van cortando y eliminando ^[10].



Figura 9. Proceso de rizofiltración en la macrófitas.

Además de extraer metales del agua esta técnica puede ser utilizada para eliminar residuos industriales, escorrentía de tierras agrícolas, drenaje de minas de ácidos y contaminantes radiactivos ^[10].

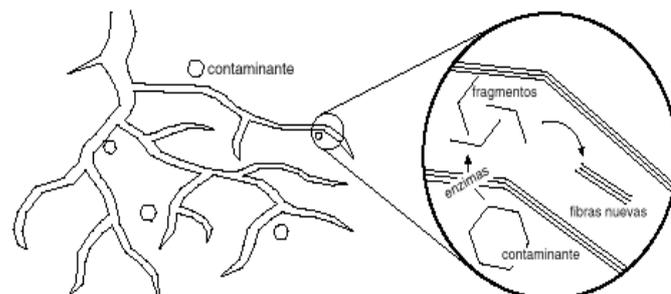


Figura 9a. Las enzimas de las plantas descomponen (degradan) los contaminantes orgánicos. Los fragmentos se incorporan en el tejido nuevo de las plantas.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras de jacinto acuático y tul fueron recolectadas en la Laguna anaeróbica 3 (ver figura 10) y los 3 sistemas de batería de biofiltros (ver figura 11) de la planta de tratamiento de Villa Canales respectivamente.

La metodología de este trabajo consta de varias actividades que comprendieron los siguientes aspectos:

- 1) Trabajo de campo
- 2) Trabajo de laboratorio.

3.1.1 Trabajo de Campo

Reconocimiento del área de estudio y selección de los sitios ó estaciones de muestreo. La elección de las estaciones, fue realizada de modo que el sistema fuera cubierto en la mayor extensión posible. La época de lluvia de este municipio son los meses de mayo a octubre. Fueron establecidas 04 áreas o parcelas (figura 10) dentro de la planta de tratamiento, en cada área se tomaron 2 especímenes por muestreo y parcela para la laguna anaeróbica, la macrófita *Eichhornia crassipes* (única en el estanque) y para los biofiltros (canales 2 y 4), dos especímenes en cada uno de los tres sistemas de biofiltros, (figura 11) aquí se muestrearon ambas macrófitas, este procedimiento se llevo a cabo en tres diferentes meses (junio, agosto y septiembre de 2007).



Figura 10. Zona de muestreo laguna anaeróbica 3



Figura 11. Muestreo en el biofiltro 1 (canal 2)

3.1.2 Trabajo de Laboratorio

Las muestras una vez recolectadas, fueron transportadas en bolsas plásticas al secador solar de la facultad de Agronomía, donde fueron lavadas y colocadas en bandejas para su proceso de secado (ver figura 12), allí permanecieron aproximadamente 03 semanas y cuando alcanzaron un contenido de humedad del 15% determinado por medio de la balanza de humedad (Marca Boeco Sartorius, capacidad 30g exactitud: 1 mg ajuste de temperatura 01 a 99 min.) (ver figura 13). Posteriormente fueron trasladadas al Laboratorio, donde se separaron las fracciones de la planta (hoja y raíz), utilizando un bisturí, ambas fracciones fueron molidas (molino de disco tipo tolva con tapa marca Corona) (ver figura 14) las fracciones obtenidas e identificadas se guardaron en bolsas plásticas de cierre hermético hasta su digestión ácida (ver figura 15).



Figura 12. Proceso de secado. Secador solar Facultad de Agronomía-USAC



Fig.13. Balanza de humedad



Fig. 14. Molienda de las diferentes fracciones de las macrófitas.



Figura 15. Muestras de jacinto acuático y tul, molidas e identificadas por sección de la planta.

3.1.2.1 Digestión ácida de material vegetal (hoja y raíz)

- Una vez reducida la muestra vegetal seca, se pesó en una balanza analítica (Marca boeco, Máx. 210 g d – 0.1 mg 220 V) (ver figura 16) entre 0.2000 - 0.3000 gramos en un beacker de vidrio.
- Se calcinó durante 2.5 horas a 1,000 °C (mufla Thermoline 1400 serie 1256 -4 rango 100-1100 °C) (ver figura 17).
- Se adiciono cuidadosamente 3 ml de una mezcla de ácido nítrico y ácido perclórico concentrados en relación 2:1 respectivamente.
- Se cubrió con vidrio de reloj después de adicionar cuidadosamente 3 ml de agua desmineralizada, hasta la observación de los vapores ácidos, (el procedimiento se realizo en una Estufa con agitación marca Corning pyrocerm rango 25-550 velocidad 60 a 1100 rpm corriente 120V) realizando el proceso directamente en una campana de extracción. (ver figura 18).

- Se mantuvo el volumen constante dentro del vaso de precipitar (aproximadamente 5 ml) adicionando agua desmineralizada durante el tiempo de eliminación de los vapores ácidos, siendo este de aproximadamente 2 horas.
- Una vez enfriada la muestra digerida se transvaso cuantitativamente a un balón volumétrico de 25 ml.
- Se adicionaron 125 μ l de solución estándar de itrio 1000 ppm y se aforo con agua desmineralizada.



Figura. 16 Determinación de pesos de las diferentes fracciones de la muestra cabo



Figura 17. Mufla donde se llevaron las calcinaciones de la muestra a 1000oC durante 2.5 horas



Figura 18. Digestión ácida de las muestras

3.1.2.2 Cuantificación mineral

El contenido de metales pesados en la muestra digerida se analizó mediante la técnica de fluorescencia de rayos X. Para ello, se utilizó un equipo de Fluorescencia (XAR-E200 serie TXRF espectrometer marca Scientific, con tubo de rayos X y ánodo de Rodio) (ver figura 19).

Para utilizar el equipo se procede de la siguiente manera.

- Se encendió en generador de Rayos X, fijando las condiciones de operación en 30 kv, 0.320 mA (Mo/40/20) 1000 segundos y 20 µl, verificando que el sistema de reflexión total tuviera su alineación fotométrica correcta.
- Se midió un blanco del reflector por 100 segundos
- Se interpoló la curva de calibración con una disolución multielemental estándar que contiene los elementos de interés en una concentración de 5 ppm cada uno y además 5 ppm del estándar de itrio.
- Se introdujeron 20 µl de la disolución problema en el reflector y se seco la alícuota adicionada con una lámpara infrarroja. (ver figura 20).
- Se leyó el contenido de metales y se grabó el espectro obtenido por medio del multicanal, en el disco duro de la computadora.

- Los resultados se obtuvieron a partir de las áreas de los fotopicos de las líneas Ks de los elementos de interés, por medio del programa para computadora SAX (ver figura 21).
- Se reportó las ppm de los elementos cuantificados.



**Figura 19. Equipo de fluorescencia de rayos X
Lab. de Físicoquímica de la Fac. de Farmacia-USAC**



Figura 20. Lámpara UV. proceso de secado de los reflectores conteniendo la muestra a analizar



Figura 21. Uso del programa SAX para la interpretación de resultados

3.2 INFRAESTRUCTURA FÍSICA

- 3.2.1** Laboratorio de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- 3.2.2** Laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- 3.2.3** Planta de tratamiento de aguas residuales “La Cerra” Villa Canales Guatemala administrada por AMSA.
- 3.2.4** Secador solar de la Facultad de Agronomía de Universidad de San Carlos de Guatemala.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la planta de tratamiento La Cerra de Villa Canales, la depuración de las aguas residuales se lleva a cabo en una fase secundaria y terciaria con plantas acuáticas flotantes, que es uno de los sistemas más utilizados y consiste en estanques o canales de profundidad de 2,5 m. Este estanque es alimentado con las aguas provenientes del río Villalobos que tiene un contenido considerable de residuos domésticos e industriales de los municipios de Guatemala, Villa Nueva, San Miguel Petapa y Villa Canales.



Figura 22. Río Villalobos es el principal contaminante del lago de Amatitlán; arrastra desechos de la población y la industria.

La planta de tratamiento posee tres lagunas anaeróbicas. En la laguna No. 3 se desarrolla la especie flotante jacinto acuático y el sistema de canales o biofiltros (tres sistemas con 6, 8 y 12 canales respectivamente) donde se encuentran las plantas acuáticas jacinto acuático y tul. Para evaluar la distribución de los metales dentro de la planta se hizo un seccionamiento de la misma, separando las fracciones hoja y raíz para cada macrófita y analizándola como una muestra separada.

4.1 ESPECIE. Jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*)

En lo que respecta al jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*), es una de las especies más estudiadas, debido a sus características depuradoras y facilidad de proliferación. Esta planta obtiene del agua todos los nutrientes que requiere para su metabolismo, siendo el nitrógeno y el fósforo, junto a los iones de potasio, calcio, magnesio, hierro, amonio, nitrito, sulfato, cloro, fosfato y carbonato, los más importantes. Posee un sistema de raíces, que pueden tener microorganismos asociados a ellas que favorece la acción depuradora de la planta. En general, estas plantas son capaces de retener en sus tejidos una gran variedad de metales pesados (como cadmio, mercurio y arsénico específicamente).

El mecanismo de cómo actúa se cree es a través de formaciones de complejos entre el metal pesado con los aminoácidos presentes dentro de la célula, previa absorción de estos metales a través de las raíces.

4.1.1 Biofiltro 1 Canal No. 2

Las concentraciones de metales encontradas en la hoja y raíz de la macrófita obtenida del biofiltro 1 en el canal No.2, muestreado durante los meses de junio, agosto y septiembre de 2007, se detallan en la tabla 1. Los metales detectados fueron trece: Ca, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb, K, Rb, Sr y Ti para este biofiltro.

En cuanto a las concentraciones de los mismos en la planta, no se puede establecer con certeza si los niveles son altos o bajos en virtud de que en Guatemala hasta la fecha no se han realizado investigaciones de

metales pesados en macrófitas por lo que no se pudo disponer de estudios que complementen esta información. Se ha analizado las aguas del río Villalobos, encontrándose una alta presencia de coliformes, metales pesados (como plomo, mercurio, cobre y cromo), una acumulación de biocidas (como los pesticidas clorados y los herbicidas) y residuos de combustión o de hidrocarburos. Por lo tanto, se esperaría que la absorción fuera relativamente alta por el efecto de depuración de este tipo de plantas en humedales con contenidos relativamente altos de contaminantes industriales.

Tabla 1. Concentraciones de metales en muestras de *E. crassipes* (hoja y raíz) del biofiltro 1 en el canal Nº.2

Metales Encontrados	BIOFILTRO 1 (ppm)*					
	HOJA			RAIZ		
	Junio	Agosto	Sept.	Junio	Agosto	Sept.
Ca	182,9	156,9	133,5	116,3	151,4	127,3
V	0,074	ND	ND	0,289	0,082	ND
Mn	2,152	7,074	5,123	2,136	8,521	6,347
Fe	1,431	6,801	2,615	10,2	2,071	1,928
Ni	0,19	0,281	ND	0,331	0,187	1,114
Cu	0,087	0,21	0,314	0,439	0,836	0,412
Zn	0,242	0,705	ND	1,42	1,124	1,748
As	0,254	ND	ND	1,024	ND	ND
Pb	0,365	ND	ND	1,287	ND	ND
Rb	ND	0,435	ND	ND	0,328	ND
K	88,48	142,2	347,1	32,81	273,9	345,1
Sr	1,153	1,204	ND	0,254	1,851	ND
Ti	ND	ND	ND	0,548	ND	0,11

ND: no detectable

* promedio n=2

Los metales detectados, pueden ser clasificados dentro de los grupos descritos en la bibliografía de acuerdo con su toxicidad y disponibilidad en un ambiente hidrológico (ver tabla 2). Así, se detectaron metales del grupo de los no tóxicos tales como Ca, Fe, Mn, K, Sr y Rb. Del grupo de metales con toxicidad baja no se analizó ninguno. Por último, del grupo

de metales con toxicidad de moderada a alta se analizaron Cu, Pb, Ni, Ti, V, As y Zn.

Tabla 2. Metales descritos en la bibliografía según su toxicidad y disponibilidad en un ambiente hidrológico (Wodd 1974)

No tóxico		Toxicidad Baja		Toxicidad de moderada a alta		
Aluminio	Magnesio	Bario	Praseodimio	Actinio	Iridio	Plata
Bismuto	Manganeso	Cerio	Prometeo	Arsénico	Plomo	Tantalio
Cesio	Potasio	Germanio	Galio	Berilio	Níquel	Torio
Hierro	Estroncio	Oro	Estaño	Boro	Niobio	Titanio
Litio	Rubidio	Neodimio	Itrio	Cadmio	Osmio	Tungsteno
	Sodio			Cromo	Paladio	Uranio
				Cobalto	Platino	Vanadio
				Cobre	Polonio	Zinc
				Hafnio	Radio	Zirconio
				Indio	Rutecio	
				Iridio		

En las figuras 23 y 24 se han representado estas concentraciones solo para los elementos más tóxicos o importantes en los procesos de remediación separando la acumulación encontrada en raíz y en hoja. De estas graficas es posible observar que la distribución de los diferentes metales encontrados varía en presencia y concentración durante los tres muestreos.

En estas figuras no se han incluido los metales potasio, hierro y calcio pues los mismos no se consideran como tóxicos y son indispensables para su crecimiento metabólico. Además se incluyó al manganeso, al rubidio y el estroncio porque a pesar de no ser tóxicos su presencia y concentraciones son altas con relación a los otros metales y no forma parte de los nutrientes naturales de la planta.

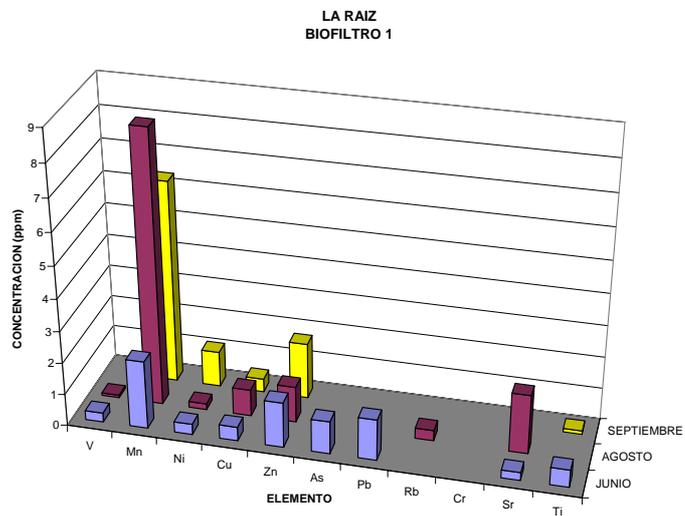


Figura 23. Concentraciones de metales en la raíz de *E. crassipes* del Biofiltro 1, canal No. 2

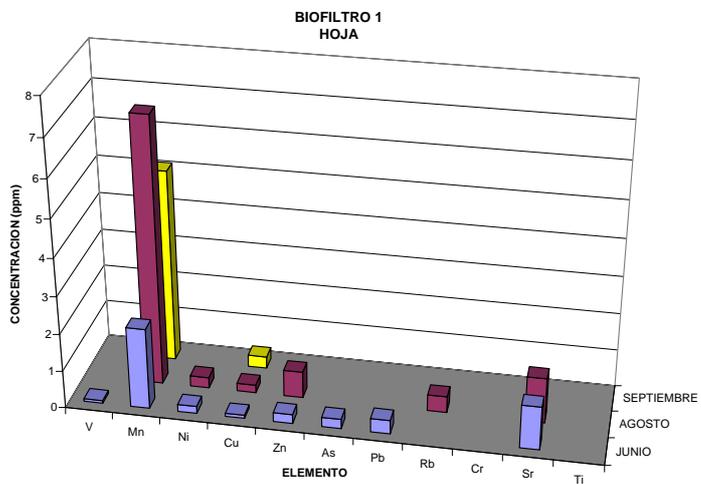


Figura 24. Concentraciones de metales en la hoja de *E. crassipes* del Biofiltro 1, canal No. 2

4.1.2 Biofiltro 2 Canal No. 2

En la tabla 3 se puede observar los resultados obtenidos para el biofiltro 2 canal No. 2 de la planta de tratamiento. En este biofiltro únicamente se detectaron en la ninfa acuática la presencia de 11 metales (Ca, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb, K, Sr y Ti).

Tabla 3. Concentraciones de metales en muestras de *E. crassipes* (hoja y raíz) del biofiltro 2 en el canal N°.2

Metales Encontrados	BIOFILTRO 2 (ppm)*					
	HOJA			RAIZ		
	Junio	Agosto	Sept.	Junio	Agosto	Sept.
Ca	588,4	144,5	147,2	448,3	133,5	131,5
V	0,235	0,467	0,047	0,341	0,645	0,641
Mn	6,215	4,052	4,143	7,738	11,58	6,791
Fe	2,145	16,13	9,146	10,84	4,481	6,987
Ni	0,235	0,648	2,478	0,546	1,5	3,147
Cu	0,563	1,446	ND	0,909	1,654	ND
Zn	1,325	0,984	1,745	5,822	1,713	1,378
Rb	0,15	ND	0,007	0,285	ND	ND
K	ND	163,3	471,9	562,1	883,5	547,1
Sr	ND	ND	ND	1,865	ND	ND
Ti	ND	1,536	ND	ND	ND	ND

ND: no detectable

* promedio n=2

En las figuras 25 y 26 se observa la presencia con concentración relativamente alta en relación a los demás metales encontrados en la especie de manganeso, zinc, níquel y cobre.

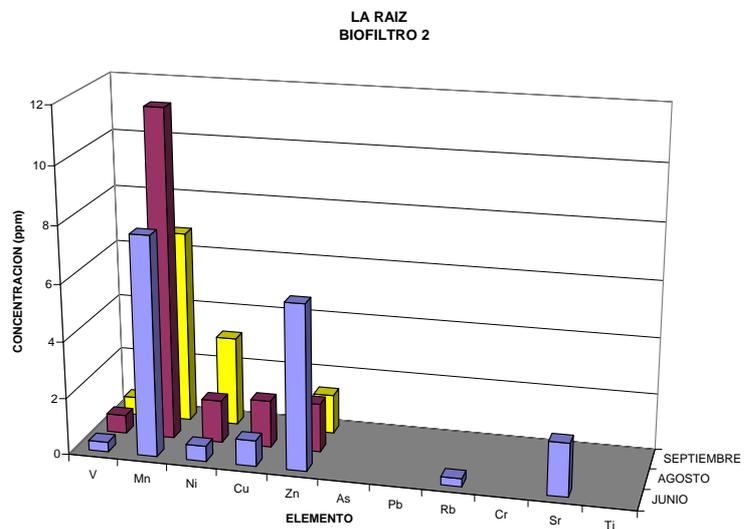


Figura 25. Concentraciones de metales en la Raíz de *E. crassipes* del Biofiltro 2, canal No. 2

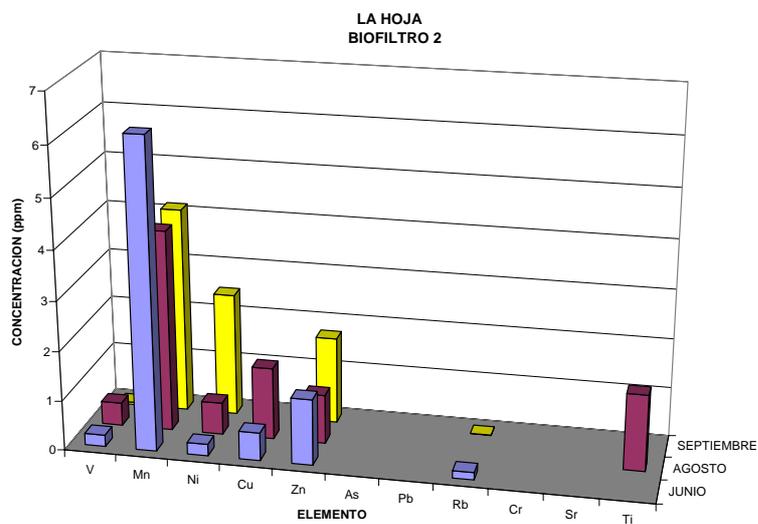


Figura 26. Concentraciones de metales en la hoja de *E. crassipes* del Biofiltro 2, canal No. 2

4.1.3 Biofiltro 3 Canal No. 2

En la Tabla 4, se presentan los resultados obtenidos para el biofiltro 3 canal No. 2 donde se observa la presencia de 9 metales siendo estos el Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb, K y Sr.

Tabla 4. Concentraciones de metales en muestras de *E. crassipes* (hoja y raíz) del biofiltro 3 en el canal N°.4

Metales Encontrados	BIOFILTRO 3 (ppm)					
	HOJA			RAIZ		
	Junio	Agosto	Sept.	Junio	Agosto	Sept.
Ca	175,6	196,5	2143	146,6	187,7	194,2
Mn	2,521	1,848	3,431	8,694	9,835	4,317
Fe	2,071	26,63	21,81	6,894	10,92	14,24
Ni	0,186	0,015	ND	0,321	0,159	ND
Cu	0,288	0,425	ND	0,435	0,633	ND
Zn	ND	0,9	ND	0,222	1,105	ND
Rb	0,328	ND	ND	ND	0,717	ND
K	120,9	ND	234,9	46,33	ND	471,2
Sr	1,851	2,802	ND	0,774	1,432	ND

ND: no detectable

* promedio n=2

En las figuras 27 y 28 se observa la presencia con concentración relativamente alta en relación a los demás metales el manganeso. Además se observa también la presencia de estroncio para los meses de junio y agosto, la presencia en la hoja es mayor que en la raíz.

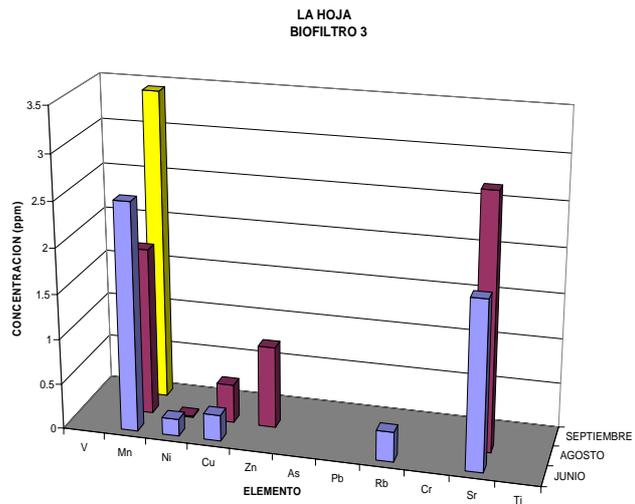


Figura 27. Concentraciones de metales en la hoja de *E. crassipes* del biofiltro 3, canal No. 2.

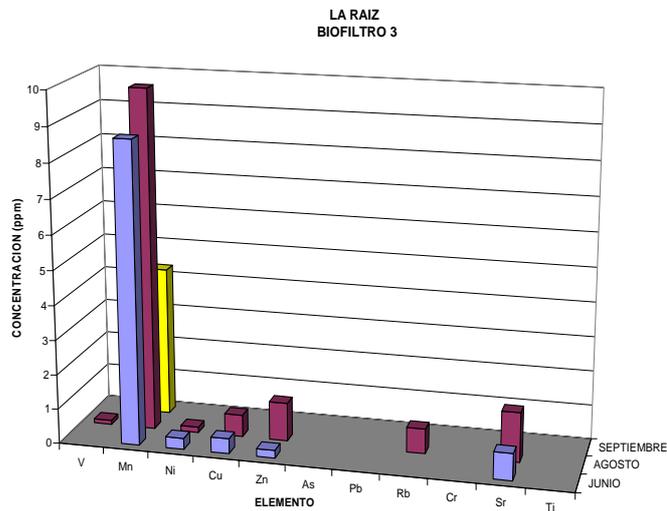


Figura 28. Concentraciones de metales en la raíz de la thypa spp del Biofiltro 2, canal No. 2

4.1.4 Laguna Anaeróbica 3

Así mismo, con la finalidad de determinar el efecto depurador del lirio acuático se realizó un análisis similar en la laguna anaeróbica, en ésta etapa del proceso de depuración de la planta de tratamiento, las aguas poseen mayor concentración de contaminantes químicos. En la

laguna anaeróbica 3 se encontraron 14 metales en ambas fracciones de la planta (Ca, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Rb, K, Cr, Sr y Ti).

Tabla 5. Concentraciones de metales en muestras de *E. crassipes* (hoja y raíz) de la Laguna Anaeróbica

Metales Encontrados	LAGUNA ANAERÓBICA (ppm)*					
	HOJA			RAIZ		
	Junio	Agosto	Sept.	Junio	Agosto	Sept.
Ca	425,7	549,7	314,9	92,43	132,1	175,0
V	1,247	ND	ND	ND	ND	ND
Mn	17,05	6,601	3,147	4,937	8,476	4,129
Fe	21,11	49,21	17,23	4,097	31,5	9,121
Ni	1,01	0,301	6,974	0,175	ND	11,92
Cu	0,235	0,102	0,564	0,407	0,229	0,699
Zn	0,818	0,311	0,42	0,381	0,554	0,844
As	0,857	0,127	0,179	0,987	0,235	0,355
Pb	0,479	0,57	0,649	0,964	0,987	0,763
Rb	ND	ND	ND	ND	1,026	1,005
K	581,6	78,53	486,4	836,5	71,07	361,1
Cr	ND	ND	ND	0,023	0,023	ND
Sr	0,511	ND	ND	2,247	1,97	ND
Ti	3,245	ND	ND	ND	ND	0,32

ND: no detectable

* promedio n=2

Se observa en las figuras No. 29 y 30 que los contenidos de manganeso son altos para los tres meses muestreados. En el mes de septiembre el contenido de Níquel es alto en ambas fracciones de la planta, raíz y hoja 11.9 y 6.9 ppm respectivamente, los demás elementos se encuentran presentes en concentraciones relativamente bajas.

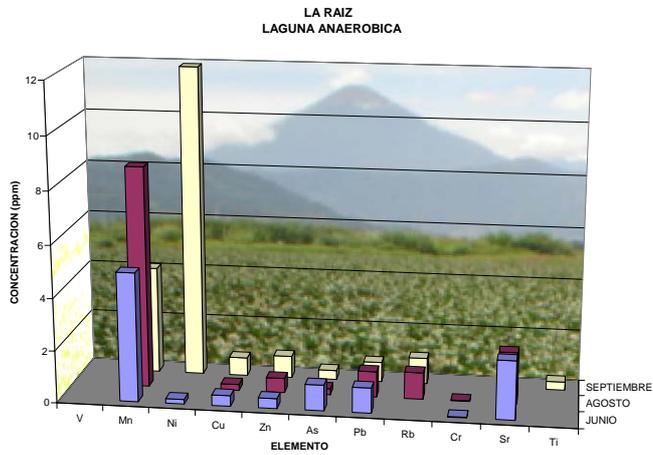


Figura 29. Concentraciones de metales en la raíz de E. crassipes de la Laguna Anaeróbica 3

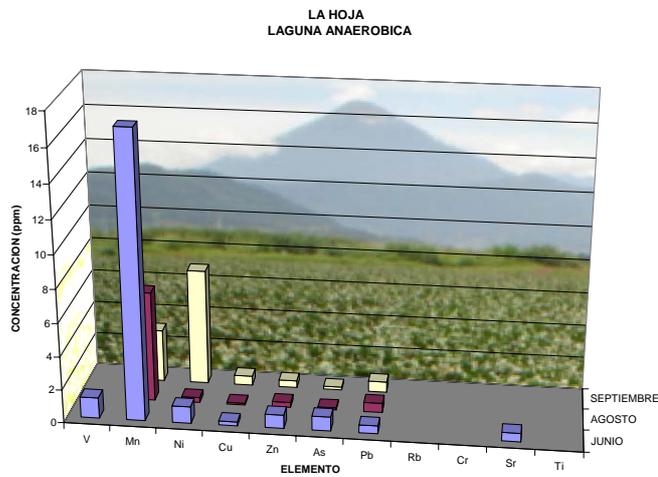


Figura 30. Concentraciones de metales en la hoja de E. crassipes de la Laguna Anaeróbica

4.2 ESPECIE TUL (*Thypha spp*)

Así mismo, se analizó el comportamiento del tul (*Thypha spp*) en su género *Thypha latifolia* L. ésta macrófita tiene comportamiento químico y metabólico similar a la especificada en el jacinto acuático utilizando al nitrógeno y el fósforo, junto a los iones de potasio, calcio, magnesio,

hierro, nitrito, sulfato, fosfato y carbonato, como los elementos esenciales para su proceso metabólico. En cuanto a la captura de metales tóxicos la *Thypha* puede llegar a tolerar sin dificultad concentraciones de plomo, arsénico y cobre hasta de 50 ppm y Ni arriba de las 150 ppm. ⁽⁶⁾

4.2.1 Biofiltro 1 canal No. 4

En lo que respecta a la planta de Tratamiento de Villa Canales, esta macrófita esta siendo utilizada únicamente en los tres sistemas de biofiltros, En la Tabla 6 se puede observar la presencia de 14 elementos en ambas secciones de la planta (hoja- raíz).

Tabla 6. Concentraciones de metales en muestras de *Thypha spp* (hoja y raíz) de Biofiltro 1 Canal No. 4

Metales Encontrados	BIOFILTRO 1 (ppm)*					
	HOJA			RAIZ		
	Junio	Agosto	Sept.	Junio	Agosto	Sept.
Ca	124,1	149,6	165,0	273,8	117,2	123,7
V	0,07	0,04	ND	0,163	0,244	ND
Mn	2,657	1,393	0,993	6,181	7,604	1,347
Fe	13,45	9,413	3,51	5,03	11,97	14,16
Ni	0,114	0,42	ND	0,227	ND	ND
Cu	0,248	0,09	0,09	0,316	ND	ND
Zn	0,511	0,195	0,547	0,243	1,192	0,679
As	0,022	ND	0,007	0,506	0,621	ND
Pb	ND	ND	ND	0,795	0,816	ND
Rb	ND	ND	ND	ND	ND	0,741
K	155,4	331,1	632,1	187,4	163,8	147,2
Cr	ND	ND	ND	ND	0,716	ND
Sr	0,842	0,089	ND	0,931	ND	ND
Ti	ND	ND	ND	0,193	0,428	0,38

ND: no detectable

* promedio n=2

Como se observa en la figura 31 y 32 tanto las hojas como las raíces de la macrófita presenta concentraciones de níquel en los tres

muestréos relativamente altas comparadas con el resto de elementos encontrados.

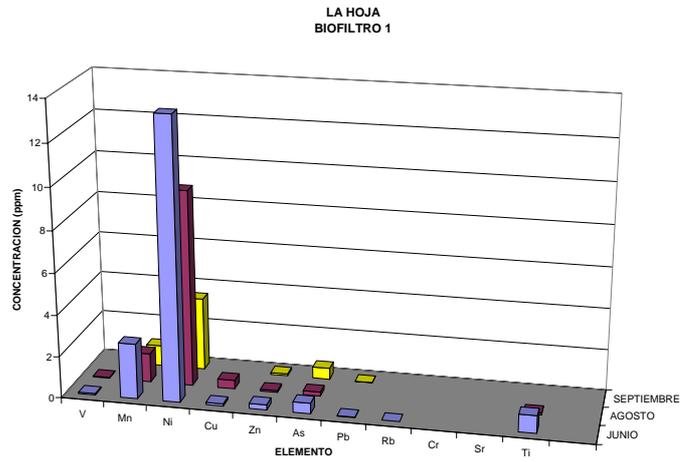


Figura 31. Concentraciones de metales en la hoja de *Thypha spp* en el Biofiltro 1 canal 4

Se puede observar además que a diferencia de *E. crassipes*, esta especie fija pequeñas concentraciones de manganeso en su sistema reticular.

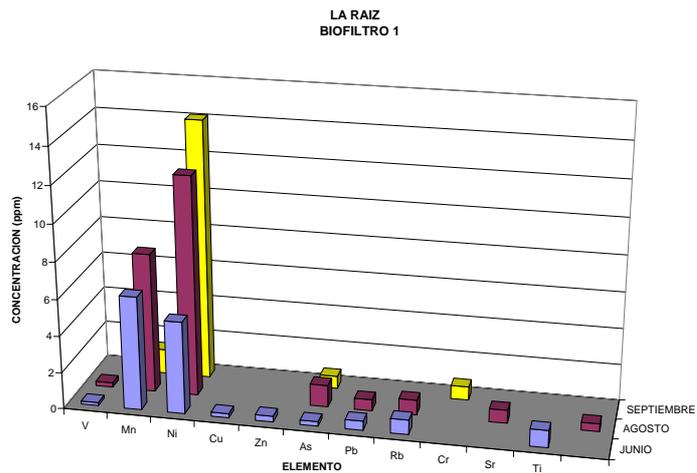


Figura 32. Concentraciones de metales en la raíz de la especie *Thypha spp* En el Biofiltro 1 canal 4

4.2.2 Biofiltro 2 canal No. 4

En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos para el biofiltro 2, canal No. 4. Como se observa en las figura 33 y 34 se detectaron 11 elementos, el níquel se presenta en contenidos altos para los tres meses muestreados, con relación a los demás elementos detectados.

Tabla 7. Concentraciones de metales en muestras de *Thypha spp* (hoja y raíz) en el Biofiltro 2 canal No. 4

Metales Encontrados	BIOFILTRO 2 (ppm)					
	HOJA			RAIZ		
	Junio	Agosto	Sept.	Junio	Agosto	Sept.
Ca	107,6	411,2	317,9	101,3	101,2	234,1
V	ND	ND	ND	0,056	0,073	0,009
Mn	0,035	0,893	1,118	0,683	1,139	1,749
Fe	6,321	6,327	5,784	2,34	7,931	6,481
Ni	0,089	0,261	0,261	0,105	0,249	0,547
Cu	0,216	0,082	0,086	0,299	0,273	0,278
Zn	0,647	0,111	0,463	0,468	0,827	0,931
As	ND	ND	ND	0,239	ND	ND
Pb	ND	ND	ND	0,621	ND	ND
Rb	ND	0,157	0,126	ND	0,051	ND
K	96,32	122,8	123,5	107,9	25,96	62,62

ND no detectable

* promedio n=2

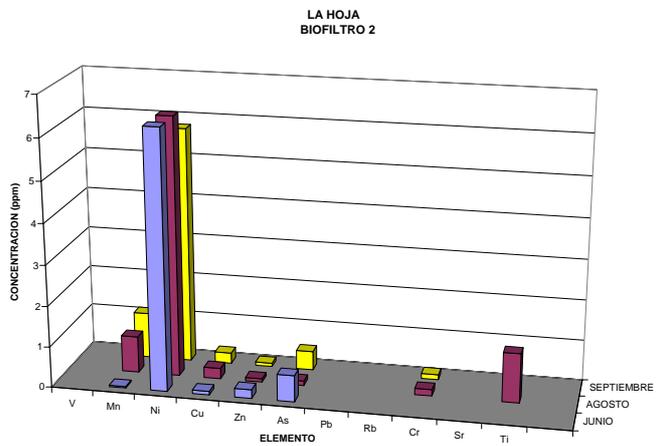


Figura 33. Concentraciones de metales en la hoja de la especie *Thypha spp* en el biofiltro 2 canal 4

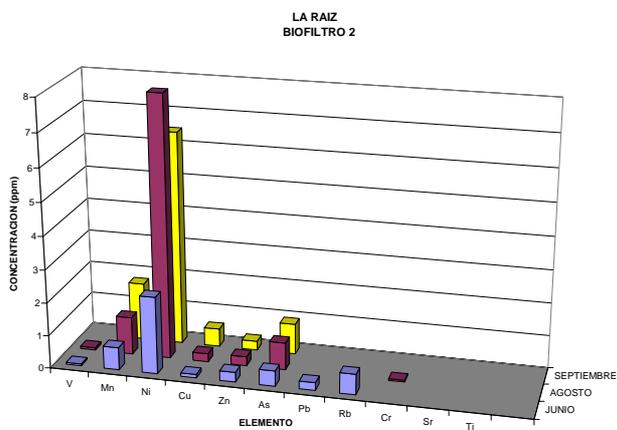


Figura 34. Concentraciones de metales en la raíz de la especie *Thypha spp* en el biofiltro 2 canal 4

4.2.3 Biofiltro 3 canal No. 4

En la Tabla 8 se reportan los resultados obtenidos para el biofiltro 3, canal No. 4 12 elementos fueron detectados en las dos fracciones de

la especie analizada, se observa en la figura 35 y 36 que las concentraciones de Zinc, cobre y níquel para ambas secciones de la planta tiene concentraciones importantes, el plomo además aparece en concentraciones bajas para los meses de junio y agosto y únicamente fueron detectados en la raíz de la planta.

Cuadro 8. Metales encontrados en muestras de *Thypha spp* (hoja y raíz en el biofiltro 3 canal No. 4

Metales Encontrados	BIOFILTRO 3 (ppm)					
	HOJA			RAIZ		
	Junio	Agosto	Sept.	Junio	Agosto	Sept.
Ca	196,5	162,9	247,3	123,7	191,8	198,1
Mn	3,314	0,315	0,543	1,347	0,369	0,647
Fe	5,779	2,987	3,873	14,16	4,651	4,94
Ni	0,176	0,141	ND	0,325	ND	1,258
Cu	0,233	1,068	ND	0,141	0,588	ND
Zn	0,349	0,147	1,934	0,679	3,944	2,478
As	ND	ND	ND	ND	0,147	ND
Pb	ND	ND	ND	ND	0,321	ND
Rb	ND	0,63	ND	0,741	0,243	ND
K	ND	159,3	114,3	147,2	73,3	84,7
Sr	ND	0,959	ND	ND	0,941	ND
Ti	ND	ND	ND	0,38	0,369	ND

ND no detectable

* promedio n=2

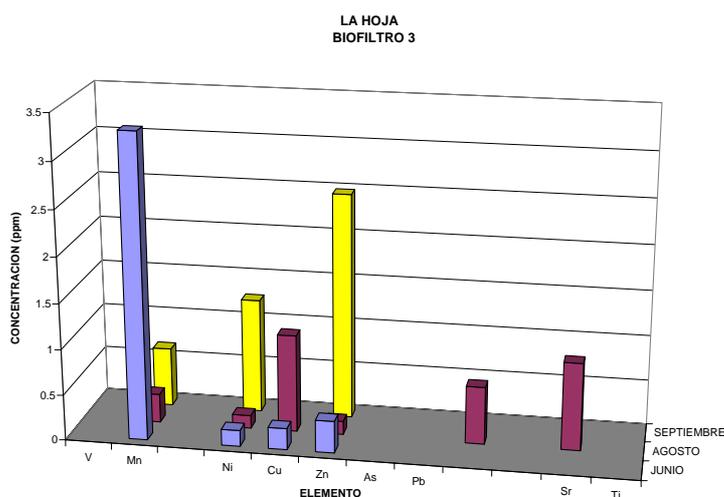


Figura 35. Concentraciones de metales en la raíz de la especie *Thypha spp* en el Biofiltro 3 canal 4

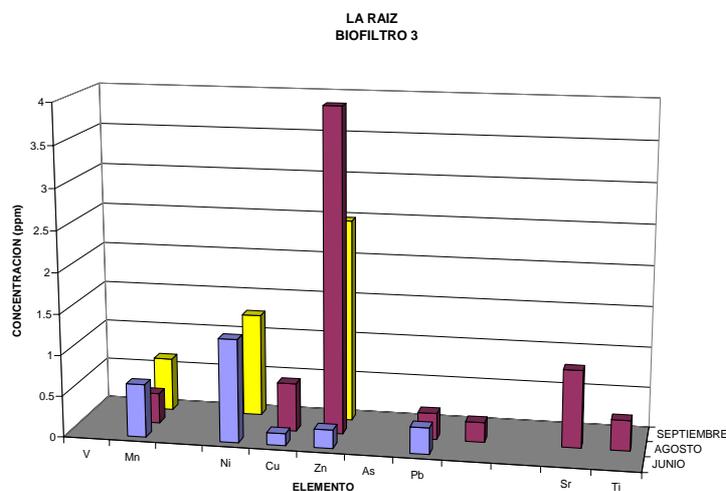


Figura 36. Concentraciones de metales en la raíz de la especie *Thypha spp* En el Biofiltro 3 canal 4

Al analizar los resultados se puede observar que ambas plantas tienen afinidades metabólicas para la absorción de los diferentes metales. En el caso de la *E. crassipes*, se encontraron mayores cantidades de manganeso, rango analítico 1.842 a 17.05 ppm. Para la *Thypha spp* las concentraciones de manganeso fueron de 0.035-7.604 ppm, este patrón de comportamiento se encontró para todos los metales analizados, como se puede observar en la Tabla 9.

Cuadro 9. Concentraciones máximas y mínimas detectadas en las macrófitas *E. crassipes* y *Thypha spp*. en la planta de tratamiento de Villa Canales-Guatemala.

Metal / especie	Concentración mínima		Concentración máxima	
	<i>E. crassipes</i>	<i>Thypha spp</i>	<i>E. crassipes</i>	<i>Thypha spp</i>
V	0,047	0,009	1,247	0,244
Mn	1,842	0,035	17,05	7,604
Ni	0,015	0,089	6,974	0,547
Cu	0,087	0,082	1,654	0,588
Zn	0,242	0,111	1,748	0,931
As	0,127	0,007	1,024	0,621
Pb	0,365	0,795	1,287	0,816
Rb	0,007	0,051	1,026	0,741
Sr	0,254	0,089	0,931	2,802
Ti	0,320	0,193	3,245	0,369

Así mismo de los resultados obtenidos para ambas macrófitas, se determinaron factores de distribución raíz/hoja, con la finalidad de determinar la distribución de los metales y su comportamiento en cuanto a la fijación de los mismos en la raíz o en la hoja; así pues, si el F_D (R/H) > 1 presenta mayor acumulación en la raíz y metales con F_D (R/H) < 1 presentan mayor acumulación en la hoja.

Para la especie *E. crassipes*, (ver cuadro 10). Se puede observar que en el caso del Vanadio, la tendencia es de acumularse en la raíz. Para el manganeso, a excepción del Biofiltro1 mes 1, el metal se acumuló en la raíz de la planta. La fijación del hierro en la sección de la planta se llevo mayoritariamente en la hoja, con excepción del mes 1 (junio-2007) para cada biofiltro. Para níquel, cobre y zinc la tendencia de fijación se observa a nivel de la raíz, en el caso del estroncio es en la hoja con excepción del biofiltro 2 mes 2 (agosto-2007).

Cuadro 10. Factores de distribución F_D (R/H) de la especie *Eichhornia crassipes* en los biofiltros de la Planta de Tratamiento de Villa Canales Guatemala.

METAL	FACTOR DE DISTRIBUCIÓN (F_D R/H)								
	BIOFILTRO 1			BIOFILTRO 2			BIOFILTRO 3		
	MES 1	MES 2	MES 3	MES 1	MES 2	MES 3	MES 1	MES 2	MES 3
V	3,91	ND	ND	1,45	1,38	13,64	ND	ND	ND
Mn	0,99	1,20	1,24	1,25	2,86	1,64	3,45	5,32	3,75
Fe	7,13	0,30	0,74	5,05	0,07	0,76	3,33	0,41	0,67
Ni	1,74	0,67	ND	2,32	2,31	1,27	17,3	10,60	7,8
Cu	5,05	3,98	1,31	1,61	1,14	ND	1,51	1,49	1,87
Zn	5,87	1,59	ND	4,39	1,4	0,79	ND	1,23	1,64
As	4,03	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pb	3,53	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Rb	ND	0,75	ND	1,90	ND	ND	ND	ND	ND
Sr	0,22	1,54	ND	ND	ND	ND	0,42	0,51	0,21

Mes 1 junio-2007, mes 2 agosto -2007, mes 3 septiembre -2007

ND no determinado

Para la especie *Thypa spp.* (Ver cuadro 11), en lo que respecta al metal Vanadio se detecto en el biofiltro 1 los mes 1 y 2 (junio y agosto respectivamente) en la raíz de la planta, el manganeso a excepción del biofiltro 2 mes 1(junio) la tendencia de fijación del metal es en la raíz. Para el metal hierro la acumulación se presentó en la raíz con excepciones del muestreo efectuado en el mes de junio (mes 1) para la biofiltros 1 y 2 analizados. Para el resto de los metales (Ni, Cu, Zn, Pb, Rb, Cr, Sr) no se puede determinar un patrón comportamiento porque los resultados presentan mucha variabilidad.

Cuadro 11. Factores de distribución FD (R/H) de la especie *Thypa spp* en los biofiltros de la Planta de Tratamiento de Villa Canales Guatemala.

METAL	FACTOR DE DISTRIBUCIÓN R/H								
	BIOFILTRO 1			BIOFILTRO 2			BIOFILTRO 3		
	MES 1	MES 2	MES 3	MES 1	MES 2	MES 3	MES 1	MES 2	MES 3
V	2,33	6,10	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mn	2,33	5,46	1,19	1.95	1.28	1,9	0,41	1,17	1,1
Fe	0,37	1,27	1,28	0.37	1.25	1,2	2,45	1,56	1,12
Ni	1,99	1,00	ND	1.18	0.095	ND	1,85	ND	ND
Cu	1,27	6,11	ND	1.38	3.39	ND	0,63	0,55	ND
Zn	0,48	ND	1,28	0.72	7.45	1,28	1,95	26,85	1,18
Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,39	ND
Rb	ND	ND	ND	1,90	ND	0,32	ND	ND	ND
Cr	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,98	ND
Sr	1,11	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,21

Mes 1 junio-2007, mes 2 agosto -2007, mes 3 septiembre -2007

ND no determinado

CONCLUSIONES

1. Sí existen diferencias significativas de metales pesados en los diferentes tejidos (hoja y raíz) de las plantas acuáticas jacinto de agua y tul que actualmente están siendo utilizadas como biofiltros en la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra Villa Canales
2. Los resultados obtenidos muestran la bioacumulación de calcio, vanadio, manganeso, hierro, níquel, cobre, zinc, arsénico, plomo, rubidio, potasio, cromo, estroncio y titanio en niveles significativos y variables en el jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*) y tul (*Thypha spp*) de la planta de tratamiento de aguas residuales la Cerra Villa Canales.
3. Para las especies estudiadas la concentración de metales pesados acumulados se hizo más evidente en las raíces que en las hojas, independiente de su origen en la laguna anaeróbica o en los biofiltros, es decir, presentaron los mayores valores de bioacumulación en casi la totalidad de los metales determinados.
4. El efecto depurador del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) además de remover grandes cantidades nitrógeno y fósforo, se encontró metales pesados como manganeso, cromo, cobre, zinc y plomo y en comparación entre las dos especies, para éste estudio el jacinto acuático presenta más habilidad fitodepuradora.
5. Los resultados obtenidos, indican que las plantas en sus diferentes secciones ó tejidos poseen capacidad diferencial de acumulación de elementos químicos.

6. La biomasa final de ambas especies estudiadas no puede ser utilizada para alimentación de animales domésticos o abono orgánico por la evidente bioacumulación de metales tóxicos en raíces y hojas en concentraciones que consideradas por la FAO no son aptas para consumo humano. (anexo 1)

RECOMENDACIONES

1. El plomo, el mercurio y el cromo no fueron detectados, debido a la metodología de pre tratamiento, sin embargo, se estima que puede presentarse concentraciones importantes en la planta, debido a los antecedentes de estos metales en el río Villalobos, por lo que, se recomienda realizar estudios de estos metales por medio de otra técnica analítica.
2. Los factores que controlan la toxicidad de los elementos y su absorción en plantas acuáticas son la geoquímica de los sedimentos, los factores fisicoquímicos del agua y la fisiología de la planta acuática. Se recomienda, realizar estudios complementarios de los sedimentos de las lagunas y biofiltros, así como análisis de metales pesados en el agua que ingresa y sale de la planta de tratamiento, con la finalidad de encontrar patrones correlativos de comportamiento en las diferentes secciones morfológicas de las macrófitas.
3. Se recomienda realizar estudios adicionales sobre los factores fisicoquímicos salinidad y temperatura en las áreas de muestreo ya que también pueden influir en la especiación química del metal en solución, promoviendo ó minimizando la tasa de bioacumulación de elementos químicos en la macrófitas.
4. En función de la variabilidad de los resultados se recomienda realizar monitoreos en períodos más cortos, para evaluar el comportamiento y distribución de los metales en las diferentes secciones de la planta, en función del período del crecimiento de la especie acuática analizada.

5. Con base a los resultados obtenidos se recomienda que la biomasa extraída de la planta de tratamiento La Cerra no sea utilizada para la alimentación de animales ya que posee concentraciones significativas de metales pesados, debido al fenómeno de magnificación biológica de la naturaleza, éstas concentraciones son tóxicas para la salud humana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDERSON R. 1977. "**Concentration of cadmium, copper, lead and zinc in thirty – five genera of freshwater macroinvertebrates from the Fox river, Illinois and Wisconsin: Bulletin of Environmental contamination and toxicology**". Volumen 18: 345 – 349.
2. BONALY J. MIGINIAC-MASLOW M. BROCHIERO E. HOARAU A. y MESTRE J. 1986. "**Cadmium effects on the energetics of *Euglena* during the development of cadmium resistance:**" **Journal of plant physiology**. Volumen 123: 349 – 358.
3. COOK, C.D. and B.J. GUT. 1974. **Water plants of the world: A manual for the identification of the genera of freshwater macrophytes**. The Hague : Junk, 560 p.
4. DEYSSON, GUY. 1966. **Physiologie et Biologie des plantes vasculaires**. Premiere Partie: Nutrition et Metabolisme. SEDES, París. 289 p.
5. FOURQUREAN JAMES W. AND CAI YONG (2001): **Arsenic and Phosphorus In Seagrass Leaves from the Gulf of Mexico**. *Aquatic Botany* 71: 247-258.
6. GARCÍA, JOAN, RUIZ, AY X JUNQUERAS: **Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales construidas**. *Tecnología del agua*. Vol 1.65 (1997) pp 58-65.

7. HUGHES G. 1988. "**Changes in blood of fish following exposure to heavy metals and acid**". En Yasuno M. y B. Whitton. **Biological monitors of environmental pollution**: Tokai University. Press, Tokai: 11 – 17.
8. KELLY M. y WHITTON B. 1989, "**Interspecific differences in Zn, Cd and Pb accumulation by freshwater algae and bryophytes:**" *Hydrobiologia*, volumen175: 1-11.
9. KHATTAK, RIAZ A Y A.L. Page: **Mechanism of manganese adsorption on soil constituents en Biogeochemistry of trace metals** 1991, pp 401-428.
10. KUEHL R. 2001. "**Diseño de experimentos**". Segunda edición. Editorial Thomson Learning. Mexico: 661.
11. LEWANDER M. 1996. "**Macrophytes as indicators of bioavailable Cd, Pb and Zn flor in the river Przemsza, Katowice Región. En Applied Geochemistry**". Volumen 11. Copyright Elsevier Science Ltd: 169- 173.
12. MORA R. R MORA 2003: **Contenido de metales pesados en los sedimentos de los ríos y quebradas adyacentes al Relleno de Río Azul, Río Azul, La Unión, Cartago. Costa Rica**. Informe final del Proyecto de Investigación No. 113-A1-050-Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica.
13. OLGUÍN, E., E. HERNÁNDEZ, P. Coutiño & R. González. 2002. **Aprovechamiento de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. *Tecnologías Ambientales para el Desarrollo Sustentable***, pp. 1-7.

14. PEDRAZA, G. 1997. **Implementación y evaluación de un sistema de descontaminación de aguas servidas con plantas acuáticas. Maestría en Desarrollo Sostenible de Sistemas Agrarios.** Universidad Javeriana-CIPAVIMCA. 89 p.
15. PEÑA C. CARTER D y AYALA-FIERRO F. 2001. **"Toxicología Ambiental: Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental"**. University of Arizona. 150.
16. REDDY, K.R. AGAMI, M. AND TUCKER J. C. (1990): **Influence of Phosphorus on grow and nutrient storage by Water Hyacinth (*Eichhornia Crassipes* 124 (Mart.)Solms) Plants.** Aquatic Botany. 37: 355-365.
17. ROLDÁN, G. y L. F. ÁLVAREZ. 2002. **Aplicación del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para el tratamiento de aguas residuales y opciones de reuso de la biomasa producida.** Revista Universidad Católica de Oriente. 15: 56-71.
18. SAMECKA A. 1998. **"Background concentrations of heavy metals in aquatic briophytes used for biomonitoring in basaltic areas (a cases study from central France)"**. En Environmental Geology Volumen 39. Nº 2: 119-122.
19. SMITH K. y H. HUYCK. 1998. **"An Overview of the abundante, relative mobility, bioavilability and human toxicity of metals"**. En Plumlee and Longsdon: The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A: Processes, techniques and health issues. Vol. 6ª. Michigan – USA: 29-70.

20. TEWARI H. y J. PANT. 1987. "Impact of chronic lead poisoning on the haematological and biochemical profiles of a fish, *Barbas conchonus*: Bulletin of environmental contamination and toxicology. Volumen 38: 748 – 752.
21. WHO. 1990. "Methylmercury. Environmental Health". Geneva.
22. ZAYED, A. 1998. **Phytoaccumulation of trace elements by wetlands.** Journal of Environmental Quality. 27(3):715- 721 (Abstract).

ANEXO A
LOS EFECTOS DE LOS METALES PESADOS
PARA LA SALUD HUMANA

Los metales pesados son de gran interés para los científicos debido a que la presencia de estos en el ambiente tiene efectos negativos sobre la salud del hombre, de los animales y de los cultivos agrícolas. Los metales pesados están en los alimentos y provienen de diversas fuentes, las más importantes son: el suelo contaminado en el que se producen los alimentos para el hombre y los animales; los lodos residuales, los fertilizantes químicos y plaguicidas empleados en agricultura, el uso de materiales durante el ordeño, almacenamiento y transporte de la leche, así como la contaminación por metales pesados de los alimentos y el agua que ingieren los bovinos afectan la calidad de la leche. La presencia de metales pesados en alimentos y particularmente en productos lácteos, constituye un tema de actualidad debido a la contaminación de la cadena trófica involucrada y a los daños que ocasionan a la salud pública. Es necesario enfatizar que los riesgos a la salud de la población infantil necesitan ser evaluados de una manera integral, considerando la exposición crónica de metales pesados en alimentos que por lo regular se presenta asintomática durante un tiempo prolongado de vida. Algunos metales, como el cobre y el zinc, son necesarios en niveles bajos para el funcionamiento normal de los organismos vivos, sin embargo, en concentraciones altas pueden ser muy tóxicos. (1).

La función de los nutrimentos puede ser dividida en dos categorías:

1. Metales esenciales (su ausencia o su insuficiencia en la dieta humana induce después de cierto tiempo algunas modificaciones a los procesos

metabólicos y entonces aparecerán algunas enfermedades) por ejemplo: el sodio, potasio, calcio, cobre, zinc y manganeso y,

2. Metales no esenciales como el plomo, cadmio, mercurio, aluminio entre otros; cuando estos metales son absorbidos en pequeñas cantidades existe la posibilidad de eliminarlos a través de la orina, jugos gástricos, etc. El incremento en la concentración de los metales pesados en los alimentos puede causar un efecto tóxico a quien los consume, la gravedad de este efecto dependerá de la naturaleza, cantidad y forma química de los metales, de la concentración del metal en el alimento y de la resistencia del organismo a los efectos sinérgicos o antagónicos a otros contaminantes químicos.

Según United States Environmental Protection Agency -USEPA- (0.0058 mg/l) es concentración máxima referida para metales totales y según (6-33 mg/kg para As y 0.6 – 10 mg/kg para Cd). concentración máxima. La FAO establece

La vegetación natural expuesta a metales pesados puede incluir toxicidad, captación y bioacumulación, ya que esta vegetación sirve de alimento para los animales pudiendo impactar en los procesos metabólicos, inducir cambios fisiológicos e incrementar la susceptibilidad a las enfermedades. Estos pueden ser biológicamente magnificados en la cadena alimenticia ya que el hombre y animales mayores, se contaminarán ingiriendo animales afectados.

El **plomo**, forma una variedad de complejos orgánicos y compuestos metal-orgánicos. Debido a su tamaño y carga el Pb puede sustituir al calcio siendo su sitio de acumulación los tejidos óseos, además de causar daño en riñones, tracto gastrointestinal, neurológicos, sistema reproductor; siendo el Pb un metal difícilmente movilizable. El plomo se fija en partículas sobre el esqueleto donde se encuentra en estrecha dependencia, con el metabolismo cálcico. En las plantas su concentración es <5 mg/Kg (base seca), un incremento ocasiona

disminución de las funciones de crecimiento y fotosíntesis (Bonaly 1986). La presencia de plomo en el agua dulce generalmente indica la contaminación con desechos metalúrgicos o venenos industriales que contienen plomo; sin embargo, el plomo puede aparecer como el resultado de la corrosión de amalgamas que contienen plomo; en las aguas de desecho, donde el plomo puede estar acomplejado con materia orgánica, puede hallarse solubilizado y se puede requerir de la oxidación de la materia orgánica para lograr la eliminación total del plomo.

El **arsénico**, actúa en el organismo bloqueando los grupos tiol, ocasionando perturbaciones en los procesos de óxido-reducción celular y trastornos del metabolismo, además está comprobada su acción cancerígena. Ocasiona problemas gastrointestinales, cardiovasculares, neurológicos, disfunciones en el sistema nervioso y queratosis. En los vegetales su concentración en base seca es de <1.5 mg/Kg, un incremento de este nivel ocasiona disminución en el crecimiento y clorosis. Debido a la posibilidad de incorporación de este elemento a la cadena alimenticia, el uso está actualmente restringido. A diferencia de lo que sucede con el mercurio, plomo y otros elementos, las formas orgánicas del arsénico no se consideran tóxicas en contraste con la alta toxicidad de las formas inorgánica. La solubilidad en el agua es tan baja que su presencia suele ser un indicador de la existencia de operaciones mineras o metalúrgicas en el lecho de los ríos, o bien que hay áreas agrícolas en donde se están utilizando materiales con arsénico como insecticidas. La presencia en forma coloidal, debe eliminarse mediante los procesos convencionales de tratamiento de aguas. Si el material está presente en forma orgánica, puede eliminarse mediante oxidación del material orgánico con una coagulación posterior, o mediante un proceso de adsorción.

El **cadmio**, se recupera principalmente como un subproducto de la minería. Debido a su toxicidad se encuentra sujeto a una de las legislaciones más

severas en términos ambientales y de salud humana; en la vida acuática, puede incorporarse a los peces por dos rutas: ingestión e introducción en las agallas acumulándose en el hígado, riñones y tracto gastrointestinal. En el hombre sus efectos pueden ser agudos o crónicos. Los alimentos que más contribuyen a la ingesta de cadmio son los vegetales en conjunto, seguidos por los pescados. En las plantas su concentración es <0.1 a 1 mg/Kg en base seca (Bonaly 1986). El cadmio es muy tóxico y se le han atribuido algunos casos de intoxicación con alimentos, se encuentra en concentraciones por debajo de 0.01ppm, en aguas y se introducen en el agua por descargas de desechos industriales y por lo general se encuentran en aguas superficiales.

El **mercurio**, las intoxicaciones se caracterizan por limitación del campo visual, alteración del oído y la palabra, inseguridad en la marcha, ataxia, alteraciones sensitivas, reflejos anormales, salivación y trastornos mentales ligeros. El mercurio es acumulado en el hígado, riñón, cerebro, sangre y cabellos. Tiene efectos teratogénicos y especialmente fetotóxicos. Los factores que determinan los efectos tóxicos en humanos, son la velocidad y la cantidad absorbida, las propiedades fisicoquímicas de los compuestos y la susceptibilidad del individuo. El mercurio y sus compuestos pueden ingresar al cuerpo a través de la piel y el tracto gastrointestinal y respiratorio. Se ha observado que el mercurio traspasa la placenta, en estudios con monos expuestos a vapores del metal. También se han reportado, en mujeres ocupacionalmente expuestas al mercurio, complicaciones en el embarazo, en el parto, bebés de bajo peso, disturbios en la menstruación, abortos espontáneos y en el caso de incidencia, malformaciones en el feto (WHO 1990). Por lo general su concentración en aguas superficiales está por debajo de 0.01 ppm. El mercurio metálico, depositados en los fondos de los ríos, lagos y mares, es transformado en compuestos organometálicos por acción de la bacteria anaeróbica *Metanobacterium amelanskis*. De las sustancias formadas el metilmercurio (CH₃Hg) es la especie más peligrosa formando varios complejos

organometálicos – Hg los que son extremadamente móviles (volátiles) y tóxicos. Estas bacterias que contienen metilmercurio pueden ser rápidamente adsorbido por el fitoplancton y de ahí pasar a los organismos superiores. Debido a que los animales acumulan más rápido de lo que puedan excretarlo, se produce un incremento sostenido de las concentraciones en la cadena trófica (biomagnificación) convirtiéndose el metilmercurio en una amenaza real para la salud humana. Los niveles más altos se presentan en los peces carnívoros de gran tamaño tanto de agua dulce como de agua salada. El metilmercurio constituye aproximadamente un 75% del mercurio total de los pescados de agua marina y cerca del 90% de los de agua dulce.

El **cobre**, en grandes dosis ejerce una acción tóxica e irritante, también puede resultar nocivo en cantidades mucho menores por ser uno de los metales más activos entre los catalizadores oxidantes, destruye de un modo especial el carbono y además inhibe fuertemente el desarrollo bacteriano, por esta razón, cabe pensar en la acción sobre la flora intestinal produciendo trastornos en la digestión o el metabolismo. (SMITH 1998). El cobre puede estar presente en el agua por el contacto de ésta con minerales que contienen cobre o con desechos minerales en la producción de cobre. Sin embargo, es más probable que el cobre que se encuentra en el agua sea un producto de corrosión de las tuberías o de amalgamas de cobre.

El **zinc**, los requerimientos de Zn por las plantas se consideran bajos, los contenidos están influenciados por la edad y estado vegetativo; cuanto más joven es la planta mayor concentración de Zn, siendo la concentración normal entre 15 y 100 ppm. Valores mayores de 400 ppm se consideran tóxicos.

Efectos causados por diferentes metales pesados en el ser humano

METAL PESADO	EFFECTOS EN EL SER HUMANO
Pb	Tejido óseo, riñones, tracto gastrointestinal, neurológicos, sistema reproductor
As	Pertuba los procesos de oxido reducción celular, gastrointestinales, cardiovasculares, sistema nervioso, acción cancerígena, trastornos en el metabolismo
Cd	Efectos agudos y crónicos: cáncer, daño a riñones, osteoporosis.
Hg	Alteración del oído, inseguridad en la marcha, sensitivas, reflejos anormales, salivación, tiene efectos teratógenos, malformaciones en los fetos, abortos, bebes de bajo peso, complicaciones en el embarazo.
Zn	Concentraciones altas influyen negativamente en la biodisponibilidad del Cu, juega un papel fundamental en el metabolismo de Fe, actúa en la síntesis de hemoglobina
Cu	Destruye el carbono, inhibe el desarrollo bacteriano, trastornos en la digestión o el metabolismo.

Fuente: Elaboración propia

Acumulación de Metales Pesados

Las vías de incorporación de los metales pesados a los organismos acuáticos son las siguientes (Smith y Huyck 1998):

- Cationes metálicos libres que son absorbidos a través de los órganos respiratorios externos (agallas), los cuales pasan directamente a la sangre.
- Cationes metálicos libres que son adsorbidos por el cuerpo y luego pasivamente difundidos al torrente sanguíneo.
- Metales que son adquiridos durante la ingesta de organismos (otros peces, bivalvos, o algas) contaminados.

Estos mecanismos, pueden saturarse a altas concentraciones de metales; y el índice de absorción puede exceder al índice de pérdidas, proceso que exige más gasto de energía. Por esta razón, los organismos pueden acumular altas concentraciones de metales pesados en sus tejidos finos. Durante el curso de la vida un depredador consumirá muchas veces su propio peso corporal y si su presa tiene altas concentraciones de metales, el depredador, será incapaz de metabolizar y excretar los metales, acumulando todavía concentraciones más altas en sus tejidos finos. Esta idea de la biomagnificación a lo largo de la cadena alimenticia fue estudiada para los pesticidas y es relevante a los estudios de metales pesados. El mercurio en el medio acuático se acumula en la biota y se biomagnifica en cada uno de los niveles tróficos que constituyen la cadena alimentaria. Por lo anterior, y de acuerdo con el Programa Internacional de Seguridad Química (PISQ) de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la forma más riesgosa de exposición deriva de la ingestión de pescado conteniendo niveles elevados de metilmercurio

Ingesta de metilmercurio (mg/día) por consumo de diversas cantidades de pescado conteniendo distintas concentraciones de mercurio*

CONSUMO DE PESCADO (g/día)	NIVEL DE METILMERCURIO EN PESCADO (mg/kg DE PESO FRESCO)				
	200	500	1000	2000	5000
5	1	2.5	5	10	25
20	4	10	20	40	100
100	20	50	100	200	500
300	60	150	300	600	1000
1000**	200	500	1000	2000	5000

- Adaptado de OMS, 1980 (1). [Datos](#) de GESAMP (1986) indican que la ingesta máxima de pescado es igual a 1 000 g/día (1) OECD. Risk reduction monograph: Mercury, 1994. Fuente: WHO, 1990.

SITUACIÓN ACTUAL RIO VILLALOBOS QUE ENTRA A LA PLANTA DE TRATAMIENTOS LA CERRA

La magnitud y naturaleza de la contaminación del río Villalobos y sus afluentes ha sido estudiada y reportada durante más de 50 años en numerosos informes. Los informes confirman la presencia de concentraciones significativas de metales como Hg (0.002-0.67 mg/lit), Pb (>0.5 mg/lit), Cd (>0.05 mg/lit), Cr (0.050-0.076 mg/lit) y de otros, que como el arsénico se consideran que están presentes a juzgar por la naturaleza, volumen y alto contenido de arsénico de los contaminantes (desechos de curtiembres, pinturas, colorantes, detergentes industriales y caseros) que diariamente son arrojados por toneladas en estos ríos. Las concentraciones de cadmio y arsénico superan los niveles máximos considerados permisibles para aguas de riego (Cd: 0.01 mg/lit y As: 0.10 mg/lit) (AYERS & WESCOTT, 1985, Water quality for agriculture, FAO, Nr 29) y para alimentos (< 1 ppm para Cd y As) (WORLD HEALTH ORGANIZATION--WHO, 1963, International Standards for drinking water).