

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA



CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Tesis previa a la obtención del
título de Ingeniero Ambiental

TEMA:

Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales *Lemna minor* (Lenteja de agua), y *Eichornia crassipes* (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera.

AUTORES:

Mariuxi Del Cisne Jaramillo Jumbo
Edison Darío Flores Campoverde

DIRECTOR DE TESIS:

Ing. José Ulloa

CUENCA - 2012

DECLARATORIA

Nosotros, Mariuxi Del Cisne Jaramillo Jumbo y Edison Darío Flores Campoverde, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Politécnica Salesiana, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en las Leyes de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Cuenca, Enero 10 del 2012

Darío Flores Campoverde

Mariuxi Jaramillo Jumbo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edison Darío Flores Campoverde y Mariuxi Del Cisne Jaramillo Jumbo, bajo mi supervisión.

Ing. José Ulloa
DIRECTOR DE TESIS

ÍNDICE

CAPÍTULO I

EL AGUA

1.1. Generalidades.....	1
1.1.1. Importancia del agua.....	1
1.1.2. Distribución del agua.....	2
1.2. Ciclo hidrológico.....	2
1.3. Propiedades físico-químicas del agua.....	3
1.4. Usos del agua.....	4
1.5. Contaminación del agua.....	4
1.5.1. Definición.....	4
1.5.2. Contaminantes del agua.....	5
1.5.3. Fuentes puntuales y no puntuales de contaminación.....	6
1.6. Calidad del agua.....	7
1.6.1. Índices de calidad de agua.....	8
1.6.1.1. Índice físico-químico.....	8
1.6.1.2. Índices biológicos de la calidad del agua.....	10
1.7. Marco legal.....	10
1.7.1. Legislación básica.....	10
1.7.2. Ley de aguas.....	14

CAPÍTULO II

MINERÍA EN EL ECUADOR

2.1. Áreas mineralizadas más importantes del Ecuador.....	15
2.2. Procesos de mineralurgia y metalurgia extractiva utilizados en el Ecuador....	17
2.2.1. Proceso de Amalgamación.....	17
2.3. Problemática del procesamiento de minerales y metalurgia en el Ecuador.....	19
2.4. Metales pesados y toxicidad.....	20
2.5. Contaminación del agua.....	20
2.5.1. Contaminación del agua por el mercurio.....	21
2.6. Mercurio.....	21

2.6.1. Ciclo del mercurio.....	22
2.6.2. Usos del mercurio.....	23
2.6.3. Toxicología.....	24
2.6.4. Exposiciones medias estimadas.....	24
2.6.5. Efectos del mercurio sobre el medio ambiente.....	25
2.6.5.1. Acumulación de mercurio en las redes alimenticias.....	25
2.6.5.2. Compuestos de mercurio tóxicos para la vida silvestre.....	25
2.6.5.3. Ecosistemas vulnerables.....	26
2.6.6. Fuentes de contaminación ambiental.....	26
2.6.6.1. Origen natural.....	26
2.6.6.2. Fuentes antropogénicas.....	26

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS A UTILIZAR

3.1. Humedales artificiales.....	28
3.1.1. Funciones de los humedales artificiales.....	29
3.1.2. Tipos de humedales artificiales.....	29
3.2. Fitorremediación.....	31
3.2.1. Tipos de fitorremediación.....	32
3.2.2. Criterios de selección de plantas para la fitorremediación.....	33
3.2.3. Mecanismos de resistencia a los metales pesados.....	35
3.2.4. Mecanismo de acumulación de metales en las plantas.....	35
3.3. Macrófitas acuáticas.....	36
3.4. Fitosociología vegetal.....	38
3.5. Descripción de las especies vegetales.....	39
3.5.1. Jacinto de agua (<i>Eichornia crassipes</i>).....	39
3.5.1.1. Taxonomía.....	39
3.5.1.2. Descripción.....	40
3.5.1.3. Composición química.....	40
3.5.1.4. Habitat.....	41
3.5.1.5. Distribución geográfica.....	41
3.5.1.6. Reproducción.....	42
3.5.1.7. Cultivo.....	42

3.5.1.8. Parámetros de crecimiento.....	42
3.5.2. Lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>).....	43
3.5.2.1. Taxonomía.....	43
3.5.2.2. Descripción de la especie.....	43
3.5.2.3. Composición química.....	44
3.5.2.4. Parámetros de crecimiento.....	45
3.5.2.4.1. Temperatura.....	45
3.5.2.4.2. Iluminación.....	45
3.5.2.4.3. Densidad y cosecha.....	45
3.5.2.4.4. Composición química del agua.....	46
3.5.2.4.5. pH.....	46
3.5.2.4.6. Salinidad y conductividad.....	47
3.5.2.4.7. Nitrógeno.....	47
3.5.2.4.8. Fósforo.....	48
3.5.2.4.9. Otros elementos importantes.....	48
3.5.2.4.10. Materia orgánica.....	48
3.5.2.4.11. Sustancias gaseosa.....	49

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Análisis de aguas mineras.....	50
4.2. Obtención de las especies.....	50
4.3. Recolección e identificación de las especies vegetales.....	54
4.4. Metodología experimental.....	56
4.4.1. Procedimiento de la metodología.....	58
4.4.1.1. Fase de adaptación.....	58
4.4.1.2. Fase de nutrición.....	60
4.4.1.3. Fase de intoxicación.....	60
4.4.1.3.1. Preparación de la solución.....	60
4.4.1.3.1.1. Reactivos.....	60
4.4.1.3.1.2. Materiales.....	61
4.4.1.3.1.3. Cálculo.....	61
4.4.1.3.1.4. Procedimiento.....	62

4.4.1.4. Recolección de las muestras.....	63
---	----

CAPÍTULO V

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados.....	65
5.2. Eficiencia del proceso.....	66
5.3. Análisis estadístico.....	68

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.....	74
6.2. Recomendaciones.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

EL AGUA

- Figura 1.1** Distribución mundial del agua.....2
- Figura 1.2** Ciclo hidrológico.....3
- Figura 1.3** Fuentes puntuales y difusas de contaminación del agua.....7

CAPÍTULO II

MINERÍA EN EL ECUADOR

- Figura 2.1** Proceso de gravimetría – amalgamación – generación stock de arenas...18
- Figura 2.2** Ciclo del Mercurio.....23
- Figura 2.3** Categorización de fuentes de liberaciones de mercurio al medio ambiente y principales opciones de control.....27

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS A UTILIZAR

- Figura 3.1** Humedal de flujo superficial (HFS).....30
- Figura 3.2** Humedal de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH).....30
- Figura 3.3** Humedal de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV).....31
- Figura 3.4** Tipos de fitorremediación, indicando en que zona de la planta es donde ocurre el proceso.....32
- Figura 3.5** Plantas acuáticas (adaptado de Tchobanoglous, G. Aquatic plant system for wastewater treatment).....37
- Figura 3.6** Laguna de Paccha.....39
- Figura 3.7** Morfología de la *Eichornia crassipes*.....40
- Figura 3.8** Morfología de la *Lemna minor*.....44

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Figura 4.1 Distribución de las especies en la Laguna de Paccha.....	52
Figura 4.2 <i>Lemna minor</i> (Lenteja de agua).....	52
Figura 4.3 <i>Eichornia crassipes</i> (Jacinto de agua).....	53
Figura 4.4 <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> (Redondita de agua).....	53
Figura 4.5 <i>Typha latifolia</i> (Totora).....	53
Figura 4.6 <i>Azolla caroliniana</i> (Helecho de agua).....	54
Figura 4.7 Recolección de la <i>Eichornia crassipes</i>	55
Figura 4.8 Recolección de la <i>Lemna minor</i>	55
Figura 4.9 Tratamiento de control.....	57
Figura 4.10 Esquema del procedimiento de la metodología.....	57
Figura 4.11 Posicionamiento de las especies en los recipientes.....	58
Figura 4.12 Variación del pH.....	59
Figura 4.13 Variación de la conductividad.....	59
Figura 4.14 Preparación de la solución.....	63
Figura 4.15 Muestras para realizar el análisis de DBO ₅ y DQO.....	64

CAPÍTULO V

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Figura 5.1 Proceso de necrosis en la <i>Eichornia crassipes</i>	65
Figura 5.2 Proceso de clorosis en la <i>Lemna minor</i>	65
Figura 5.3 Porcentaje de absorción.....	67
Figura 5.4 Gráfica de probabilidad normal.....	69
Figura 5.5 Gráfica de valores de ajuste.....	70
Figura 5.6 Gráfica del histograma.....	70
Figura 5.7 Gráfica de dispersión de datos.....	71
Figura 5.8 Gráfica de caja.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

EL AGUA

Tabla 1.1 Efectos de los distintos tipos de contaminación.....	6
Tabla 1.2 Efectos de los usos del agua sobre su calidad.....	7
Tabla 1.3 Características promedio de las aguas residuales de la ciudad de Cuenca.....	8
Tabla 1.4 Parámetros utilizados en los índices físico-químicos de la calidad del agua.....	9
Tabla 1.5 Límites máximos permisibles para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces frías o cálidas y en aguas marinas y de estuarios.....	11
Tabla 1.6 Límites de descarga para un cuerpo de agua dulce.....	12
Tabla 1.7 Límites de descarga para un cuerpo de agua marina.....	13

CAPÍTULO II

MINERÍA EN EL ECUADOR

Tabla 2.1 Títulos entregados por la Dirección Nacional de Minería.....	15
Tabla 2.2 Áreas mineralizadas del Ecuador con sus reservas y contenidos.....	16
Tabla 2.3 Formas del mercurio en su estado natural.....	22
Tabla 2.4 Ingesta diaria promedio estimada y retención en el cuerpo de diferentes formas de mercurio en una situación aplicable a la población general no expuesta al mercurio en el lugar de trabajo.....	25

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS A UTILIZAR

Tabla 3.1 Procesos utilizados por las plantas para asimilar contaminantes.....	33
Tabla 3.2 Plantas capaces de acumular cuatro o más metales.....	34
Tabla 3.3 Acumulación de metales pesados en las plantas acuáticas.....	36
Tabla 3.4 Composición de la <i>Eichornia crassipes</i>	41
Tabla 3.5 Composición de la <i>Lemna minor</i>	44

Tabla 3.6 Rango de concentración de nutrientes en aguas donde las <i>Lemnaceae</i> crecen.....	46
---	----

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Tabla 4.1 Taxonomía de las especies encontradas en la laguna de Paccha.....	54
--	----

CAPÍTULO V

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Tabla 5.1 Concentración final de mercurio.....	66
Tabla 5.2 Porcentaje de absorción.....	67
Tabla 5.3 Variables consideradas.....	68

INTRODUCCIÓN

Todas las actividades que desarrollamos en nuestra vida diaria están relacionadas con el uso del agua, ya que es el líquido indispensable para el desarrollo de la misma. En los últimos años se ha incrementado la contaminación de los cuerpos de agua debido al manejo inadecuado de las aguas residuales urbanas e industriales. Ante lo cual es necesario promover el desarrollo de tecnologías que ayuden a mejorar la calidad de los efluentes y que sean a bajo costo.

Una de las mayores preocupaciones con respecto a la contaminación del agua es la presencia de metales, esta puede darse por fenómenos de disolución, o bien a su existencia en forma de partículas en suspensión que pueden acumularse y sedimentarse.

Una situación preocupante a nivel del país es la contaminación del agua resultante de la producción minera en especial la de pequeña escala ya que es una de las actividades que no es muy controlada por las autoridades por lo que genera gran impacto en la calidad de la misma, siendo uno de los problemas la contaminación con metales pesados especialmente con mercurio que resulta del proceso de la quema del amalgama.

Los metales son elementos que se pueden encontrar en forma natural en la superficie del agua no contaminada según el tipo de suelo y rocas presentes a lo largo de una corriente superficial. En pequeñas concentraciones muchos de estos metales son esenciales para la vida acuática y la humana en general. Aunque algunas veces pueden encontrarse en los sistemas acuáticos en concentraciones que sobrepasan a los límites permisibles, ocasionados en la mayoría de los casos por la actividad humana.

Actualmente se ha producido un avance en la Biotecnología que es la ciencia que se dedica a remediar lugares o medios contaminados mediante el uso de plantas y organismos relacionados, proceso denominado fitorremediación, la misma que ayudado mucho en la descontaminación de metales pesados.

De manera más completa, la fitorremediación puede definirse como una tecnología sustentable que se basa en el uso de plantas para reducir la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, sedimentos, agua, y aire, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz que conducen a una serie de mecanismos para reducir los contaminantes.

Aunque a las macrófitas acuáticas se las ha considerado por varios autores como una plaga debido a su rápido crecimiento, ya que en ocasiones llegan a invadir lagunas y generar varios problemas, si se les proporciona un adecuado manejo a su capacidad de proliferación, absorción y de bioacumulación se convierte en una herramienta útil para el tratamiento de aguas residuales en especial aquellas que se encuentran contaminadas con metales pesados.

JUSTIFICACIÓN

En nuestro país actualmente la explotación de minerales se ha ido incrementando tanto la minería a mayor escala como la de producción artesanal que es la que más daño causa a nuestro ambiente debido a la falta de control, por lo que en los últimos años se ha acentuado la contaminación de los cuerpos de agua, por el manejo inadecuado de las aguas residuales procedentes de esta actividad, especialmente en varios sectores del país.

Las tecnologías convencionales que han sido investigadas y utilizadas en los países desarrollados, pueden ser muy eficientes pero generalmente los costos son muy altos, tanto de construcción como de operación, por lo cual se hace necesario desarrollar nuevos sistemas, para mejorar la salud de la población y del medio ambiente.

En nuestro país se debe investigar y desarrollar el uso de alternativas que aprovechen y apliquen los procesos naturales que ocurren en el ecosistema para depurar las aguas contaminadas, ofreciendo la posibilidad de recuperar los recursos presentes en el mismo para su posterior utilización, generándose un valor económico que contribuye a la sostenibilidad del sistema.

El tratamiento de aguas residuales por medio de estanques con plantas acuáticas llamado fitorremediación, ha despertado un gran interés en la investigación por el potencial que presenta para la depuración de la misma. Algunos de estos sistemas han logrado proporcionar un tratamiento integral, en el cual no solo se remueven eficientemente material orgánico y sólidos suspendidos sino que también se logra reducir nutrientes, sales disueltas, metales pesados y organismos patógenos. Aunque mezclando las tecnologías con la fitorremediación puede mejorar la eficiencia de los tratamientos y eliminar los problemas de contaminación.

OBJETIVOS

Objetivo General:

- Disminuir la concentración de sales de mercurio mediante plantas que actúan como bioacumuladores de los mismos.

Objetivos Específicos:

- Establecer la capacidad de absorción de cada una de las especies vegetales.
- Identificación de la fitosociología vegetal de las plantas, *Lemna minor* (Lenteja de agua), y *Eichhornia Crassipes* (Jacinto de agua).
- Identificar el cambio en los parámetros DBO₅ y DQO en el agua.

HIPÓTESIS

La presencia de las dos especies vegetales *Lemna minor* (Lenteja de agua) y *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en aguas residuales mineras influyen en la concentración de metales disueltos como las sales de mercurio.

CAPÍTULO I

EL AGUA

1.1. Generalidades.

El agua es uno de los compuestos químicos más importantes para los seres humanos y la vida en general, ya que se encuentra distribuido en todo el planeta. Este cubre aproximadamente el 72% de la superficie terrestre, y la materia viva incluye altos porcentajes de esta sustancia en su composición, debido a que la requieren para realizar sus funciones.

Una característica singular del agua es la de ser única sustancia química que en nuestro planeta se presenta en los tres estados de agregación: sólido, líquido y gaseoso, en estado natural.

1.1.1. Importancia del agua.

Dada la importancia del agua para la vida de todos los seres vivos, y debido al aumento de las necesidades por el continuo desarrollo de la humanidad, el hombre está en la obligación de proteger este recurso. El agua dulce es un recurso renovable, pero la disponibilidad de la misma está disminuyendo de manera constante. En muchas partes del mundo, la demanda de agua ya excede al abastecimiento, a medida que aumenta la población mundial.

Es un deber de todos cuidar nuestros recursos hidrológicos, debido a que la disponibilidad del agua es fundamental para el mantenimiento de los ecosistemas y para las comunidades, la industria, la agricultura y las actividades comerciales, ya que su presencia o ausencia tiene efectos sobre los seres vivos.

1.1.2. Distribución del agua.

En la figura 1.1 observamos la distribución total de los distintos tipos de agua existentes en nuestro planeta. Se observa que el porcentaje más elevado es el agua salada de mares y océanos con un 97% que no es muy útil para las actividades humanas; seguido de las capas de hielo, glaciares y aguas marítimas interiores con un 77%; en la atmósfera y lagos encontramos un 61%; en la humedad del suelo un 39%; en las aguas subterráneas el 22%; y en los ríos menos del 0.4%.

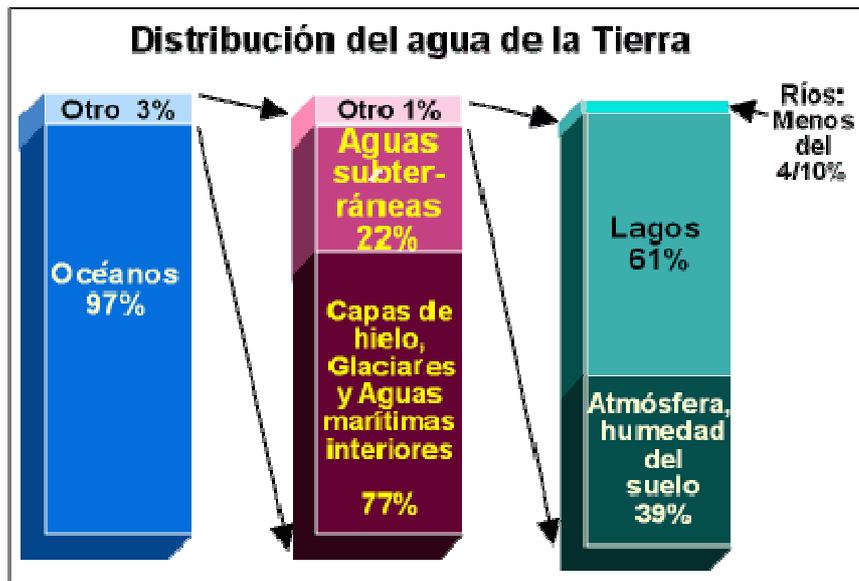


Figura 1.1 Distribución mundial del agua.

Fuentes: USGS (United States Geological Survey), EPA (Environment Protection Agency).

1.2. Ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico describe el movimiento y conservación del agua en la tierra, abarcando toda su presencia sobre la superficie del planeta o debajo de ella. La cantidad total de agua permanece prácticamente en constante equilibrio por compensación de los procesos de evaporación y transpiración, proporcionando a la tierra un suministro constante de agua la cual se distribuye alrededor del planeta.



Figura 1.2 Ciclo hidrológico.

Fuente: USGS (United States Geological Survey).

1.3. Propiedades físico-químicas del agua.

El agua es un líquido inodoro, insípido, transparente e incoloro, debido a su estructura polar el agua disuelve o dispersa sustancias mucho mejor que otros líquidos.

Algunas propiedades que más transcendencia tiene desde el punto de vista medioambiental son¹:

- Altos valores de capacidad calorífica y calores latentes de fusión y vaporización.
- Alta conductividad térmica.
- Temperaturas de fusión y ebullición altas.
- Variación de la densidad.
- Alto valor de la tensión superficial.
- Gran capacidad disolvente, que se debe a :

¹ OROZCO, Carmen y otros, *Contaminación Ambiental una visión desde la química*, Intenational Thomson Editores Spain, Madrid 2003, p. 38-40.

1. La capacidad de reacción.
2. La capacidad de formación de enlaces de hidrógeno.
3. El pequeño tamaño molecular.
4. El elevado valor de su momento dipolar.
5. El alto valor de la constante dieléctrica.

1.4. Usos del agua.

Es importante tener en cuenta los diferentes usos del agua por el hombre, para comparar con las necesidades en el aspecto cuantitativo porque tendrá una gran importancia a la hora de valorar la contaminación del agua.

Habitualmente los principales usos son los siguientes: urbano, doméstico o de abastecimiento, industrial y agropecuario, además la generación de energía eléctrica, como medio de vida acuático (acuíferos), recreativo y estético, navegación entre otros.

“A nivel mundial se considera un consumo total de agua del orden de 3000 Km³/año, repartidos en los siguientes porcentajes aproximados: uso agrario (75%), uso industrial (20%) y uso doméstico (5%)”.²

1.5. Contaminación del agua.

1.5.1. Definición.

“La contaminación consiste en una modificación, generalmente provocada por el hombre, de la calidad del agua, haciéndola impropia o peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca y las actividades recreativas, así como los animales domésticos y la vida natural” (Carta del Agua, Consejo de Europa, 1968).

² OROZCO, y otros, *Contaminación Ambiental una visión desde la química*, Intenational Thomson Editores Spain, Madrid 2003, p.35

El agua es un componente del medio ambiente que se deteriora en mayor grado debido a la actividad del hombre. No solo recibe de forma directa fuertes contaminantes, sino también productos que se generan primero en la atmósfera o en el suelo.

De las definiciones de contaminación se debe destacar algunos aspectos fundamentales:

- Se parte de la calidad o composición natural del agua.
- Se mide la contaminación en función del uso al que el agua está destinada.
- Se considera contaminación la provocada de forma directa o indirecta por la actividad humana.

1.5.2. Contaminantes del agua.

La clasificación de los contaminantes debido a la naturaleza físico-química, es la siguiente:³

- **Agente físico:** Calor.
- **Compuestos químicos inorgánicos:** Sales: aniones y cationes; ácidos y bases; elementos tóxicos: metales, y no metales; elementos radiactivos; gases; especies minerales no disueltas.
- **Compuestos químicos orgánicos:** Hidratos de carbono, aminoácidos, proteínas, aceites y grasas, hidrocarburos, jabones y detergentes, pesticidas, entre otros compuestos.
- **Bionutrientes:** Compuestos nitrogenados y compuestos fosforados.
- **Microorganismos:** Bacterias, virus, hongos y algas.

También tenemos algunos contaminantes específicos que son muy usados en la actualidad como los pesticidas y bionutrientes, teniendo en cuenta a los metales, policlorobifenilos (PCBs), dioxinas e hidrocarburos.

³ OROZCO, y otros, *Contaminación Ambiental una visión desde la química*, Intenational Thomson Editores Spain, Madrid 2003, p.63,64

1.5.3. Fuentes puntuales y no puntuales de contaminación.

En relación a los efectos sobre la calidad del agua se debe distinguir las fuentes puntuales como las fábricas, industrias y comercios que vierten sustancias tóxicas en el agua, de las fuentes no puntuales como las emisiones procedentes de vehículos, escorrentía agrícola y urbana que arrastran compuestos orgánicos y metales como se observa en la figura 1.3, en la actualidad son las que mayor problema causan como se detalla en la tabla 1.1.

Principales categorías de contaminación		Categorías generales de efectos causados			
		Daños a los recursos vivientes	Peligros para la salud humana	Impedimentos para riego e industria	Reducción de los lugares de distracción
Desagüe de aguas residuales domésticas	Microbiana directa	-	xx	-	x
	Microbiana indirecta	-	xx	x	-
	Eutrofización y procesos afines	xx	x	x	xx
Productos de desechos industriales	Metales pesados	x	xx	x	-
	Petroquímica	-	xx	x	x
	Aceites, etc	-		x	xx
	Plaguicidas	x	xx	-	-
	Detergentes	xx	-	-	x
	Calor	xx	-	x	x
Actividad agrícola	Abonos	x	xx	-	-
	Pesticidas	x	xx	-	-

x Categoría general de efectos más frecuentemente asociados con esta clase de contaminación.
xx Categoría más importante de los efectos del tipo concreto de contaminación.

Tabla 1.1 Efectos de los distintos tipos de contaminación.

Fuente: Hernández Aurelio, Sistema para depuración de aguas residuales.

La contaminación de los cauces receptores superficiales y subterráneos (ríos, lagos, embalses, acuíferos, mar) tienen su origen en:

- Precipitación atmosférica.
- Escorrentía agrícola y de zonas verdes.

- Escorrentía superficial de zonas urbanizadas.
- Vertidos de aguas procedentes del uso doméstico.
- Descargas de vertidos industriales.

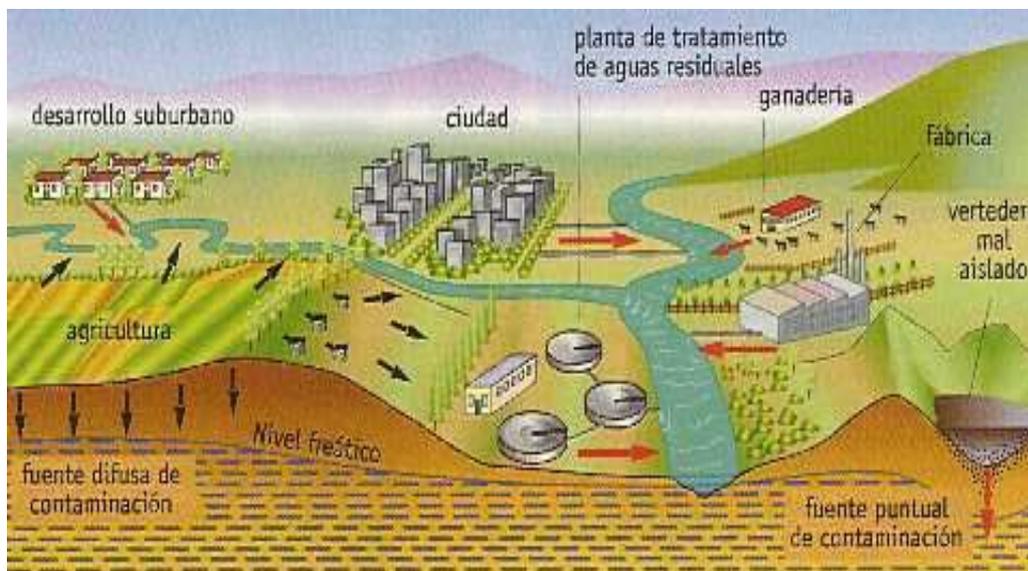


Figura 1.3 Fuentes puntuales y difusas de contaminación del agua.
Fuente: Rodríguez Eduardo, Origen de contaminación de las aguas, 2007.

1.6. Calidad del agua.

La calidad del agua es tan importante como su cantidad. Aunque una vez utilizada la mayoría retorna a sus cauces originales pero con su calidad degradada como observamos en la tabla 1.2.

Usos	Efectos sobre la calidad del agua
Doméstico/industrial	Disminución del oxígeno disuelto.
Industria/minería	Disminución del oxígeno disuelto; contaminación del agua con metales y compuestos orgánicos; drenaje ácidos de minas.
Termoeléctrica	Incremento de la temperatura del agua.
Irrigación/residuos animales	Salinización del agua superficial y agua subterránea, disminución del oxígeno disuelto.

Tabla 1.2 Efectos de los usos del agua sobre su calidad.
Fuente: Spiro Thomas, Química medioambiental, 2007.

En la Tabla 1.3 se resume valores promedios más importantes evaluadas en aguas residuales de la ciudad de Cuenca (área urbana).

Parámetro	Unidad	Valor promedio
DBO	mg/l	85
DBO/DQO	--	2,8
DBO, aporte doméstico	gr/(hab*día)	45
Sólidos en suspensión totales (SST)	mg/l	141
Sólidos en suspensión volátiles (SSV)	mg/l	95
Relación SST/SSV	--	0,7
Coliformes fecales	NMP/100ml	6 ⁷

Tabla 1.3 Características promedio de las aguas residuales de la ciudad de Cuenca.

Fuente: Planes maestros de agua potable y saneamiento para la ciudad de Cuenca – II Etapa.

1.6.1. Índices de calidad de agua.

Es la relación de varios parámetros para conocer el grado de la calidad del agua dependiendo del uso a la que vaya a ser destinada. Estos índices se pueden clasificar en dos tipos:

- Índice físico-químico.
- Índice biológico.

1.6.1.1. Índice físico-químico.

Estos índices son una serie de valores numéricos que engloba varios parámetros con la finalidad de determinar la calidad del agua. Los parámetros comúnmente utilizados en los índices se exponen en la tabla 1.4.

Parámetros utilizados en los índices físico-químicos de calidad de aguas			
Parámetros organolépticos	Color		
	Turbidez		
	Olor		
	Sabor		
Parámetros físicos	Sólidos totales (residuo seco)	Sólidos suspendidos (sedimentables y no sedimentables)	
		Sólidos filtrables (coloidales y disueltos)	
	Temperatura		
	Conductividad		
	Radiactividad		
Parámetros químicos	Salinidad		
	Dureza		
	pH		
	Alcalinidad		
	Acidez		
	Oxígeno disuelto		
	Materia orgánica		
	DBO (demanda biológica de oxígeno)		
	DQO (demanda química de oxígeno)		
	COT (carbono orgánico total)		
	Bionutrientes (N,P)		
	Otros compuestos	Metales pesados	
		Aniones y cationes	
		Sustancias indeseables	
Sustancias tóxicas			
Parámetros microbiológicos	Indicadores	Coliformes (totales y fecales)	
		Estreptococos fecales	
		Enterococos fecales	
	Ensayos específicos (salmonella, entre otros)		

Tabla 1.4 Parámetros utilizados en los índices físico-químicos de la calidad del agua.

Fuente: Agencia Catalana del Agua, Revista ecosistemas.

Los índices físico-químicos más utilizados son:

- Índice de calidad general (ICG).
- Índice simplificado de calidad de agua (ISQA).

1.6.1.2. Índices biológicos de la calidad del agua.

Es un valor que expresa el efecto de la contaminación sobre una comunidad biológica basándose en la respuesta de estos a las distintas perturbaciones permitiendo un estudio de la influencia real de la contaminación de las aguas sobre el ecosistema acuático, estos índices pueden ser de dos tipos:

- **Índices bióticos:** Permite la valoración del estado ecológico de un ecosistema acuático afectado por un proceso de contaminación, entre los cuales tenemos:⁴
 1. Biological monitoring working party (BMWP).
 2. Índice biótico de Trent (TBI).
 3. Índice de Chandler.

- **Índice de diversidad:** Mide la abundancia y biodiversidad de especies de un sitio, a mayor biodiversidad mayor puntuación, de los cuales tenemos:
 1. Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H).
 2. Índice de diversidad de Simpson-Gini (Y).
 3. Índice de Berger-Parker (B).
 4. Índice de diversidad de McIntosh.

1.7. Marco legal.

1.7.1. Legislación básica.

En el Ecuador lo que se refiere a las normas de calidad ambiental y descarga de efluentes del recurso agua para la prevención y control de la contaminación ambiental, se las puede obtener en el texto unificado de legislación ambiental secundaria (TULAS), en los siguientes artículos:

4.1.2.2. Se utiliza los siguientes valores máximos permisibles para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuarios.

⁴ Fuente: www.miliarium.com/.../Índices/ÍndicesCalidadAgua.htm

Parámetros	Expresado	Unidad	Límite máximo permisible		
			Agua fría dulce	Agua cálida dulce	Agua marina y de estuario
Clorofenoles		mg/l	0,5	0,5	0,5
Bifenilos policlorados/PCBs	Concentración total de PCBs.	mg/l	0,001	0,001	0,001
Oxígeno Disuelto	O.D.	mg/l	No menor al 80% y no menor a 5 mg/l	No menor al 60% y no menor a 5 mg/l	No menor al 60% y no menor a 5 mg/l
Potencial de hidrógeno	pH		6, 5-9	6, 5-9	6, 5-9, 5
Sulfuro de Hidrógeno ionizado	H ₂ S	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002
Amoniaco	NH ₃	mg/l	0,02	0,02	0,4
Aluminio	Al	mg/l	0,1	0,1	1,5
Arsénico	As	mg/l	0,05	0,05	0,05
Bario	Ba	mg/l	1,0	1,0	1,0
Berilio	Be	mg/l	0,1	0,1	1,5
Boro	B	mg/l	0,75	0,75	5,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,001	0,001	0,005
Cianuro Libre	CN ⁻	mg/l	0,01	0,01	0,01
Zinc	Zn	mg/l	0,18	0,18	0,17
Cloro residual	Cl	mg/l	0,01	0,01	0,01
Estaño	Sn	mg/l			2,00
Cobalto	Co	mg/l	0,2	0,2	0,2
Plomo	Pb	mg/l			0,01
Cobre	Cu	mg/l	0,02	0,02	0,05
Cromo total	Cr	mg/l	0,05	0,05	0,05
Fenoles monohídricos	Expresado como fenoles	mg/l	0,001	0,001	0,001
Grasas y aceites	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3	0,3	0,3
Hierro	Fe	mg/l	0,3	0,3	0,3
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	0,5	0,5	0,5
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)	Concentración total de HAPs	mg/l	0,0003	0,0003	0,0003
Manganeso	Mn	mg/l	0,1	0,1	0,1
Materia flotante	Visible		Ausencia	Ausencia	Ausencia
Mercurio	Hg	mg/l	0,0002	0,0002	0,0001
Níquel	Ni	mg/l	0,025	0,025	0,1
Plaguicidas organoclorados totales	Concentración de organoclorados totales	µg/l	10,0	10,0	10,0
Plaguicidas organofosforados totales	Concentración de organofosforados totales	µg/l	10,0	10,0	10,0
Piretroides	Concentración de piretroides totales	mg/l	0,05	0,05	0,05

Plata	Ag	mg/l	0,01	0,01	0,005
Selenio	Se	mg/l	0,01	0,01	0,01
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	0,5	0,5	0,5
Temperatura	°C		Condiciones naturales + 3 máxima 20	Condiciones naturales + 3 máxima 32	Condiciones naturales + 3 máxima 32
Coliformes Fecales	nmp/100 ml		200	200	200

Tabla 1.5 Límites máximos permisibles para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces frías o cálidas y en aguas marinas y de estuarios.

4.2.3 Normas de descarga de efluentes a un cuerpo de agua o receptor: agua dulce y agua marina.

4.2.3.7 Toda descarga a un cuerpo de agua dulce, deberá cumplir con los valores establecidos a continuación.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aldehídos		mg/l	2,0
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	nmp/100 ml		Remoción > al 99,9 %
Color real	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	250
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0

Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitratos + Nitritos	Expresado como Nitrógeno (N)	mg/l	10,0

Tabla 1.6 Límites de descarga para un cuerpo de agua dulce.

4.2.3.8 Toda descarga a un cuerpo de agua marina, deberá cumplir, por lo menos con los siguientes parámetros.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Arsénico total	As	mg/l	0,5
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Bario	Ba	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,2
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,2
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	nmp/100 ml		Remoción > al 99,9 %
Color real	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅ .	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	250
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,001
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno total	N	mg/l	40
Plata	Ag	mg/l	0,1

Plomo	Pb	mg/l	0,5
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,2
Sólidos suspendidos totales		mg/l	100
Sulfuros	S	mg/l	0,5
Organoclorados totales	Concentración de organoclorados totales	mg/l	0,05
Zinc	Zn	mg/l	10

Tabla 1.7 Límites de descarga para un cuerpo de agua marina.

1.7.2. Ley de aguas.

En cuanto a la Ley de Aguas en el Título VII, artículo 42 se encuentra lo que se refiere al agua para fines energéticos, industriales y mineros.

Art. 42.- Se concederán derechos de aprovechamiento de aguas para la generación de energía destinada a actividades industriales y mineras, especialmente a las contempladas en el Plan General de Desarrollo del País.

Las aguas destinadas a la generación de energía y trabajos mineros, deberán ser devueltas a un cauce público, obligándose al concesionario a tratarlas, si el Consejo Nacional de Recursos Hídricos lo estimare necesario.

CAPÍTULO II

MINERÍA EN EL ECUADOR

La minería en el Ecuador, constituye un sector productivo de gran perspectiva, tanto desde el punto de vista ocupacional como económico. En la actualidad, por motivos socioeconómicos o técnicos, la explotación de minerales metálicos se ha ido incrementando tanto en minas de producción artesanal, como la minería a mayor escala, la cual recupera oro y plata entre otros metales preciosos.

La DINAMI (Dirección Nacional de Minería) desde su creación ha otorgado para exploración (203.513 ha mineras), y ha concebido para explotación (28.566 ha mineras), datos que se indican en la tabla 2.1.

Actividad	Títulos
Exploración	296
Explotación	245
Autorización de plantas de beneficio instaladas	27
Licencias de comercialización	147
Matriculas pequeña minería	417

Tabla 2.1 Títulos entregados por la Dirección Nacional de Minería (DINAMI), 1991-1995.

2.1. Áreas mineralizadas más importantes del Ecuador.

En la tabla 2.2 se presentan las áreas mineralizadas más importantes del Ecuador, que al momento, están en explotación o tienen perspectivas de desarrollo a corto y mediano plazo.

Áreas mineras más importantes del Ecuador:

Ponce Enríquez	Molleturo	Laguar	Portovelo
Bella Rica	Sígsig	La Plata	Zaruma
Los Ángeles	Ushcurrumi	Macuchi	Minas Nuevas
San Gerardo	San Bartolomé	Junín	Malacatos
Philzum	Nambija	El Corazón	Limón-Indanza
Pucará	Guaysimi	Pacto	El Altar
Zamora	Chinapintza	La Fortuna	Los Bancos

Distrito Minero Aurífero	Tipo de Mineralización	Reserva totales (ton)	Contenidos
Zaruma – Portovelo	Mezo-epitermales de baja sulfuración. Filoneanos	Oro: 400 Plata: 800	Au: 12 g/ton Ag: 63 g/ton Cu: 5% Zn: 10%
Ponce Enríquez	Hipo-mesotermales, filoneanos relacionados a pórfidos	Oro: 70 No cuantificado Ag, Cu, Pb, Zn, As, Mo	Au: 26 – 80 g/ton Ag: 24 g/ton
Nambija – Guaysimi	Skarn-epitermales	Oro: 300	Au: 22 g/ton y clavos de hasta 1000 g/ton
Chinapintza	Epitermales de brecha y veta de baja sulfuración	Oro: 12 Plata: 180 No cuantificado Cu, Pb, Zn.	Au: 50 g/ton Ag: 126 g/ton Zn: 4,6%
Macuchi – La Plata	Sulfuros masivos tipo Kuroko	Oro: 3 Plata: 32 Cobre: 24.250	Au: 12 g/ton Ag: 68 g/ton Cu: 5%
Molleturo	Vetas de baja sulfatación meso-epitermales	Oro: 20 Plata: 50	Au: 27 g/ton Ag: 392 g/ton Pb: 0,3%
Placeres auríferos	Secundarios de Placeres	Oro: más de 100 No cuantificado Pt, Pd.	Au: 0,3 - 18 g/m ³ Ag: 0,1 g/m ³

Tabla 2.2 Áreas mineralizadas del Ecuador con sus reservas y contenidos.

Fuente: Escuela Politécnica del Ejército, El proceso de minerales en el Ecuador: visión de un metalurgista, 2003.

2.2. Procesos de mineralurgia y metalurgia extractiva utilizados en el Ecuador.⁵

Los procesos de mineralurgia y metalurgia extractiva actualmente utilizados en el Ecuador se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) Proceso de gravimetría – amalgamación – generación stock de arenas.
- b) Proceso de cianuración – cementación en zinc.
 - Cianuración por agitación.
 - Cementación en canastas y Merrill-Crowe.
- c) Proceso Carbón en pulpa (CIP) – Electrodeposición (EW).
 - Molienda – concentración por flotación.
 - Proceso molienda – flotación – cianuración – Merrill – Crowe.
- d) Tratamiento de mineral aluvial.

2.2.1. Proceso de Amalgamación.

El proceso de la amalgamación consiste en las siguientes partes:

- 1.- Preparación del mineral y molienda: Algunas veces el mineral se encuentra en condiciones químicas apropiadas; pero en otras es necesario modificar su composición para hacerlo amalgable.
- 2.- Formación de la amalgama: Se efectúa en formas variadas, esta amalgamación empieza con los aparatos de molienda, ya que el sacudimiento y agitación que el mineral soporta es favorable al contacto del mercurio con los metales valiosos, otras veces solo empieza después de la molienda o simultáneamente.
- 3.- Separación de la amalgama de las gangas estériles (materia inútil que acompaña a los minerales): Se proceder a separar el mercurio excedente de los minerales ya empobrecidos o relaves.
- 4.- Tratamiento de la amalgama: Una vez conectada la amalgama, será preciso proceder a un lavado hasta llegar a la separación del metal valioso.

⁵ DE LA TORRE E, DÍAZ X, *El proceso de minerales en el Ecuador: visión de una metalurgista*, Departamento de Mineralurgia extractiva, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, pag 15

A continuación se esquematiza las características técnicas del proceso de gravimetría – amalgamación – generación stock de arenas.

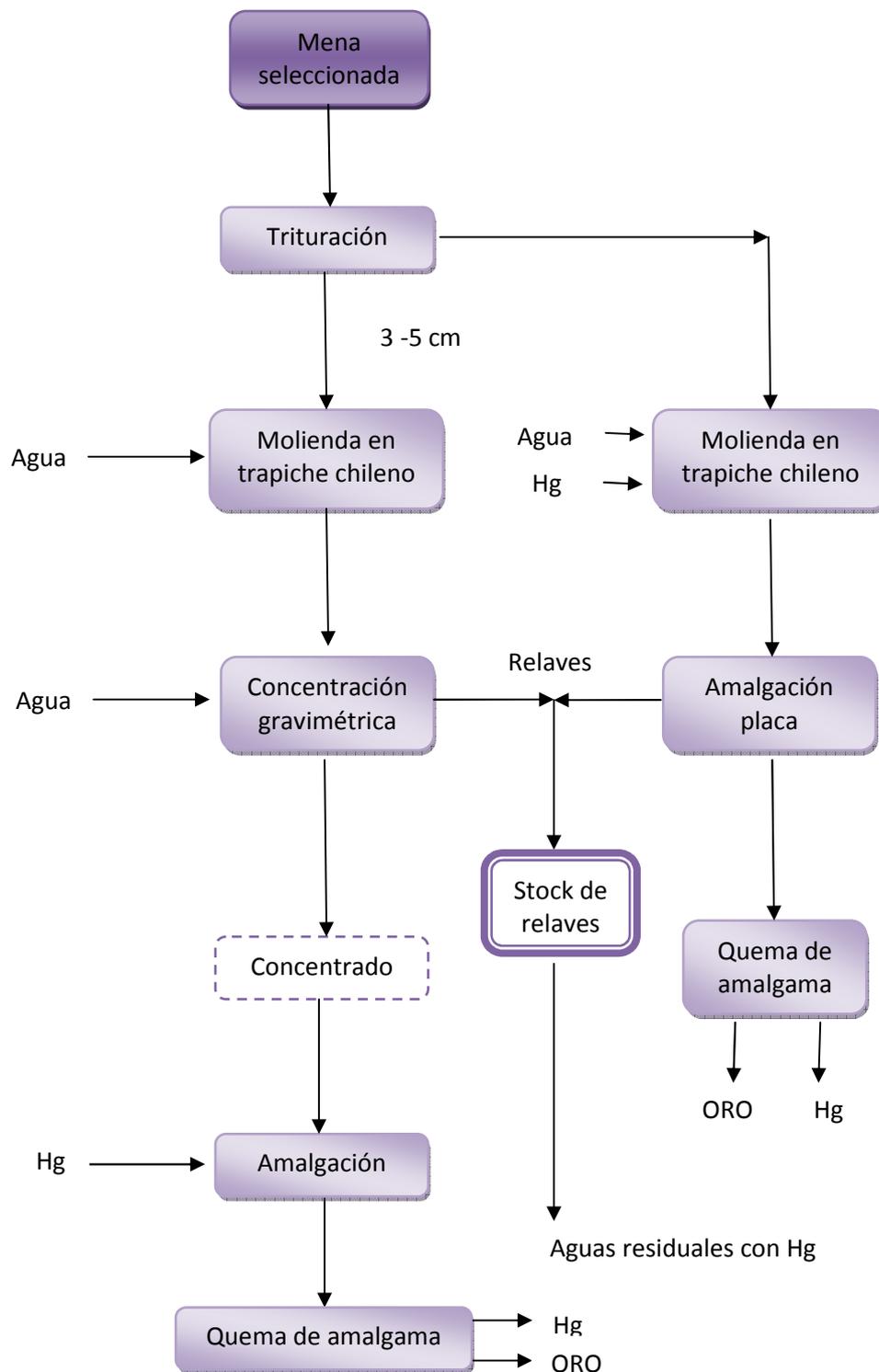


Figura 2.1 Proceso de gravimetría – amalgamación – generación stock de arenas.
Fuente: De La Torre Ernesto, El proceso de minerales en el Ecuador: visión de un metalurgista, 2003.

2.3. Problemática del procesamiento de minerales y metalurgia en el Ecuador.

Entre los principales problemas durante el procesamiento de minerales y metalurgia en el Ecuador tenemos los siguientes:

- Incompleto aprovechamiento de los metales preciosos.
- Desperdicio de otros metales como: cobre, plomo, cinc, molibdeno, etc.
- No existe en el país la disponibilidad de tecnología actualizada; o la tecnología es obsoleta, no adecuada y sin soporte técnico suficiente.
- Escasas posibilidades de capacitación para el personal, en mineralurgia y metalurgia.
- Contaminación ambiental por los procesos mineralúrgicos y metalúrgicos.

Entre los factores que deben ser considerados con especial cuidado, por su efecto en la composición y dispersión de los contaminantes, está la posición de la fuente potencial en la respectiva cuenca hidrográfica, así como la mineralogía del depósito y el tipo e intensidad de la alteración hidrotermal que afecta a las rocas de su entorno. Cuando se trate de explotaciones mineras en etapa de cierre, la preocupación debe ser máxima, si ellos:⁶

- a) Incluyen contenidos significativos de metales o metaloides con propiedades tóxicas.
- b) Se sitúan en la cabecera de las cuencas.
- c) Están en zonas con intensa alteración hidrotermal.
- d) Sus rocas presentan alto grado de fracturamiento.
- e) Su explotación subterránea ha dejado un elevado volumen de cavidades, que faciliten la interacción de los minerales residuales con el agua subterránea.
- f) La pirita (bisulfuro de hierro) es un componente mineralógico abundante.

⁶ Departamento de Minas y CEAZA, Universidad de La Serena, Casilla 554, La Serena.

2.4. Metales pesados y toxicidad.

Los metales pesados pueden clasificarse en dos grupos. El primero, al que pertenecen elementos como Cu, Zn y Cr^{3+} , incluye aquellos requeridos por el organismo en dosis moderadas, pero que pasan a ser tóxicos al superar cierta concentración. El segundo grupo está constituido por aquellos metales que no tienen un rol biológico conocido, pero si una clara toxicidad. A este grupo pertenecen, entre otros, As, Cd, Hg y Pb, junto con el Cr^{+6} .

Todos los metales tienen niveles óptimos de concentración, por encima de los cuales resultan tóxicos. La toxicidad de un metal depende de su vía de administración y del compuesto químico al que está ligado. La combinación de un metal con un compuesto orgánico puede aumentar o disminuir sus efectos tóxicos sobre las células.

La toxicidad suele resultar:

- Cuando el organismo se ve sometido a una concentración excesiva del metal durante un periodo prolongado.
- Cuando el metal se presenta en una forma bioquímica.
- Cuando el organismo lo absorbe por vía inusitada.

2.5. Contaminación del agua.

Las aguas procedentes de las industrias, de la minera, la de recubrimientos metálicos, las fundidoras y otras más contaminan el agua con diversos metales. Por ejemplo, las sales de metales como el plomo, el zinc, el mercurio, la plata, el níquel, el cadmio y el arsénico son muy tóxicas para la flora y la fauna terrestres y acuáticas.

Todos los metales pesados existen en las aguas superficiales en forma coloidal, de partículas y en fases disueltas, pero, las concentraciones en disolución son bajas generalmente. El metal en forma de partículas y coloidal puede encontrarse en: hidróxidos, óxidos, silicatos o sulfuros, adsorbidos en la arcilla o en la materia

orgánica. La solubilidad de trazas de metales en las aguas superficiales está controlada predominantemente por el pH, por el tipo de concentración de los ligandos en los cuales el metal puede absorberse, y por el estado de oxidación de los componentes minerales.

2.5.1. Contaminación del agua por el mercurio.

La contaminación del agua por mercurio es producido por industrias químicas que producen cloro, fábricas de fungicidas y de pinturas contra hongos, de plásticos, por minas de cinabrio (sulfuro de mercurio, HgS), en la extracción de oro y de plata por el método de amalgamación y por las refinerías del petróleo.

Se considera que la mitad del mercurio extraído es arrojado al medio ambiente, una parte en forma de vapor a la atmósfera y otra en los desechos industriales al suelo y al agua. Estos desechos contienen mercurio y siguen el curso del agua hasta llegar a los lagos, ríos y hasta el mar, donde pueden incorporarse a las diferentes cadenas alimenticias, reaccionar y transformarse en metilmercurio.

2.6. Mercurio.

El mercurio se da de manera natural en el medio ambiente y existe en una gran variedad de formas indicado en la tabla 2.3. Al igual que el plomo y el cadmio, es un elemento constitutivo de la tierra. En su forma pura, se lo conoce como mercurio “elemental” o “metálico”. Rara vez se le encuentra en su forma pura, como metal líquido. El mercurio puede enlazarse con otros compuestos como mercurio monovalente o divalente.

El mercurio elemental es un metal blanco plateado brillante en estado líquido a temperatura ambiente, este generalmente se utiliza en termómetros y en algunos interruptores eléctricos. A temperatura ambiente, el mercurio metálico se evapora parcialmente, formando vapores de mercurio, estos vapores son incoloros e inodoros. Cuanta más alta sea la temperatura ambiente, más vapores de mercurio se emanaran.

En condiciones naturales el mercurio se da en algunos de los siguientes estados:

- Como vapor metálico y mercurio líquido/elemental.
 - Unido a minerales que contienen mercurio (sólido).
 - Como iones en solución o unido a compuestos iónicos (sales inorgánicas y orgánicas).
 - Como complejos iónicos solubles.
 - Como compuestos orgánicos no iónicos gaseosos o disueltos.
 - Unido a partículas o materia orgánica o inorgánica mediante adsorción iónica, electrofílica o lipofílica.
-

Tabla 2.3 Formas del mercurio en su estado natural.

Fuente: PNUMA, Evaluación Mundial sobre el mercurio, 2002.

2.6.1. Ciclo del mercurio.

El mercurio es emitido a la atmósfera a partir de las fuentes naturales y antropogénicas en forma de vapor elemental (Hg^0), posteriormente es oxidado a ión mercuríco (Hg^{2+}) con la presencia de microorganismos aerobios donde participa la catalasa, enzima importante en el ciclo del oxígeno.

En los sedimentos de aguas oceánicas y continentales se realiza la metilación y luego la bioacumulación, que puede ser de dos maneras, una anaeróbica y otra aerobia. La primera involucra bacterias anaeróbicas las cuales metilan el mercurio inorgánico (Hg^{2+}) usando la metilcobalina sintetizada por bacterias metanogénicas. Entre los organismos anaerobios que metilan el mercurio pueden destacarse *Clostridium cochlearium* y *Desulfovibrio desulfuricans*.

La segunda vía bioquímica involucra las bacterias aeróbicas, las cuales incluyen: *Pseudomonas spp*, *Bacillus megaterium*, *Escherichia coli* y *Enterobacter aerogenes*. Entre los hongos que metilan al mercurio por esta vía tenemos *Asperigillus niger*, *Saccharomyces cerevisiae* y *Neurospora crasa*. La eficiencia de la metilación va a

depender de factores como la actividad microbiana y la concentración de mercurio biodisponible.

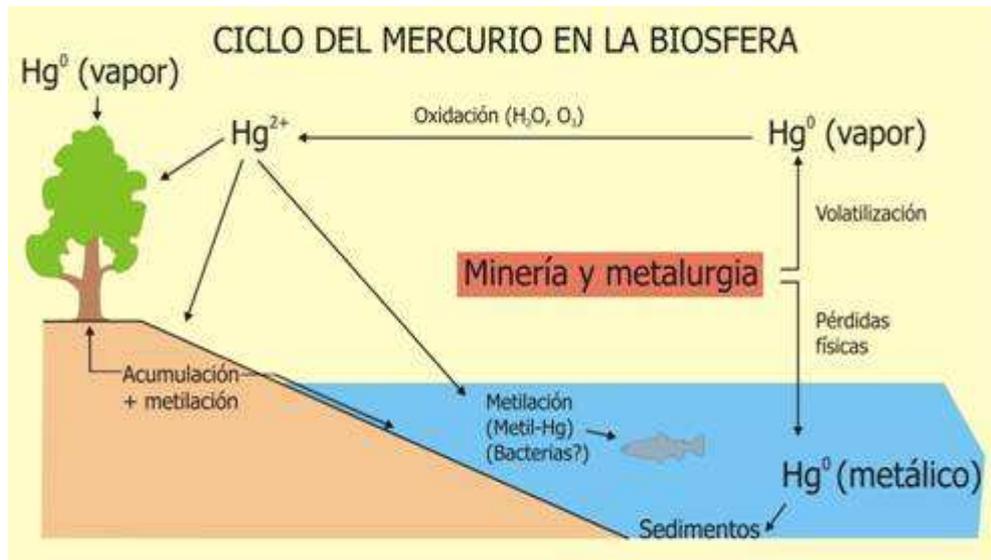


Figura 2.2 Ciclo del Mercurio.

Fuente: Departamento de Ingeniería Geológica y Minas, Ciclo del mercurio en la biósfera, 2005.

2.6.2. Usos del mercurio.

Por ser el único metal líquido, se utiliza en un gran número de productos y procesos que aprovechan sus singulares características.

Como metal se lo utiliza:

- Para extracción de oro y plata.
- Como catalizador en la industria cloroalcalina.
- En manómetros para medir y controlar la presión.
- En termómetros.
- En interruptores eléctricos y electrónicos.
- En lámparas fluorescentes.
- En las amalgamas dentales.

Como compuestos químicos:

- En baterías.

- Biocidas en la industria del papel y pinturas.
- Catalizadores.
- Como antiséptico en productos farmacéuticos.
- Explosivos.
- Pigmentos y colorantes.
- Reactivos para análisis de laboratorio.

2.6.3. Toxicología.

La toxicidad del mercurio depende de su forma química y, por lo tanto, los síntomas y signos varían según de la exposición al mercurio elemental, a los compuestos inorgánicos de mercurio, o a los compuestos orgánicos de mercurio.

Entre los compuestos orgánicos de mercurio, el metilmercurio ocupa un lugar especial porque mucha población está expuesta a él, y sus efectos tóxicos están mejor caracterizados que los de otros compuestos orgánicos de mercurio. El metilmercurio es un neurotóxico, que puede provocar efectos perjudiciales particularmente en el cerebro en formación, y también provoca enfermedades cardiovasculares.

La vía principal de exposición al mercurio elemental es por inhalación de sus vapores. Cerca del 80% de los vapores inhalados es absorbida por los tejidos pulmonares. La absorción intestinal de mercurio elemental es baja. El mercurio elemental puede oxidarse en los tejidos corporales a la forma divalente inorgánica⁷.

2.6.4. Exposiciones medias estimadas.

La OMS (Organización Mundial de la Salud) estimó las ingestas para las diferentes vías de exposición, sin embargo, las exposiciones varían considerablemente en las poblaciones. A continuación se muestran los valores en $\mu\text{g}/\text{día}$.

⁷ PNUMA, *Evaluación mundial sobre el mercurio*, Ginebra, Suiza, Diciembre del 2002 .pag 38

Exposición	Vapores de Hg elemental	Compuestos inorgánicos de Hg	Metilmercurio
Aire	0,03 (0,024)*	0,002 (0,001)	0,008 (0,0069)
Alimento			
– Pescado	0	0,60 (0,042)	2,4 (2,3)**
– Otros alimentos	0	3,6 (0,25)	0
Agua potable	0	0,050 (0,0035)	0
Total	3,9-21 (3,1-17)	4,3 (0,3)	2,41 (2,31)
Nota: Los datos entre paréntesis representan la parte de las aportaciones de mercurio que se retienen en el cuerpo de un adulto.			
* Si se supone que la concentración es de 15 ng/m ³ en una zona urbana, la cifra sería de 0,3 (0,24) µg/día.			
** Se supone 100 g de pescado por semana con una concentración de mercurio de 0,2 mg/kg.			

Tabla 2.4 Ingesta diaria promedio estimada y retención en el cuerpo (esta última entre paréntesis) de diferentes formas de mercurio en una situación aplicable a la población general no expuesta al mercurio en el lugar de trabajo.

2.6.5. Efectos del mercurio sobre el medio ambiente.

2.6.5.1. Acumulación de mercurio en las redes alimenticias.

Un factor muy importante de los efectos del mercurio en el medio ambiente es su capacidad para acumularse en organismos y ascender por la cadena alimenticia. Hasta cierto punto, todas las formas de mercurio pueden llegar a acumularse, pero el metilmercurio se absorbe y acumula más que otras formas. El mercurio inorgánico también puede ser absorbido pero por lo general en menores cantidades y con menor eficiencia que el metilmercurio (US EPA, 1997).

2.6.5.2. Compuestos de mercurio tóxicos para la vida silvestre.

El metilmercurio es una toxina que ataca el sistema nervioso central, y los riñones, siendo estos los órganos más vulnerables ante el mercurio inorgánico. También se atribuyen al mercurio efectos significativos en la reproducción, y este representa un riesgo especial para los fetos en desarrollo pues penetra con facilidad la barrera placentaria y puede dañar el sistema nervioso en desarrollo.

2.6.5.3. Ecosistemas vulnerables.

Hay estudios recientes que sugieren que el mercurio ocasiona una reducción de la actividad microbiológica vital para la cadena alimenticia terrestre en el suelo. A fin de prevenir los efectos ecológicos del mercurio en suelos orgánicos se han establecido límites críticos preliminares de 0,07-0,3 mg/kg de contenido de mercurio total en el suelo (Pirrone *et al.*, 2001).

2.6.6. Fuentes de contaminación ambiental.

2.6.6.1. Origen natural.

La mayor fuente natural de mercurio es la desgasificación de la corteza terrestre, las emisiones de los volcanes y la evaporación desde los cuerpos de agua. No obstante, gran parte del mercurio encontrado en la atmósfera y en los ecosistemas hídricos, proviene de actividades antropogénicas (Marins *et al.*, 2000).

2.6.6.2. Fuentes antropogénicas.

La cantidad total de mercurio liberada a la atmósfera debido a actividades antropogénicas ha sido estimada en 2.000-6.000 toneladas por año (Hanisch, 1998). La contaminación ocasionada por el hombre es realizada de muchas formas: por la descargas de desechos y la emisión directa a la atmósfera en la explotación minera del metal y del oro, la quema de los combustibles fósiles representa una fuente importante de contaminación atmosférica, así como la incineración de desechos sólidos, los cuales incluyen mercurio volatilizado de baterías desechadas y durante la fundición de cobre y zinc.

La contaminación con mercurio en las zonas tropicales, particularmente en Brasil, Colombia, Ecuador y Bolivia es originada en los procesos de extracción del oro, el cual se lo realiza mezclando la roca triturada enriquecida con el metal precioso con mercurio metálico para formar una amalgama. Este proceso ocasiona el derramamiento directo de grandes cantidades del metal en los ríos y en cuerpos de

agua. La amalgama mercurio-oro obtenida es quemada usualmente a campo abierto dejando libre el oro y liberando el tóxico metálico en forma de vapor directamente a la atmósfera.

En la figura 2.3 se cita las fuentes de contaminación ambiental ocasionadas por el mercurio.

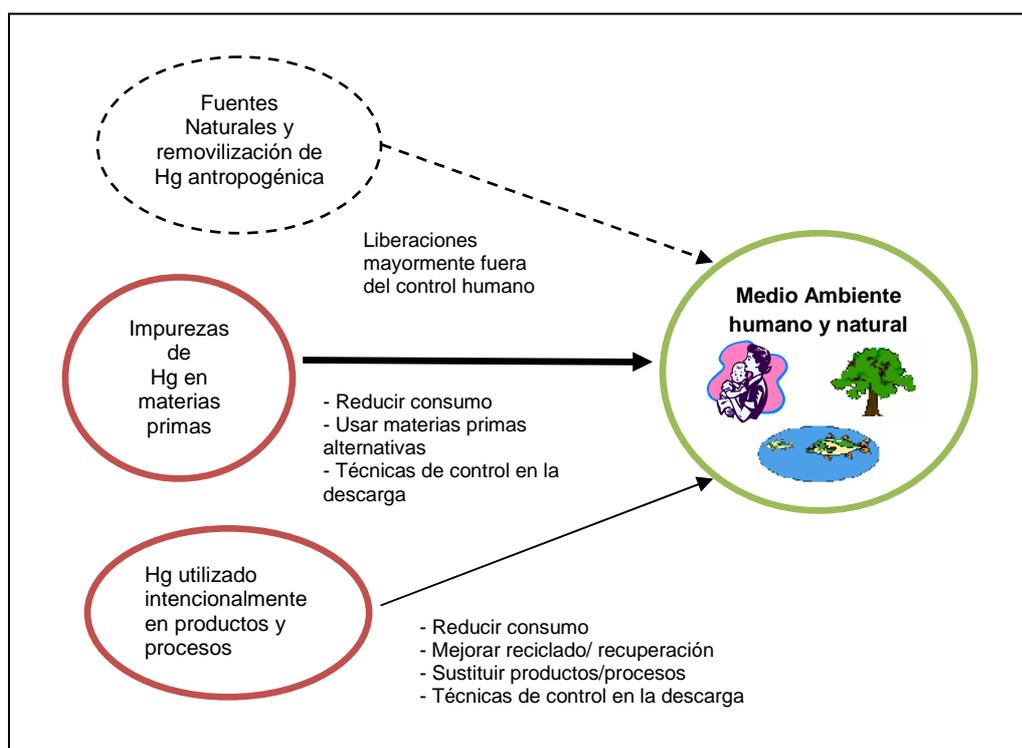


Figura 2.3 Categorización de fuentes de liberaciones de mercurio al medio ambiente y principales opciones de control.

Fuente: PNUMA, Evaluación mundial sobre el mercurio, 2002.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS A UTILIZAR

3.1. Humedales artificiales.

Los humedales naturales o artificiales, son sistemas de tratamiento acuático en los que se usan plantas y organismos relacionados para el tratamiento de aguas residuales, estos son de superficie libre de agua. Existe una gran cantidad de información sobre el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales, pero se deduce que hay varios aspectos que limita la aplicación de estos sistemas para un tratamiento. Sin embargo la mejor posibilidad de aplicación parece estar en el uso de lagunas con macrófitas para el mejoramiento de la calidad del efluente de las lagunas.

Se debe mencionar que el uso de plantas flotantes no es aplicable a lagunas donde se traten desechos crudos⁸. Por esta circunstancia, el tratamiento de estas lagunas con plantas debe estar cuidadosamente diseñado, usando formas alargadas que permita la remoción de una gran cantidad de plantas que se reproducen de forma acelerada en las lagunas.

Los humedales artificiales se han utilizado como una alternativa a las tecnologías convencionales para:

- El tratamiento de aguas residuales,
- El tratamiento secundario y avanzado,
- En el tratamiento de aguas de irrigación,
- Para tratar lixiviados de rellenos sanitarios,
- En el tratamiento de residuos de tanques sépticos.

⁸ YANEZ, Fabián, *Lagunas de estabilización, Teoría, Diseño, Evaluación y Mantenimiento*, pag. 241.

3.1.1. Funciones de los humedales artificiales.

Las actividades humanas han dado y siguen dando origen a varios tipos de humedales dependiendo de lo que se desea remover.

- **Procesos de remoción físicos:** Los humedales artificiales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociado con el material particulado.
- **Procesos de remoción biológicos:** La remoción biológica es quizás el camino más importante para la remoción de contaminantes en los humedales artificiales. La remoción de contaminantes en estos humedales se da por la captación de las plantas. Los contaminantes son tomados fácilmente por las plantas de estos humedales.
- **Procesos de remoción químicos:** El proceso químico más importante de la remoción de suelos de los humedales artificiales es la absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes.

3.1.2. Tipos de humedales artificiales.

Las clasificaciones más recientes de humedales artificiales se hacen en función de la presencia o no de una superficie libre de agua en contacto con la atmósfera, o bien varían en función de la circulación del agua o flujo de la misma:

- **Humedal de flujo superficial - HFS (*Free Water Surface- FWS*):** Las plantas acuáticas están enraizadas en el fondo del humedal y el flujo de agua se hace a través de las hojas y tallos de las plantas como se observa en la figura 3.1.

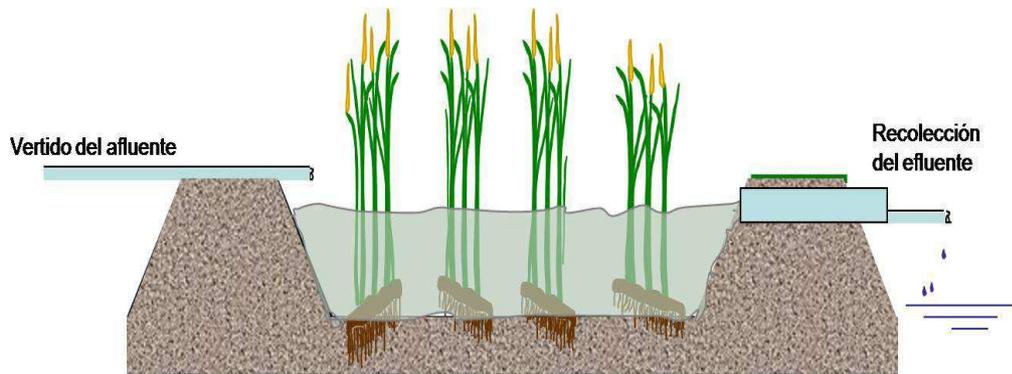


Figura 3.1 Humedal de flujo superficial (HFS).

Fuente: Estrada Islena, Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales, 2010.

- **Humedal de flujo subsuperficial - HFSS (*Vegetated Submerged Bed- VSB*):**
La lámina de agua no es visible, y el flujo atraviesa un lecho relleno con arena, grava o suelo, donde crecen las plantas, que sólo tienen las raíces y rizomas en contacto con el agua.

Los HFSS se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales como en la figura 3.2 y 3.3. Además, pueden existir combinaciones entre estos dos sistemas.

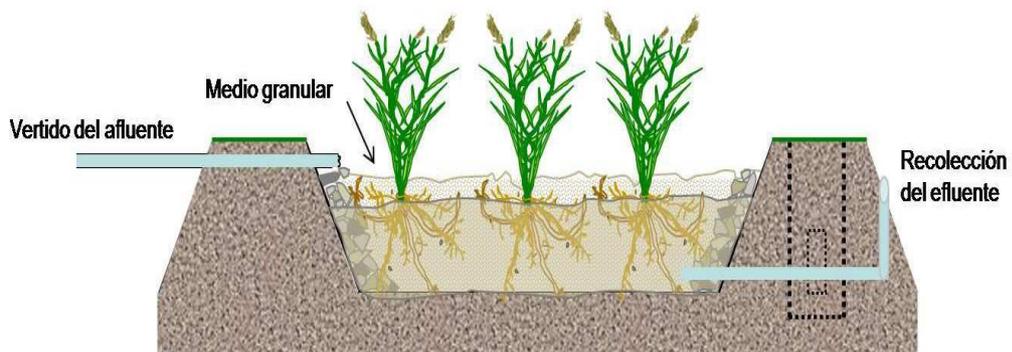


Figura 3.2 Humedal de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH).

Fuente: Estrada Islena, Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales, 2010.

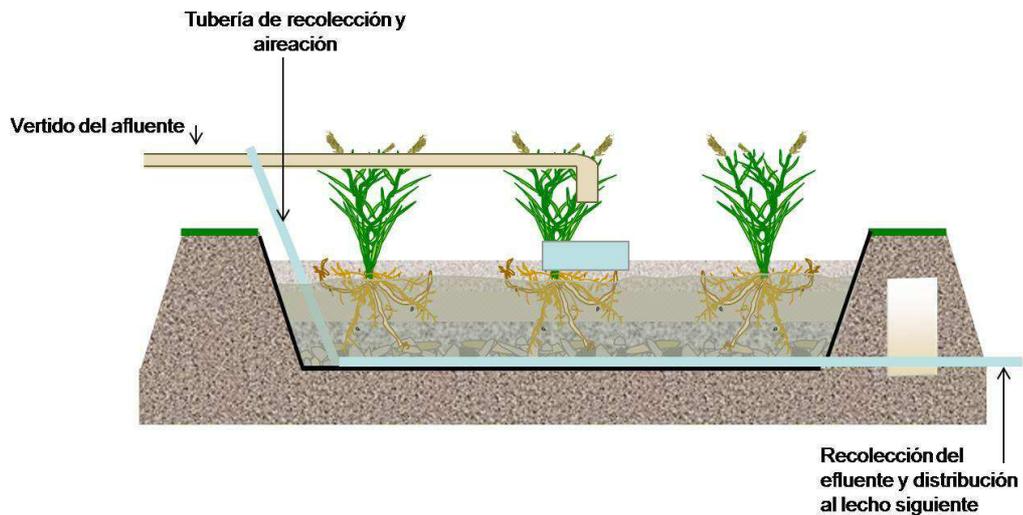


Figura 3.3 Humedal de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV).

Fuente: Estrada Islena, Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales, 2010.

3.2. Fitorremediación.

En los últimos años surgieron tecnologías basadas en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelos y recuperar los ecosistemas afectados. Cuando estas tecnologías se basan en el uso de plantas, globalmente reciben el nombre de fitorremediación. Se define como el uso de plantas verdes para eliminar los contaminantes del entorno o para reducir su peligrosidad.

Por lo tanto, estas tecnologías son especialmente útiles para su aplicación en grandes superficies, con contaminantes relativamente inmóviles o con niveles de contaminación bajo, y deben considerarse procesos de recuperación a largo plazo.

Este grupo de fitotecnologías reúne un gran número de ventajas, especialmente la limpieza y la economía; no utilizan reactivos químicos peligrosos, ni afectan negativamente al ecosistema, sólo aplican prácticas agrícolas comunes; además, el proceso se realiza *'in situ'* evitando costosos transportes.

Las ventajas de la aplicación biológica es que incluyen mejores especificaciones que los métodos físicos y químicos, evitando por ejemplo, el uso de energía e insumos químicos.

3.2.1. Tipos de fitorremediación.

Las plantas pueden incorporar las sustancias contaminantes mediante distintos procesos que se representan en la figura 3.4 y se explican en la tabla 3.1:

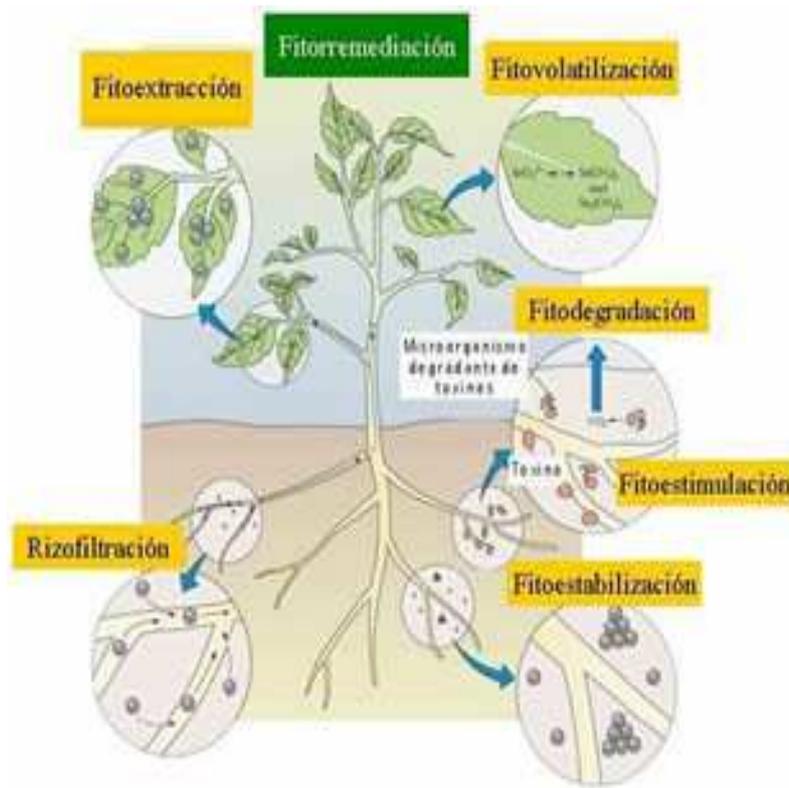


Figura 3.4 Tipos de fitorremediación, indicando en que zona de la planta es donde ocurre el proceso.

Tipo	Proceso Involucrado	Contaminación tratada
Fitoextracción	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces)	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc
Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc isótopos radioactivos, compuestos fenólicos
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire.	Lagunas de desecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc.
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)
Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

Tabla 3.1 Procesos utilizados por las plantas para asimilar contaminantes.

Fuente: Sergio Martín Cabo, Uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales.

De los diferentes tipos de fitorremediación sólo cuatro son relevantes para la asimilación de metales pesados: fitoextracción, fitoestabilización, rizofiltración, fitovolatilización (Henry 2000).

3.2.2. Criterios de selección de plantas para la fitorremediación.

La eficiencia de remoción de contaminantes durante el proceso de fitorremediación dependerá principalmente de la especie de planta utilizada, el estado de crecimiento

de las plantas, y el tipo de metal a remover. Por lo mismo, para lograr buenos resultados, las plantas a utilizar deben tener las siguientes características:⁹

- Ser tolerantes a altas concentraciones de metales.
- Ser acumuladoras de metales.
- Tener una rápida tasa de crecimiento y alta productividad.
- Ser especies locales, representativas de la comunidad natural.
- Ser fácilmente cosechables.

En la Tabla 3.2 se muestra algunos ejemplos de plantas acuáticas que acumulan cuatro o más metales (hiperacumuladoras), incluyendo el plomo y cadmio (McIntyre, 2003).¹⁰

Nombre científico	Nombre común	Número de elementos	Elementos
<i>Azolla filiculoides</i>	Helecho acuático	4	Cu, Ni, Mn, Pb
<i>Bacopa monnieri</i>	Bacopa	5	Cd, Cr, Cu, Hg, Pb
<i>Eichornia crassipes</i>	Jacinto de agua	6	Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn
<i>Hydrilla verticillata</i>	Maleza acuática	4	Cd, Cr, Hg, Pb
<i>Lemna minor</i>	Lenteja de agua	4	Cd, Cu, Pb, Zn, Hg
<i>Pistia stratiotes</i>	Lechuga de agua	4	Cd, Cr, Cu, Hg
<i>Salvinia molesta</i>	Salvinia	4	Cd, Ni, Pb, Zn
<i>Spirodela polyrrhiza</i>	Flores de agua	5	Cd, Cr, Ni, Pb, Zn
<i>Valisneria americana</i>	Valisneria lisa	4	Cd, Cr, Cu, Pb

Tabla 3.2 Plantas capaces de acumular cuatro o más metales (Adaptado de McIntyre, 2003).

⁹ NUÑEZ, Roberto, y otros, “Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones”, *Ciencia*, Septiembre 2004, pag 70

¹⁰ Catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mbt/.../capítulo4.pdf.

3.2.3. Mecanismos de resistencia a los metales pesados.

Las plantas que crecen en medios contaminados han desarrollado mecanismos de tolerancias a dichos ambientes, los cuales se clasifican dentro de dos categorías:

- **Exclusión:** implica la formación de compuestos bioquímicos en el medio ambiente o en la pared celular de las plantas; precipitando los metales al exterior a través de secreciones y otros compuestos orgánicos (Lasat, 2002; Maiti y col. 2002).
- **Inclusión y acumulación:** comprende la captura en el interior de las células donde no tiene efectos tóxicos como en la vacuola y la pared celular; destoxificación interna de los metales a través de la incorporación de proteínas, ácidos orgánicos, histidina y péptidos ricos en grupos tiol denominados fitoquelatinas (Chaney y col. 1997; Garbisu y Alkorta, 2001).

3.2.4. Mecanismo de acumulación de metales en las plantas.

De acuerdo con Wang *et al.* (1996), la acumulación de metales por los organismos acuáticos se presenta en un proceso que consiste en dos pasos: un primer paso de absorción rápida o vinculación a la superficie biológica (biosorción), seguido por un segundo paso de transporte lento e irreversible, controlado por difusión al interior de la célula (bioacumulación), que puede ser por difusión del ion metálico a través de la membrana celular o por transporte activo por una proteína transportadora.

En las plantas, los efectos de los metales empiezan en la raíz, ya que este es el órgano responsable de asimilar los nutrientes del medio, y afectan sucesivamente el resto de la planta. En las hojas se producen graves daños en los cloroplastos y las mitocondrias, lo que altera los procesos de fotosíntesis y de respiración. En una fase más avanzada de alteración se producen intensos cambios metabólicos y de regulación celular, y ocurre finalmente el estímulo de la senescencia por acumulación crónica del metal pesado, lo que puede resultar la muerte de la planta.

En la tabla 3.3 se citan algunos ejemplos sobre la acumulación de metales pesados en las plantas acuáticas:

Especie	Resultado	Referencia
<i>Eichornia crassipes</i>	Acumulación máxima de 0,20 ppm en los brotes y 16,0 ppm en las raíces. A 1 ppm de mercurio se alcanzan las concentraciones máximas después de unos 16 días.	Riddle <i>et al.</i> , 2002
<i>Eichhornia crassipes</i>	Bioconcentración en los tejidos de las raíces dependiendo del tiempo y la concentración.	Lenka <i>et al.</i> , 1990
<i>Eichornia crassipes</i>	2,79 mol Hg/g peso seco. Mayor acumulación en raíces que en brotes.	Jana, 1988
<i>Eichornia crassipes</i>	Contenidos de mercurio de 110-1.217 g/kg peso seco en invierno; (7,6-16,2) g/kg peso seco en verano. Tendencia del mercurio a permanecer en la raíz.	Ramos <i>et al.</i> , 2000
<i>Hydrilla verticillata</i>	Acumulación de 4,21 mol Hg/g peso seco	Jana (1988)
<i>Ipomoea aquatica</i>	Mayor proporción de metales en las raíces, las cuales tienen mayor tolerancia que los brotes a las altas concentraciones internas de metal	Göthberg <i>et al.</i> , 2004
<i>Oedogonium areolatum</i>	Acumulación de 3,35 mol Hg/g peso seco	Jana, 1988

Tabla 3.3 Acumulación de metales pesados en las plantas acuáticas.

Fuente: Revista EIA, Efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas, 2006.

3.3. Macrófitas acuáticas.

El término macrófita acuática, se refiere a las formas macroscópicas de vegetación acuática y comprende las macro algas, las escasas especies de pteridofitos y las verdaderas angiospermas. (Wetzel, 1981). Figura 3.4.

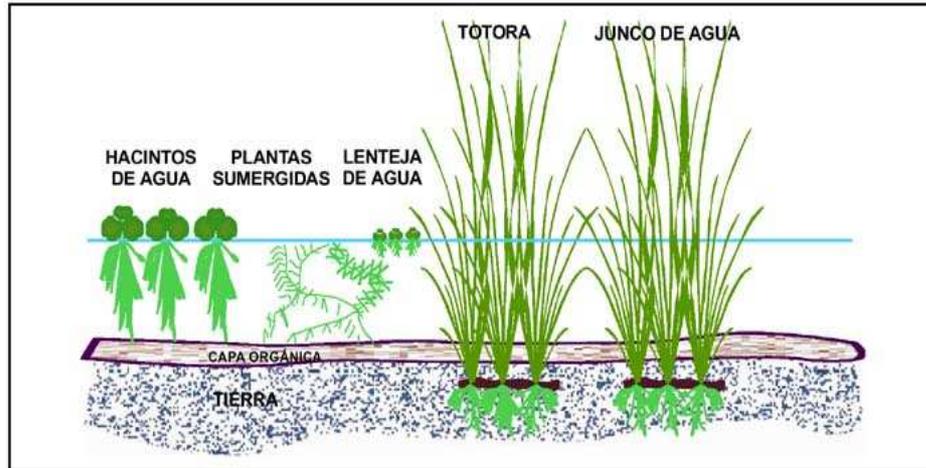


Figura 3.5 Plantas acuáticas (adaptado de Tchobanoglous, G. Aquatic plant system for wastewater treatment).

De acuerdo a la forma y la fisiología se tiene una clasificación simple y clara de las macrófitas acuáticas:

- **Plantas flotantes**, se distinguen por la habilidad para derivar el dióxido de carbono y las necesidades de oxígeno de la atmósfera directamente. Las plantas reciben sus nutrientes y minerales desde el agua. La especie más utilizada en la depuración ha sido el Jacinto de Agua.
- **Plantas sumergidas**, se distingue por la habilidad para absorber oxígeno, dióxido de carbono, y minerales de la columna de agua. Las plantas sumergidas se inhiben fácilmente por la turbiedad alta en el agua porque sus partes fotosintéticas están debajo del agua.
- **Plantas emergentes**, son plantas que viven en aguas poco profundas, arraigadas en el suelo, cuyos tallos y hojas emergen fuera del agua, no sufren limitaciones de agua y tienen un mayor acceso a la luz.

Las macrófitas acuáticas pueden aportar algunos beneficios como:¹¹

- Pueden utilizarse para alimentación humana, del ganado, de peces y otros animales.

¹¹ Margalef, Limnología, España, 1991, Tomado de MUÑOZ, María, *Remoción De Metales Pesados En Aguas Residuales Utilizando Una Macrófita Acuática (Eleocharis Acicularis) Muerta*, p.16

- Pueden ser utilizadas como fertilizantes.
- Pueden usarse para purificación del agua.
- Para uso medicinal y en cosmetología.
- Para producción de celulosa.
- Como fuente de producción de biogás.

Aunque la presencia de la misma en abundancia genera ciertos inconvenientes, algunos de ellos son:

- Favorecen la ausencia de oxígeno en el cuerpo de agua (en grandes coberturas de macrófitas flotantes).
- Grandes masas de macrófitas en descomposición acumulan materia orgánica en general en el sedimento, volviéndolo anóxico (sin oxígeno).
- Problemas en represas, en puentes y obras de ingeniería en general por acumulación de macrófitas flotantes.
- Problemas en lugares de recreación debido a que al encontrarse en grandes cantidades, hay gran cantidad de materia en descomposición y produce mal olor.
- Producen sombra a plantas sumergidas y algas que liberan oxígeno por la fotosíntesis.
- Pueden actuar como fuente de vectores propagadores de enfermedades y plagas.
- Taponamiento de canales de riego y de navegación.

3.4. Fitosociología vegetal.

La fitosociología se encarga del estudio de las comunidades vegetales que se define como el conjunto de especies que crecen juntas en una localidad en particular, las cuales presentan una asociación o afinidad entre ellas. Un ejemplo de esto es la laguna de Paccha como se observa en la figura 3.6.



Figura 3.6 Laguna de Paccha.

Fuente: Los Autores.

3.5. Descripción de las especies vegetales.

Las especies vegetales que se utilizó durante el proceso de fitorremediación fueron el Jacinto de Agua (*Eichornia crassipes*) y la Lenteja de Agua (*Lemna minor*) las cuales se describen a continuación:

3.5.1. Jacinto de Agua (*Eichornia crassipes*).

3.5.1.1. Taxonomía.

La macrófita acuática *Eichornia crassipes* se encuentra dentro de la siguiente clasificación:

Reino	Vegetal
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Pontederiales
Familia	Pontederiaceae
Genero	<i>Eichornia</i>
Especie	<i>Crassipes</i>

3.5.1.2. Descripción.

El Jacinto de agua también conocido como lirio de agua, camalote o lechugin es una planta acuática perenne, vascular de flotación libre con raíces sumergibles, fibrosas y comúnmente coloreadas, de climas cálidos y fríos, con flores lilas y azulados. Es la octava planta con crecimiento más rápido en el mundo por lo que le permite extenderse y sobrevivir en muchos sitios.

Puede duplicar su tamaño en diez días, y durante ocho meses de normal crecimiento una sola planta es capaz de reproducir 70.000 plantas hijas¹², que pueden llegar a medir entre 0,5 a 1,5 metros desde la parte superior hasta la raíz.

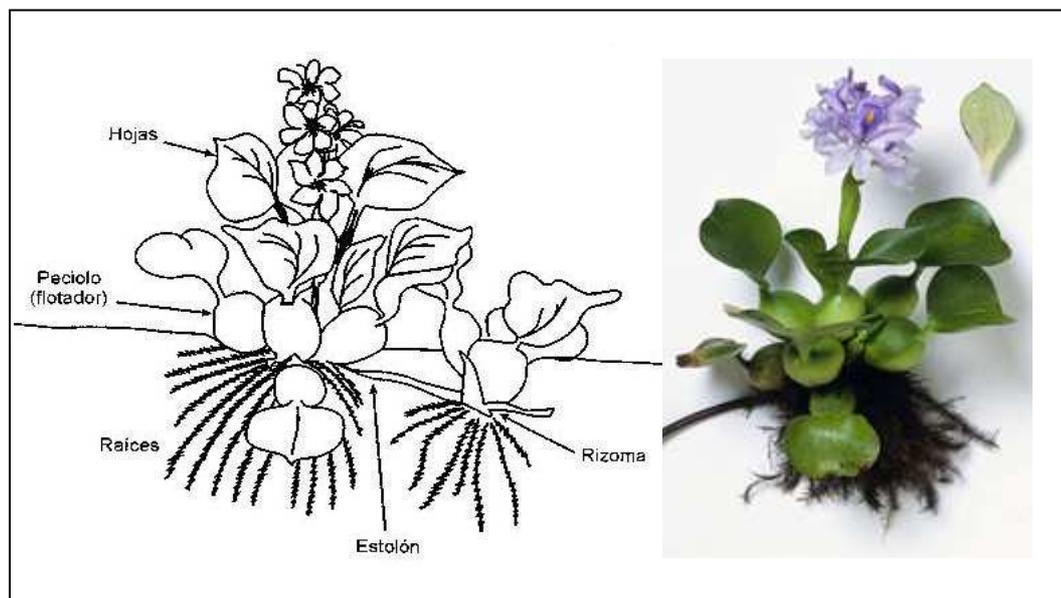


Figura 3.7 Morfología de la *Eichornia crassipes*.

Fuente: Romero Jairo, Tratamiento de aguas residuales, 2002.

3.5.1.3. Composición química.

El componente principal de la planta es el agua entre 93 y 95% de la masa total, este va a depender del medio donde crezca.

¹² ROMERO, Jairo, *Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principios de diseño*, Escuela Colombiana de Ingeniería

Constituyente	% de masa seca	
	Promedio	Intervalo
Proteína cruda	18,1	9,7 – 23,4
Grasa	1,9	1,6 – 2,2
Fibra	18,6	17,1 – 19,5
Ceniza	16,6	11,1 – 20,4
Carbohidrato	44,8	36,9 – 51,6
NTK	2,9	1,6 – 3,7
Fósforo	0,6	0,3 – 0,9

Tabla 3.4 Composición de la *Eichornia crassipes*.
Fuente: Romero Jairo, Tratamiento de aguas residuales, 2002.

3.5.1.4. Habitat.

Puede vivir en aguas dulces tranquilas o de ligero movimiento, como zanjas, canales, presas, arroyos, ríos y pantanos; es considerada como la maleza acuática. En la actualidad se distribuye en todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo. (Rzedowski 2004).

3.5.1.5. Distribución geográfica.

La *Eichornia crassipes* se originó en la Amazonía, Brasil, con una prolongación natural a otras áreas de Sudamérica. (Barrett & Forno, 1982). Aunque en su área nativa se ha convertido en una maleza, el hombre lo ha introducido en muchos países tropicales y subtropicales.

En nuestro país se encuentra en la rivera de los ríos principalmente en la provincia del Azuay, especialmente a lo largo del Río Paute; en el oriente Ecuatoriano y en varias partes de lagos y aguas estancadas de la costa.

3.5.1.6. Reproducción.

Su reproducción es sexual y asexual. Se reproducen por propagación vegetativa, las semillas suelen ser una importante fuente de rebrote una vez que son eliminadas las plantas adultas.

3.5.1.7. Cultivo.

El cultivo puede describirse de dos formas:

- Por el porcentaje de superficie de agua ocupada durante un determinado tiempo.
- Por la densidad de la planta medida como masa de plantas mojadas por superficie unitaria.

En condiciones normales la *E. crassipes* recubre la superficie de agua con una densidad de 10 Kg/m² (peso húmedo) y puede llegar hasta 80 Kg/m².

3.5.1.8. Parámetros de crecimiento.

Su crecimiento va a depender del medio donde se desarrolle. Cuando hay escasez de elementos fertilizantes se inhibe el crecimiento de la planta. Por el contrario, en abundancia de nutrientes la planta se desarrolla a su máximo límite, adquiriendo un intenso color azul-verdoso.

A continuación se citan parámetros de crecimiento:

- Requieren iluminación intensa o estar en semisombra.
- Para un óptimo crecimiento la temperatura debe estar entre 25 a 30⁰C, cesando a los 10⁰C y produciendo la muerte, por lo que en inviernos fríos hay que protegerlas de las heladas.
- Dada que la relación nitrógeno/fósforo en los tejidos de la *Eichornia crassipes* es mayor a la que se encuentra en el agua, el nitrógeno se agotara

antes que el fósforo, por lo que sería necesaria una fertilización suplementaria con N (nitrógeno) para lograr una eliminación de P (fósforo).

- La carga orgánica expresada en términos de DBO₅ puede variar entre 1 y 30 ppm al día (10 y 300 Kg/ha día).
- Necesita un pH que se sitúe entre 6.5 - 7.5.
- Requiere una dureza media alrededor de 12 - 18 DH.
- El crecimiento de la *Eichornia crassipes* es favorecido por el agua rica en nutrientes, en especial el nitrógeno, fósforo y potasio. Además de estos elementos toma, calcio, magnesio, azufre, hierro, aluminio, boro, cobre, molibdeno y zinc.

3.5.2. Lenteja de Agua (*Lemna minor*).

3.5.2.1. Taxonomía.

La macrófita acuática *Lemna minor* se encuentra dentro de la siguiente clasificación:

Reino	Vegetal
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Arales
Familia	Lemnaceae
Género	<i>Lemna</i>

3.5.2.2. Descripción de la especie.

La *Lemna minor* también conocida como limachos u ovas es una planta acuática flotante que tiene una estructura muy simple y una de las tasas de crecimiento más altas en el mundo. Esta familia comprende cuatro géneros: *Lemna*, *Spirodela*, *Wolffia* y *Wolffiella*.

Es una planta muy pequeña de una estructura muy simple. Aunque es flotante no presenta tallo separado de las hojas, posee una fusión de ambos llamado fronda, su

tamaño varía entre 0.1 y 2 cm de diámetro. La tasa de reproducción relativa de la *Lemna minor* puede estar entre 0.1 y 0.5 dia⁻¹, lo que significa que en condiciones ideales puede doblar su biomasa.

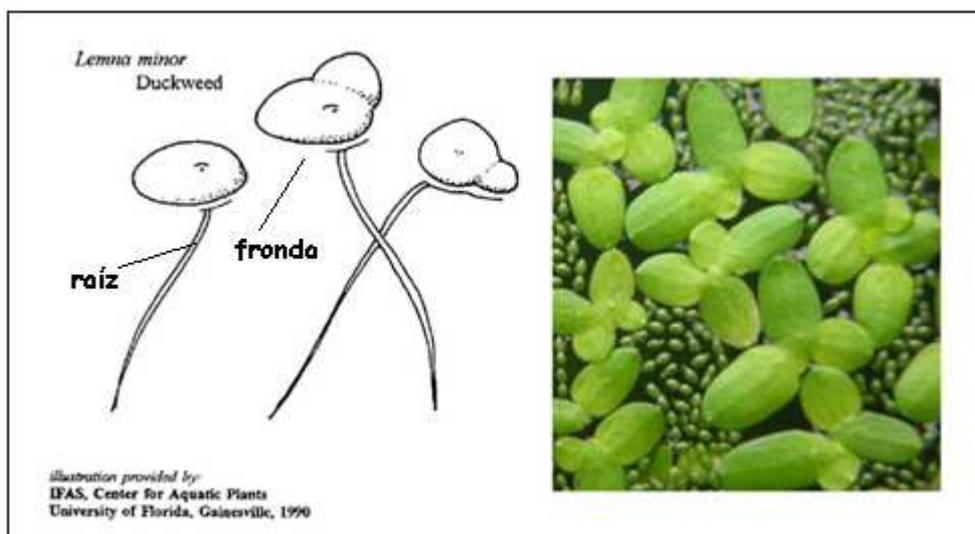


Figura 3.8 Morfología de la *Lemna minor*.

Fuente: IFAS Center for Aquatic Plants, University of Florida, Gainesville, 1990.

3.5.2.3. Composición química.

Su contenido proteico es muy alto por lo que se la puede incluir en la alimentación del ganado y peces.

Constituyente	Porcentaje (%)
Agua	86 a 97
Proteína	31,19
Lípidos	5,58
Fibra	8,22
Fósforo	1,44

Tabla 3.5 Composición de la *Lemna minor*¹³.

3.5.2.4. Parámetros de crecimiento.

¹³ FUENTE: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/ecuador10/ferti.pdf>

3.5.2.4.1. Temperatura.

En comparación con otras plantas acuáticas, son muy tolerantes a un amplio rango de temperaturas. Estudios realizados por *Docaur* (1983) señalan como un rango óptimo de temperaturas para diferentes especies de 25 a 31°C. En cuanto a las temperaturas mínimas, se pueden considerar dos casos: para supervivencia y para crecimiento. Para supervivencia, con capaces de soportar 0°C por cortos periodos de tiempo. Para crecimiento, los límites varían entre 8 a 16°C y 16 a 20°C.

3.5.2.4.2. Iluminación.

La radiación solar, en el rango visible, es absorbida por la *Lemna minor* a través de diferentes pigmentos y la usa como fuente de energía para regular diferentes procesos.

Existe una gran variación con respecto a los rangos de saturación de la intensidad lumínica, límites máximos y mínimos de iluminación para el crecimiento de la *Lemna minor*, estos parámetros van a depender de la temperatura y la presencia de nutrientes.

3.5.2.4.3. Densidad y cosecha.

El método de cultivo y cosecha de la lenteja de agua depende de la utilización que se le vaya a dar a la planta. Para el cultivo de la lenteja de agua se deben tener en cuenta:

- Que cubra toda la superficie del agua, se debe proteger de los vientos para evitar que se acumule en las esquinas.
- Como las lentejas utiliza los nutrientes de las capas superiores se recomienda tener bajas profundidades.
- La lenteja crece bien en aguas ricas en nutrientes.
- La densidad es un factor importante para la reproducción, si es muy alta, la fotosíntesis no se realiza eficientemente; y si es muy baja las posibilidades de reproducción por unidad de área se reduce.

3.5.2.4.4. Composición química del agua.

La familia de las *Lemnaceae* crece en aguas de muy diversa calidad tanto en aguas dulces como en aguas salinas y es capaz de crecer en un amplio rango de concentración de nutrientes, inhibiéndose su crecimiento en aguas limpias, bajas en nutrientes. La tabla 3.6 presenta los resultados de un estudio de la composición química de las aguas en donde se ha encontrado lenteja de agua.

Parámetro	Rango	Rango del 95% de las muestras
pH	3.5 – 10.4	5.0 – 9.5
Conductividad	10 – 10900	50 – 2000
Ca	0.1 – 365	1.0 – 80
Mg	0.1 – 230	0.5 – 50
Na	1.3 - >1000	2.5 – 300
K	0.5 / 100	1.0 – 30
N	0.003 – 43	0.02 – 10
P	0.000 – 56	0.003 – 2
HCO ₃ ⁻	8 – 500	10 – 200
Cl	0.1 – 4650	1- 2000
S	0.03 - 350	1 - 200

Tabla 3.6 Rango de concentración de nutrientes en aguas donde las *Lemnaceae* crecen (pH en unidades, conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$, y el resto en mg/L), Landolt, 1986.

3.5.2.4.5. pH.

De acuerdo con la tabla 3.1 las *Lemnamaceae* pueden adaptarse a condiciones en el agua de un amplio rango de pH (3-10). Sin embargo existen valores óptimos y límites mínimos y máximos de supervivencia para las diferentes especies. *McLay* (1976) realizó estudios con tres especies *Spirodela punctata*, *Lemna minor* y *Wolffia australiana*. Los pH óptimos para estas especies fueron 7, 6.2 y 5 respectivamente, con un rango de tolerancia de 3 a 10.

3.5.2.4.6. Salinidad y conductividad.

Los altos requerimientos de nutrientes de la lenteja de agua indican que es resistente a altos niveles de salinidad. Por lo general se considera que tiene un amplio rango de tolerancia. La conductividad en el agua está directamente correlacionada con su salinidad o la concentración de sales disueltas. *Oron et al.* (1985) encontraron que las *Lemnaceas* cultivadas en aguas salinas sobreviven hasta niveles de 4000 mS/cm. La *Lemna gibba* es muy frecuente encontrarla en aguas con conductividad alta (940-3370 mS/cm).

Esta resistencia de la *Lemna minor* a altas salinidades es un factor importante para su aplicación en lagunas de tratamiento de aguas residuales y reducir la salinidad de los efluentes.

3.5.2.4.7. Nitrógeno.

La *Lemna minor* puede crecer en un rango amplio de concentración de nitrógeno. El valor más bajo reportado por *Landolt* (1987) es de 0.001 mg/l. en cuanto a niveles óptimos y límites máximos existe una gran divergencia en los estudios realizados. Para niveles óptimos se han reportado valores entre 0.6 y 70 mg/l, y para límites máximos valores entre 200 mg/l y 2800 mg/l.

La *Lemna minor* puede utilizar nitrógeno en forma de iones amonio o iones nitrato, aunque ha sido demostrado que en presencia de ambos, prefiere el nitrógeno amoniacal. Este último, forma un equilibrio en el agua entre dos especies químicas los iones amonio y amoníaco. La proporción de cada una depende del pH del agua. Está bien establecido que el amoníaco (NH_3) es bastante tóxico para las plantas, aún a bajas concentraciones.

3.5.2.4.8. Fósforo.

El fósforo es importante en el control del crecimiento de la *Lemna minor*. La principal fuente de fósforo son los fosfatos. Se ha encontrado *Lemna minor* en aguas con concentraciones de fósforo muy bajas (0.0007 mg/l).

Lueond (1983) reporta un crecimiento óptimo para algunas especies en los siguientes límites: 0.4-10.9 mg/L para *Spirodela Polyrrhiza* y *Lemna minor*, 0.08-10.9 mg/l para *Lemna minúscula* y *Lemna minor* 0.008-54.3 mg/l. También reporta concentraciones mínimas de 0.003 mg/l para *Lemna minor* y *Lemna minúscula* 0.2 mg/l para *Spirodela polyrrhiza* y *Lemna gibba*. El límite máximo de acuerdo con Eyster (1966) para *Spirodela polyrrhiza* es 1500 mg/l.¹⁴

3.5.2.4.9. Otros elementos importantes.

El potasio es un componente importante en las proteínas y su deficiencia produce frondas no saludables, bajas en clorofila, así como el azufre y los cloruros que son componentes importantes en la síntesis de proteínas y un buen crecimiento de la *Lemna minor*.

3.5.2.4.10. Materia orgánica.

De acuerdo con diferentes investigadores, la *Lemna minor* usa los carbohidratos como fuente de energía bajo las condiciones de no saturación de luz. Cuando las condiciones de luz son óptimas, el estímulo al crecimiento producido por los carbohidratos se reduce.

3.5.2.4.11. Sustancias gaseosa.

¹⁴ FUENTE: COREAL, Rodrigo, *Tratamiento y Postratamiento de Aguas Residuales*, Fundación Universitaria de Boyacá, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Centro de Investigaciones para el Desarrollo, CIPADE.

Oxígeno disuelto.

No ha sido reportado como factor determinante en el crecimiento de la *Lemna minor*. Esta planta al ser flotante toma el oxígeno que necesita de la atmósfera.

Dióxido de Carbono.

De acuerdo con los resultados de diferentes autores parece que el enriquecimiento de la concentración de varias especies de *Lemnaceas*. Plantas flotantes como la *Spirodela polyrrhiza* y la *Lemna minor* son capaces de utilizar el carbono inorgánico tanto del aire como del agua.

Ácido sulfúrico.

Este puede llegar a inhibir el crecimiento de la *Lemna minor* porque impide la absorción del sulfato (Landolt, 1987).

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Análisis de aguas mineras.

Para realizar nuestro proceso experimental se recogió varias muestras de aguas provenientes de los procesos industriales mineros, de las cuales se extrajo una muestra para su análisis, del mismo se obtuvo el siguiente resultado 0,0029 ppm de mercurio (Anexo IV-A), que está al nivel de los límites máximos permisibles de descarga para un cuerpo de agua dulce en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario (TULAS), es necesario mencionar que las aguas utilizadas en el muestreo son descargadas de manera directa a los ríos los mismos que llevan el agua al mar.

Otro factor limitante es que las aguas provenientes de la producción minera contienen otros metales los mismos que reducen la capacidad de absorción de las plantas utilizadas en el estudio (Anexo IV-A). Por estas razones no se trabajo con la cantidad obtenida en el análisis del agua minera.

4.2. Obtención de las especies.

Previo a la aplicación de la metodología experimental, se realizó la obtención de las dos especies vegetales (*Eichornia crassipes* y *Lemna minor*) a ser utilizadas durante el proceso. Se lo realizó en la parroquia de Paccha en el sector de Viola, ubicada a 11 Km al sureste del cantón de Cuenca, con una altura de 3084 m sobre el nivel del mar, con un clima templado con tendencia al frío y temperatura promedio de 14 a 16⁰C, ubicada en las siguientes coordenadas geográficas:

X	730102
Y	9681042
Altura	2555 msnm

En la laguna se procedió a investigar la fitosociología vegetal utilizando la siguiente técnica:

- Se ubicó estacas alrededor de la laguna y se colocó piola en las mismas, para medir su periferia.
- Se colocó un cuadrado de madera en la zona donde estaban ubicadas las diferentes especies vegetales para realizar su conteo.
- Se contó cuantas plantas existían por metro cuadrado (Totorá, Redondita de agua y el Jacinto de agua).
- No se pudo aplicar la técnica de conteo a la Lenteja de agua, ni al Helecho de agua debido a su tamaño.
- Se reconoció una zona de humedal al lado oeste de la laguna, en la cual tenía las siguientes especies, Jacinto de agua y Cola de caballo.
- Con la ayuda del flexómetro se midió la distancia de este a oeste sacando un promedio.

De lo cual se obtuvo que el área de la laguna es de 2860 m² y del humedal es de 360 m². Como se observa en la figura 4.1 las especies encontradas en la laguna conviven y se encuentran distribuidas de la siguiente manera:

- 64% está cubierta por Totorá (*Typha latifolia*),
- 20% está cubierta por Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*),
- 8% está cubierto por Redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*),
- 4% está cubierta por Lenteja de agua (*Lemna minor*),
- 4% también lo cubren Helechos de agua (*Azolla caroliniana*).



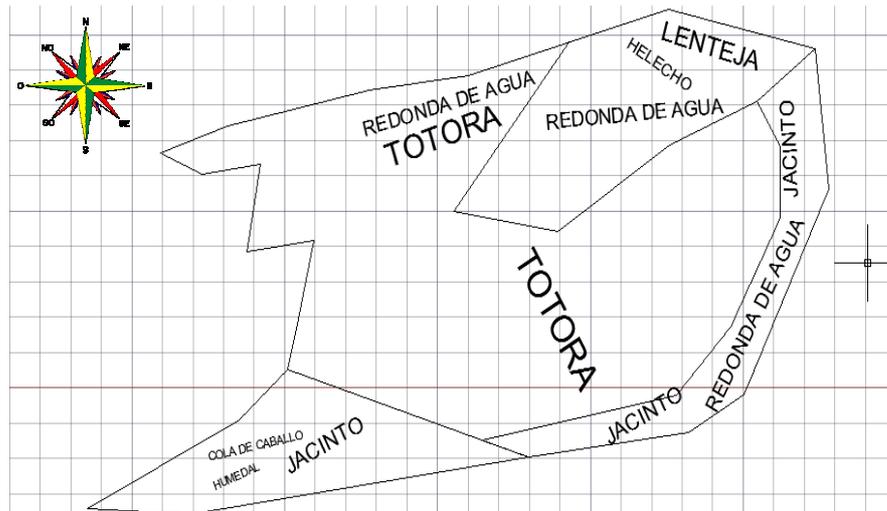


Figura 4.1 Distribución de las especies en la Laguna de Paccha.

Fuente: Los autores.

En la laguna ubicada en Paccha, encontramos las siguientes especies (Anexo IV-B): la *Eichornia crassipes* (Jacinto de agua), *Lemna minor* (Lenteja de agua), *Azolla caroliniana* (Helecho de agua), *Typha latifolia* (Totora), *Hydrocotyle ranunculoides* (Redondita de agua).



Figura 4.2 *Lemna minor* (Lenteja de agua).



Figura 4.3 *Eichornia crassipes* (Jacinto de agua).



Figura 4.4 *Hydrocotyle ranunculoides* (Redondita de agua).



Figura 4.5 *Typha latifolia* (Totorá).



Figura 4.6 *Azolla caroliniana* (Helecho de agua).

Fuente: Los autores.

En la tabla 4.1 podemos observar la clasificación taxonómica de las especies encontradas en la Laguna.

Nombre científico	<i>Lemna minor</i>	<i>Eichornia crassipes</i>	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	<i>Typha latifolia</i>	<i>Azolla caroliniana</i>
División	Magnoliophyta	Magnoliophyta	Magnoliophyta	Magnoliophyta	Pteridophyta
Clase	Liliopsida	Liliopsida	Magnoliopsida	Liliopsida	Filicopsida
Orden	Arales	Pontederiales	Apiales	Poales	Salviniales
Familia	Lemnaceae	Pontederiaceae	Apiaceae	Typhaceae	Azollaceae
Género	<i>Lemna</i>	<i>Eichornia</i>	<i>Hydrocotyle</i>	<i>Typha</i>	<i>Azolla</i>
Especie	<i>Minor</i>	<i>Crassipes</i>	<i>Ranunculoides</i>	<i>Latifolia</i>	<i>Caroliniana</i>

Tabla 4.1 Taxonomía de las especies encontradas en la laguna de Paccha.

Fuente: Los Autores.

4.3. Recolección e identificación de las especies vegetales.

De la laguna se recolectaron las especies vegetales a ser utilizadas en el experimento la *Eichornia crassipes* y *Lemna minor*, teniendo en cuenta las siguientes condiciones: (Anexo IV-D).

- Que tengan una buena pigmentación.
- Que no presenten ninguna anomalía en cualquiera de sus partes.
- Que sean plantas jóvenes, en el caso de la *Eichornia crassipes* se las reconoce por el color azulado de sus raíces.
- Para la *Eichornia crassipes* se seleccionó especies que posean un buen espesor radicular, y en el caso que presentaban necrosis en las hojas se les retiraba para que no afecte a las demás.

Luego se las traslado al lugar de experimentación y se las colocó en diferentes contenedores separándolas por especie y por sus características físicas parecidas.



Figura 4.7 Recolección de la *Eichornia crassipes*.



Figura 4.8 Recolección de la *Lemna minor*.

Fuente: Los Autores.

La identificación de las especies se la realizó con la cooperación del Ing. Klever Rivas, Docente de la Universidad de Cuenca, en la Facultad de Ciencias Agropecuarias en el Laboratorio de Botánica. (Anexo IV-C).

4.4. Metodología experimental.

La metodología empleada se basó en dos estudios, uno realizado en la Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado en Venezuela con el tema: “Evaluación de la planta *Lemna minor* como biorremediadora de aguas contaminadas con mercurio”; y otro realizado en la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana con el tema: “Fitorremediación en el tratamiento de aguas residuales con metales con especies del humedal natural de Pampa Chica – Iquitos”.

El experimento se desarrolló en un área con techo, ventilación adecuada y entrada de rayos solares a condiciones ambientales de la ciudad de Cuenca.

- Temperatura media de 16,2°C,
- Temperatura máxima de 24,2°C,
- Temperatura mínima de 5,8°C,
- Humedad del 64%, y
- Presión de 551 mm Hg.

Para el proceso investigativo se construyeron 12 recipientes de vidrio de 30cm de alto, ancho y de profundidad en los cuales se colocó grava, con un volumen de agua potable de 9 litros, más 1 litro de disolución de Hg que se colocó en la fase de intoxicación, donde el agua permanecía inmóvil.

Debido a que el experimento estuvo expuesto a condiciones ambientales, y se observó disminución del volumen de la disolución, se colocó otro recipiente con las mismas condiciones ya mencionadas anteriormente pero sin las especies vegetales

como se observa en la figura 4.9, esto se realizó con el propósito de conocer si hay pérdida de mercurio.



Figura 4.9 Tratamiento de control.

Fuente: Los Autores.

La experimentación se la realizó en tres fases; una de adaptación, de nutrición y de intoxicación, todo este proceso tuvo una duración de 15 días, como se ilustra en la figura 4.10.

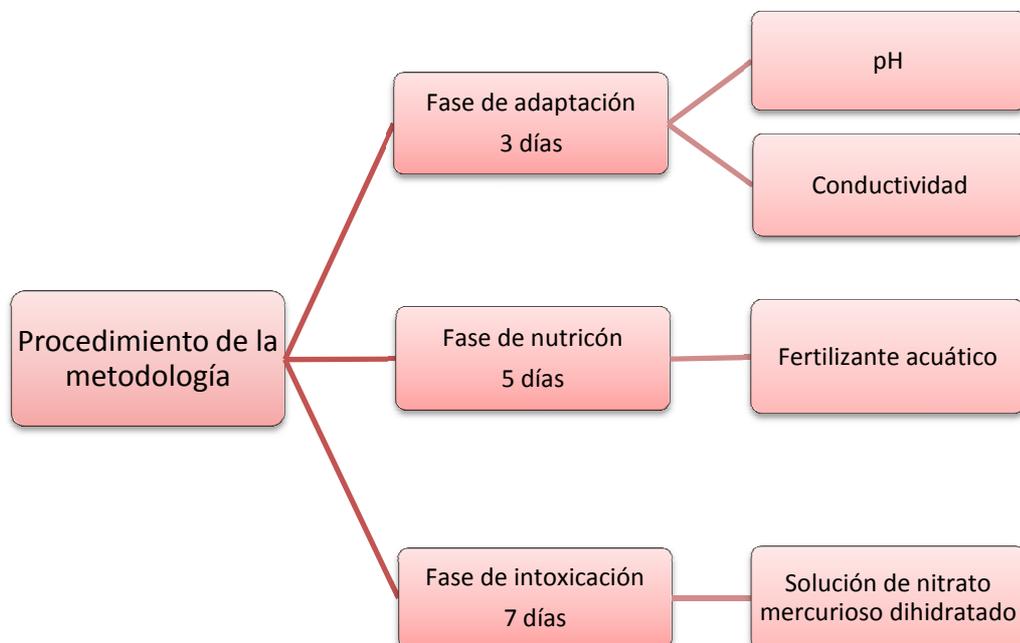


Figura 4.10 Esquema del procedimiento de la metodología.

Fuente: Los Autores.

4.4.1. Procedimiento de la metodología.

Antes de colocar las macrófitas acuáticas en los recipientes se contó cuantas especies habían en 30 g de *Lemna minor* dándonos un total de 12500 plantas, las cuales fueron introducidas en el depósito para el proceso de investigación. Este procedimiento se realizó debido al tamaño que presenta dicha especie vegetal.

4.4.1.1. Fase de adaptación.

Esta fase tuvo una duración de tres días. Después que se realizó el reconocimiento de las dos especies vegetales (*Eichornia crassipes* y *Lemna minor*) y se seleccionó las adecuadas, se procedió a colocar las mismas en los recipientes en el orden que se observa en la figura 4.11.

Se realizó tres tratamientos con cuatro repeticiones:

- Tratamiento con la *Eichornia crassipes* se colocó siete especies;
- Tratamiento con la *Lemna minor* se colocó 30 gr;
- Tratamiento Combinado se colocó cuatro especies del primer tratamiento y 15 gr del segundo tratamiento.

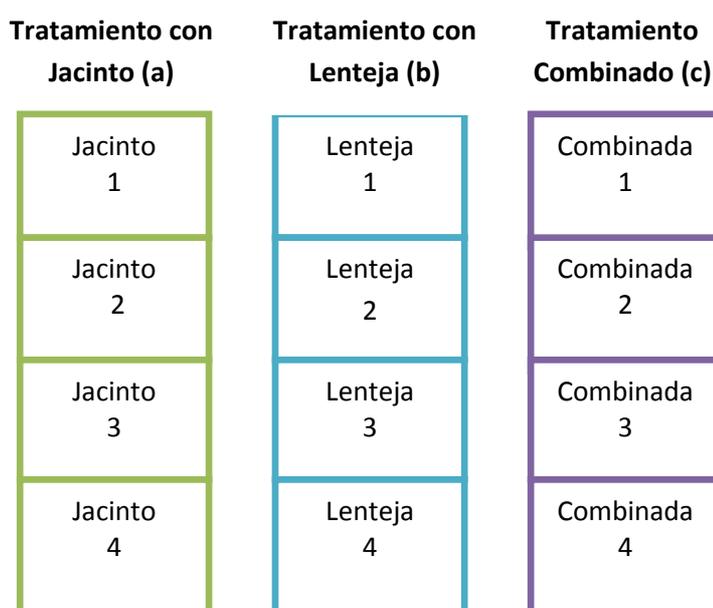


Figura 4.11 Posicionamiento de las especies en los recipientes.

Fuente: Los Autores.

Durante este proceso de investigación se controló la variación de pH y de conductividad, esto se realizó para determinar un medio óptimo para el desarrollo de las plantas, debido a que un pH ácido marchita las mismas, y altos valores de conductividad no soportan las especies vegetales.

Durante los tres primeros días se mantuvo el pH en un rango de 7 a 7,2 y la conductividad en un rango de 269 a 410 μs como se observa en la figura 4.12 y 4.13, lo cual nos indicó que las especies vegetales están en un medio ideal para un normal desarrollo. (Anexo IV-E).

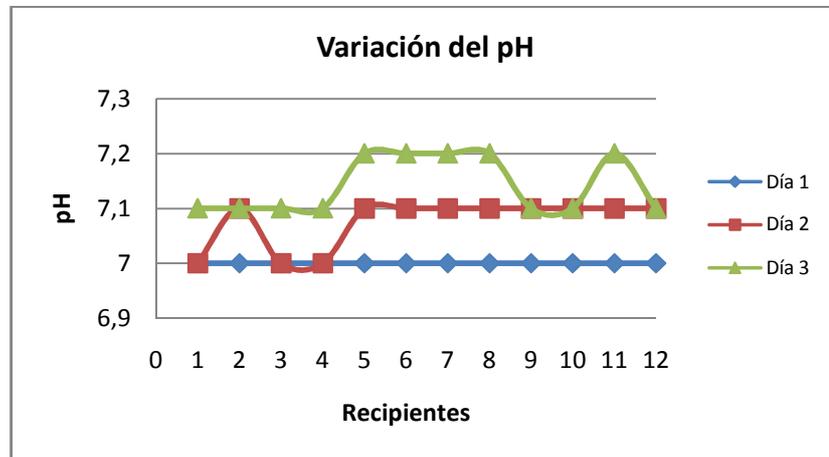


Figura 4.12 Variación del pH.

Fuente: Los Autores.

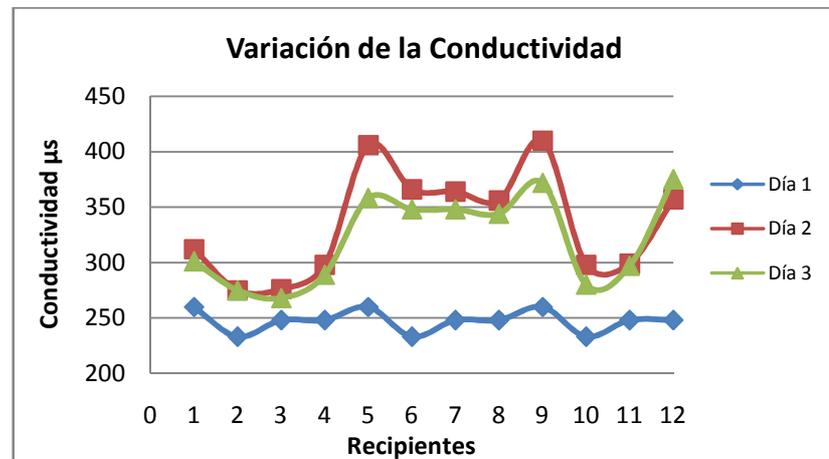


Figura 4.13 Variación de la conductividad.

Fuente: Los Autores.

4.4.1.2. Fase de nutrición.

La fase de nutrición tuvo una duración de 5 días. Pasado los tres días de adaptación se le colocó un fertilizante líquido a los recipientes que contenían las plantas para estimular su crecimiento.

El fertilizante contenía los siguientes nutrientes:

- Sodio 0,00018%,
- Cobre 0,00045%,
- Hierro 0,063%,
- Magnesio 0,00046%,
- Molibdeno 0,000072%,
- Zinc 0,00046%.

4.4.1.3. Fase de intoxicación.

Esta fase tuvo una duración de siete días, pasado los ocho días entre la adaptación y la nutrición de las plantas se colocó un litro de disolución de nitrato mercurioso dihidratado como se indica en el numeral 4.4.1.3.1 (observar descripción del nitrato mercurioso dihidratado en el Anexo IV-F).

4.4.1.3.1. Preparación de la solución.

Debido a que el mercurio elemental no es muy soluble en agua utilizamos una sal de mercurio y como esta se encuentra combinado con otros elementos realizamos el siguiente procedimiento.

4.4.1.3.1.1. Reactivos (Anexo IV-G).

- Nitrato mercurioso dihidratado ($\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$).
- Agua destilada.

4.4.1.3.1.2. Materiales.

- Balanza analítica,
- Balón de aforo,
- Cocineta,
- Vaso de precipitación,
- Varilla de agitación.

4.4.1.3.1.3. Cálculo.

Para la preparación de la disolución se tuvo que pesar el nitrato mercurioso dihidratado, basándose en la relación que existe entre los componentes de la fórmula. Se tomó en cuenta el peso del mercurio de acuerdo a la cantidad de disolución que necesitábamos por cada litro de agua.

Fórmula: $(\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O})$.

Masa molar: 561,22.

Elemento	Peso atómico	Total
Hg	200,59	401,18
N	14,0067	28,0134
O	15,9994	127,9952
H	1,00794	4,03176

Porcentajes de los elementos:

Hg = 71,5 %,

N = 5 %,

O = 22,8 %,

H = 0,7 %.

Relación entre el porcentaje de mercurio (Hg), con la cantidad de disolución requerida 1,2 ppm de mercurio.

$$\begin{array}{rcl} 0,0012 \text{ g} & & 71,5\% \text{ Hg} \\ X & & 100\% \end{array}$$

X = 0,00167 gramos de nitrato de mercurio.

Como la fórmula está al 97% se realizó los siguientes cálculos:

$$\begin{array}{rcl} 0,00167\text{g} & & 97\% \\ X & & 100\% \end{array}$$

X = 0,00172 gramos de nitrato de mercurio.

4.4.1.3.1.4. Procedimiento.

Para preparar la solución se realizó el siguiente procedimiento, como se observa en la figura 4.14:

- Se procedió a pesar en la balanza analítica la cantidad de mercurio resultante del cálculo mencionado anteriormente.
- En 25 ml de agua destilada se colocó la cantidad pesada de nitrato mercurioso dihidratado en un vaso de precipitación.
- Luego se calentó la solución hasta una temperatura de 30⁰C, moviéndola con una varilla de agitación, para una mejor disolución.
- En un balón de aforo de un litro de capacidad, se colocó la solución, y se procedió a aforar el litro de solución.





Figura 4.14 Preparación de la solución.

Fuente: Los Autores.

Se incorporó 1 litro de solución con una concentración de 1,2 ppm de mercurio a cada uno de los tratamientos y después de 7 días se procedió hacer el análisis final de la concentración de mercurio.

Dentro de los parámetros se procedió a la medición del DBO₅ y DQO y como se trabajó con agua potable no existió una variación en los resultados.

4.4.1.4. Recolección de las muestras.

Se recolectó una muestra para su análisis en el laboratorio, para poder verificar si la concentración inicial era la correcta. (Análisis inicial, Anexo IV- H).

Pasado los 15 días de experimentación se recogió de las 12 muestras un contenido de 500cc de la parte media del recipiente sin remover el agua para analizar la concentración de mercurio. De igual manera se recolectó en 12 recipientes 3 litros de agua para realizar el análisis de DBO₅, y DQO, esto se lo hizo el mismo día y de manera inmediata para no alterar los resultados del análisis. (Resultados Anexo IV- I).



Figura 4.15 Muestras para realizar el análisis de DBO_5 y DQO.

Fuente: Los Autores.

CAPÍTULO V
RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados.

Durante el proceso se pudo observar que desde el quinto día ambas especies vegetales presentaron cambios en su estructura. La *Eichornia crassipes* presentó necrosis en sus hojas que luego se esparció a los peciolo como se observa en la figura 6.1; en la *Lemna minor* se dio un proceso de clorosis como se puede apreciar en la figura 6.2.



Figura 6.1 Proceso de necrosis en la *Eichornia crassipes*

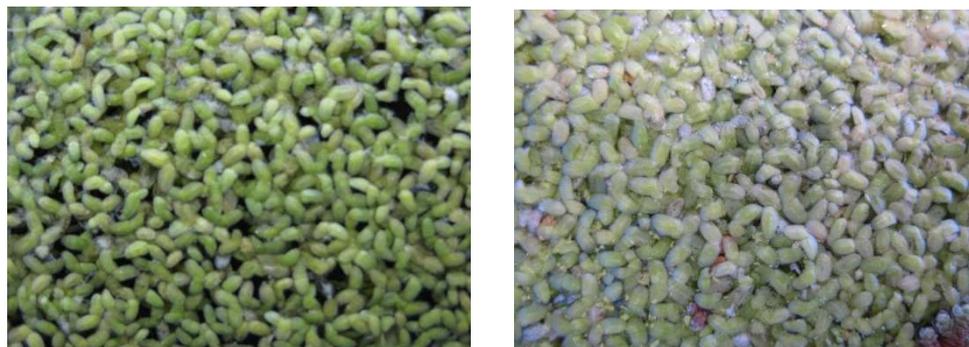


Figura 6.2 Proceso de clorosis en la *Lemna minor*.

Fuente: Los Autores.

Los resultados obtenidos del análisis de agua realizado en el CESEMIN (Centro y Servicios de Análisis) mediante el método de generación de hidruros el cual permite determinar el mercurio existente en agua de beber y aguas naturales claras en

concentraciones bajo 1 µg/litro (Anexo V-B), fueron los siguientes (Observar resultados en Anexo V-A).

Repeticiones	Tratamientos		
	<i>Eichornia crassipes</i>	<i>Lemna minor</i>	Combinada (<i>Eichornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>)
1	0,0165	0,0595	0,0235
2	0,0145	0,0485	0,0340
3	0,0150	0,0530	0,0370
4	0,0110	0,0415	0,0270

Tabla 5.1 Concentración final de mercurio.
Fuente: Los Autores.

En el tratamiento de control se observó una pérdida de 1 litro de agua por evaporación durante los 15 días de los 10 litros que se colocó inicialmente. Al principio se tenía una concentración de 1,2 ppm de Hg y al final del experimento se obtuvo una concentración de 0,366 ppm (Anexo V-B).

Debido a que se usó una sal de mercurio en el experimento y esta tuvo una disociación quedando el mercurio en forma iónica libre Hg^{+2} , según Carlos Vásquez (2008) esta forma de mercurio tiene una elevada tendencia a adsorberse sobre partículas sólidas, por lo que se presume que el mercurio faltante se adhirió en la grava o en las paredes del recipiente.

5.2. Eficiencia del Proceso.

Para determinar la eficiencia del proceso de los resultados obtenidos se tuvo que restar el 100% de la disolución (1,22 ppm) a la cantidad que se perdió de mercurio (0,36 ppm) de lo cual se obtuvo:

29,5 % - porcentaje de absorción

70,5 % - porcentaje de pérdida

En la tabla 5.1 se detalla el porcentaje de absorción de cada uno de los tratamientos.

Repeticiones	Tratamientos		
	<i>Eichornia crassipes</i>	<i>Lemna minor</i>	Combinada (<i>Eichornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>)
1	28,148	24,623	27,574
2	28,312	25,525	26,714
3	28,270	25,156	26,468
4	28,600	26,100	27,287

Tabla 5.2 Porcentaje de absorción

Fuente: Los Autores

Como podemos observar en la figura 6.6 el tratamiento A (*Eichornia crassipes*) es el que mayor porcentaje de absorción presenta con 28%, seguido del tratamiento C (combinado) con un porcentaje entre 26 a 27% y el tratamiento B (*Lemna minor*) con una variación de 24 a 26%.

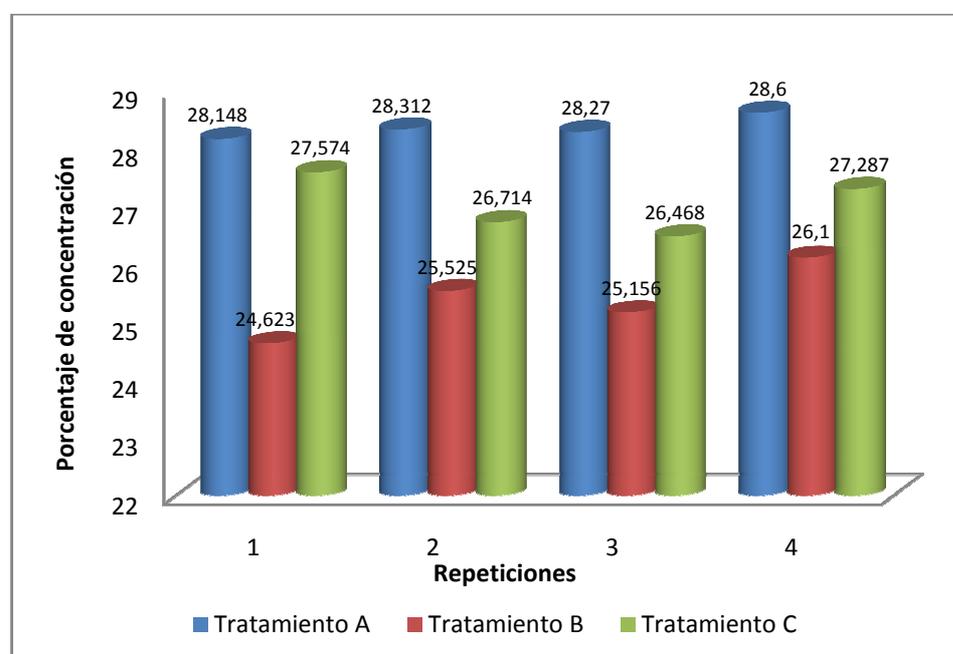


Figura 6.3 Porcentaje de absorción.

Fuente: Los Autores.

5.3. Análisis estadístico.

Para el presente trabajo investigativo se eligió un diseño completamente al azar (DCA) con un solo factor, tres niveles y una variable de respuesta como se observa en la tabla 5.2:

Variable de entrada	Unidad	Niveles	Variable de respuesta
Tipo de planta	Porcentaje	<ul style="list-style-type: none">• <i>E. crassipes</i>• <i>Lemna minor</i>• Combinada (<i>E. crassipes</i> 50% y <i>Lemna minor</i> 50%)	Concentración de mercurio

Tabla 5.3 Variables consideradas.

Fuente: Los Autores.

Para validar las hipótesis se utilizó el programa Minitab 16, utilizando la función varianza de un solo factor (ANOVA), ingresando los datos de la siguiente manera: en la primera columna se colocó los tratamientos y en la segunda el porcentaje de absorción de cada uno de los tratamientos.

Tratamientos:

A = *Eichornia crassipes*.

B = *Lemna minor*.

C = Combinada (*Eichornia crassipes* con *Lemna minor*).

Cada uno de los tratamientos con cuatro repeticiones.

Hipótesis:

H0 = no existe diferencia de absorción entre los tratamientos.

H1 = si existe diferencia de absorción entre los tratamientos.

De lo cual obtuvimos los siguientes resultados.

Donde:

C1= tratamientos.

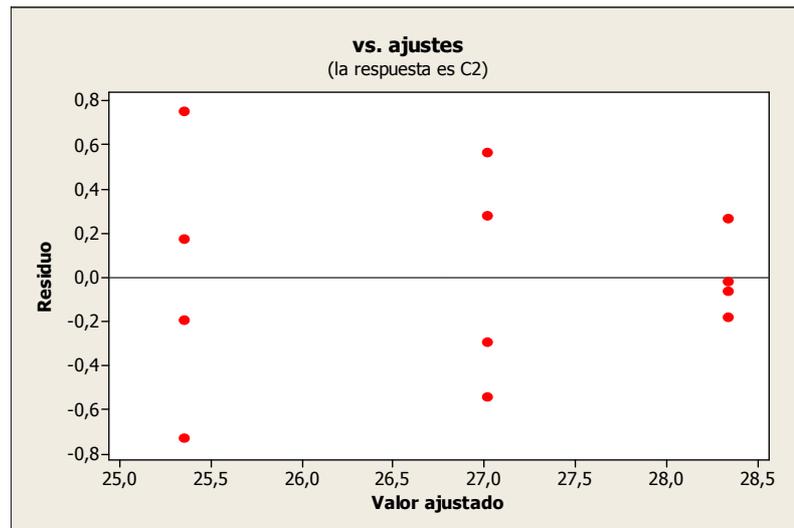


Figura 5.5 Gráfica de valores de ajuste.

Fuente: Los Autores

En la figura 5.5 presenta los datos distribuidos en tres partes diferentes claramente definidos, nos indica que existe diferencia entre los ajustes. Además podemos observar que en el tratamiento B existe una mayor variación de resultados con respecto al tratamiento A y B en cuanto a su ajuste vertical.

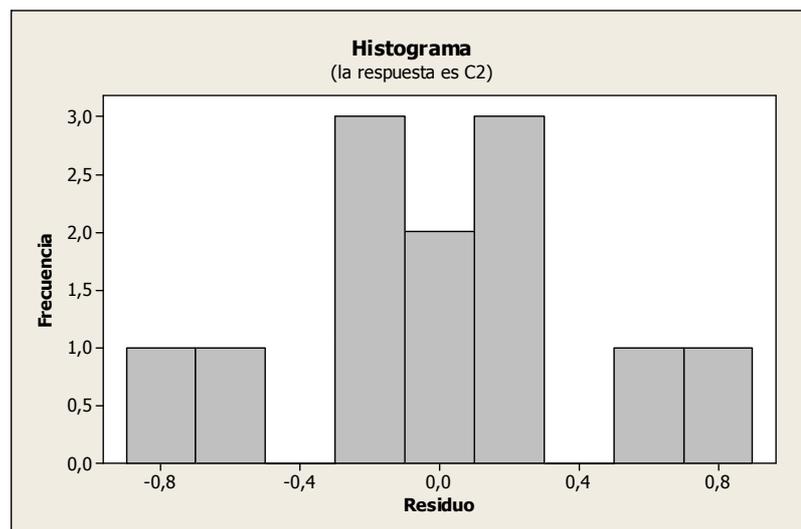


Figura 5.6 Gráfica del histograma.

Fuente: Los Autores

En la figura 5.6 se observa que los residuos se encuentran distribuidos en tres grupos distintos, por tal motivo los tratamientos son diferentes.

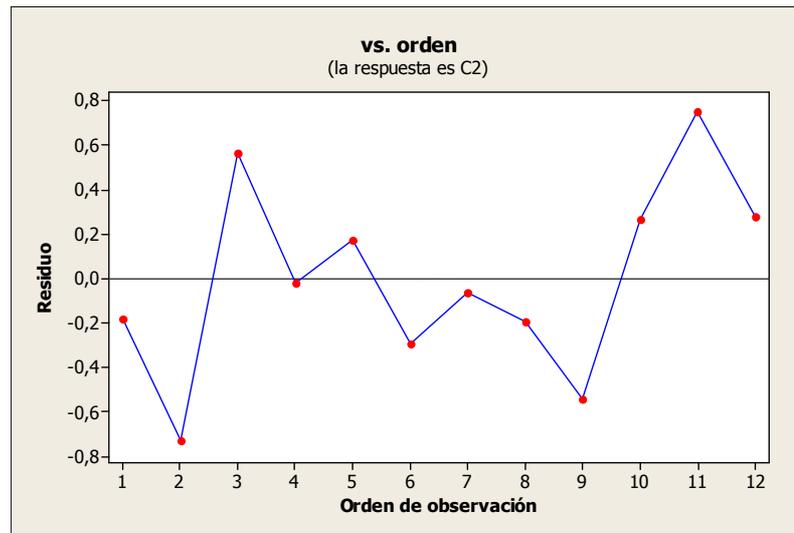


Figura 5.7 Gráfica de dispersión de datos.

Fuente: Los Autores.

La figura 5.7 de la gráfica de dispersión de datos se observa que no existe un orden de datos, esto nos indica que los valores varían, pero su variación no es tan grande.

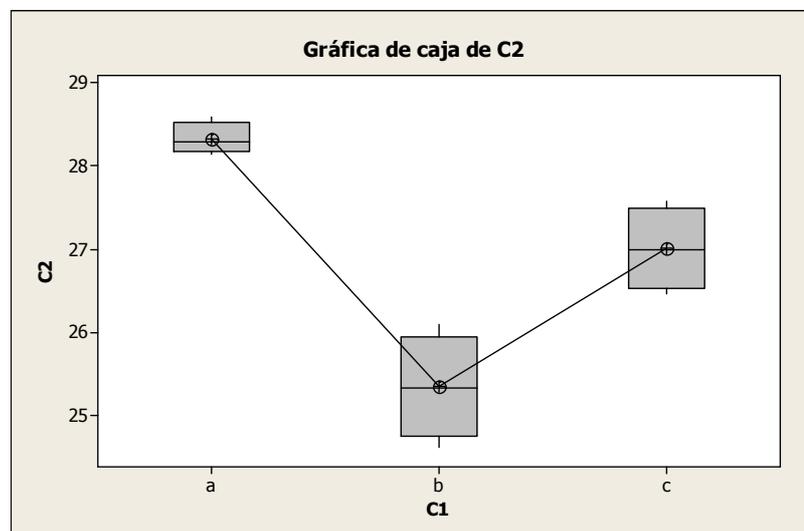


Figura 5.8 Gráfica de cajas.

Fuente: Los Autores

La figura 5.8 de la gráfica de caja nos indica que en el tratamiento A existe menor dispersión de datos a diferencia de los demás tratamientos con una distribución asimétrica, seguido del tratamiento C con una distribución simétrica en cambio el

tratamiento B es el que mayor dispersión de datos presenta en comparación con los demás tratamientos con una grafica simétrica.

La gráfica de cajas nos indica que el tratamiento A es el mejor, debido a que presenta mayor porcentaje de absorción a diferencia de los demás tratamientos, con valores parecidos indicando que sus repeticiones no variaron en su comportamiento. En el caso del tratamiento C presenta una mayor absorción después del tratamiento A por último el tratamiento B, es que menor absorción presenta, porque hay una mayor dispersión en sus datos, esto quiere decir que las repeticiones variaron su comportamiento.

De acuerdo a la diferencia significativa de los tratamientos se utilizó la prueba de Tukey, presentan las siguientes hipótesis:

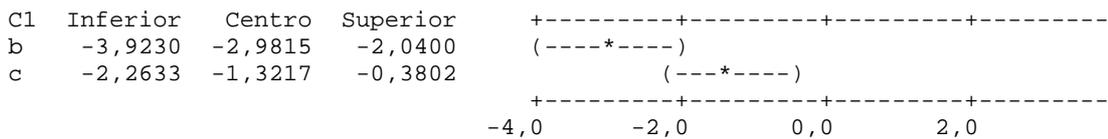
- El tratamiento A es mejor que B.
- El tratamiento A es mejor que C.
- El tratamiento B es mejor que C.

De lo cual obtuvimos los siguientes resultados:

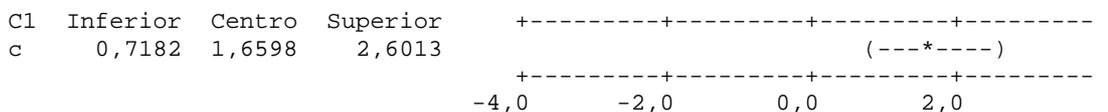
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de C1

Nivel de confianza individual = 97,91%

C1 = a restado de:



C1 = b restado de:



Según los resultados obtenidos mediante la prueba de Tukey proporciona dos conjuntos de intervalos de comparación múltiple:

- Media del tratamiento A restada de las medias del tratamiento B y C.
- Media del tratamiento B restada de la media del tratamiento C.

El primer intervalo de la resta del tratamiento B de A es una cifra entre -3,923 y -2,04; el segundo intervalo que resta el tratamiento C de A se encuentra entre -2,2633 y -0,3802, indicando que el tratamiento B y C absorbe menos que A, por último el tercer intervalo que resta el tratamiento C de B se encuentra entre 0,7182 y 2,6013, debido a que los intervalos no incluyen cero la diferencia entre los tratamientos es estadísticamente significativa.

Mediante los análisis estadísticos realizados se puede concluir que el tratamiento A es el mejor por las siguientes razones:

- La eficiencia es alta debido a que en todas sus repeticiones tienen un alto porcentaje de remoción del contaminante en comparación con los otros tratamientos.
- En este tratamiento el porcentaje de absorción en las repeticiones son parecidos a diferencia de los otros tratamientos.
- La prueba de Tukey nos demuestra que el tratamiento A es el que más se diferencia de los otros tratamientos por lo tanto es el más eficiente.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- La utilización de las macrófitas acuáticas *Eichornia crassipes* (Jacinto de agua) y *Lemna minor* (lenteja de agua) ofrece una alternativa a los métodos convencionales de desintoxicación de metales pesados como el mercurio, por lo que se las puede utilizar como una herramienta efectiva y económica
- De acuerdo a la investigación realizada comprobamos que la utilización de las macrófitas acuáticas para la absorción de mercurio es muy provechoso aplicarlo en la producción minera o cualquier otra actividad por su bajo costo y por no presentar contaminación al medio ambiente, obteniendo buenos resultados.
- La capacidad de absorción de las macrófitas acuáticas al mercurio fue de un 29,5% por lo que podemos afirmar que es eficiente para remover dicho elemento del agua.
- En el proceso investigativo se ha determinado una pérdida en la cantidad de mercurio utilizada en los tratamientos que fue de un 70,5% debido a la sedimentación del mismo.
- Del análisis estadístico resultó una diferencia significativa entre los tratamientos presentando una mayor absorción el tratamiento con la *Eichornia crassipes* (Jacinto de agua).
- De acuerdo al proceso investigativo se pudo determinar que la *Eichornia crassipes* (Jacinto de agua) es la especie que presenta una mayor resistencia a la concentración de mercurio colocad en la experimentación durante los 7 días.
- La rápida reproducción de la *Lemna minor* (lenteja de agua) es una ventaja, ya que puede absorber cantidades significativas de mercurio si se dan condiciones adecuadas para su desarrollo.
- En cuanto a combinar estas especies, podemos apreciar en los resultados que nos da un rendimiento medio en cuanto a su absorción, por lo que se concluye que estas pueden absorben igualmente solas o en grupos.

- Ambas especies desde el día quinto de intoxicación presentaron anomalías, en la *Eichornia crassipes* (Jacinto de agua) presentó necrosis que empezó en las hojas y se fue esparciendo hasta los peciolo, en cambio en la *Lemna minor* (lenteja de agua) se observó un proceso de clorosis.
- De la investigación concluimos que una mayor problemática se da en la concentración de mercurio presente en los sedimentos que la existente en el agua ya que este elemento tiene una alta tendencia a sedimentarse.

6.2. RECOMENDACIONES

- Trabajar con la *Eichornia crassipes* (Jacinto de agua) en etapas de tiempo más largos en vista que esta especie fue la que más resistió a la concentración de mercurio que se utilizó durante la experimentación.
- No exponer los recipientes a la radiación solar por periodos largos de tiempo debido a que esta puede aumentar el proceso de evaporación.
- Realizar el proceso con recirculación de agua para que no haya sedimentación y se pueda determinar la absorción.
- Los análisis de concentración de mercurio se deben realizar el mismo día de recolección de la muestra para evitar alteraciones en los resultados ya que el mercurio es un elemento volátil.
- Al utilizar esta técnica se recomienda que se le un adecuado manejo a las macrófitas acuáticas ya que estas se pueden volver plagas debido a su rápida reproducción.
- Es importante considerar las hojas de toxicidad y seguridad del reactivo utilizado en este caso el nitrato mercurioso dihidratado con la finalidad de protección.
- Se debe continuar con el proceso investigativo para conocer la incidencia de los nutrientes en las plantas y los factores que inciden en la pérdida del mercurio.
- Buscar alternativas para el manejo de estas especies vegetales contaminadas, una vez terminado su ciclo de vida.
- Recomendar que se continúe con el proceso investigativo pero en la propia industria minera para así obtener datos más reales sobre el uso de las plantas utilizadas en este trabajo de investigación.
- Se debe realizar análisis de los sedimentos debido que presenta concentraciones de mercurio elevadas.
- Para obtener datos más reales sobre la capacidad de absorción de las macrófitas acuáticas se debe realizar los análisis toxicológicos de las mismas.

ANEXOS

ANEXO IV-A

Análisis de aguas residuales minera



REPORTE DE RESULTADOS

CLIENTE: SR. DARÍO FLORES
MUESTRA: AGUA DE MINERÍA MUESTRA 1
FECHA: 2011-07-04

ANÁLISIS QUÍMICO

MUESTRA	MERCURIO miligramos/litro
AGUA DE MINERIA MUESTRA 1	0,0029

OBSERVACIONES:

Método: Filtración y Lectura por Espectrofotometría de Absorción Atómica

Ing. Maritza Flores
Responsable del Área de Metales

Ing. Catalina Peñaherrera
Directora

Ayudante de laboratorio: Ing. Angélica Astudillo

cc. archivo



PRODUCTOS Y SERVICIOS
INDUSTRIALES CÍA. LTDA.

Muestra 4

Planta Orenas

Piscina de Destoxificación de Cianuro libre

Coord. 642343 E

9657956 N

Código RA-LAB-PSI-0092-2



Resultados de Análisis			
Parámetros	Unidades	Agua	Límites permisibles
pH	U de pH	8.09	6.5 - 9
Sólidos sedimentables	ml/l	<0.1	---
Níquel	mg/l	0.2399	0.025
Cromo	mg/l	<0.001	0.05
Plomo	mg/l	<0.001	---
Cadmio	mg/l	<0.0001	0.001
Cobre	mg/l	14.855	0.02
Cobalto	mg/l	0.1182	0.2
Vanadio	mg/l	0.045	0.1
Mercurio	mg/l	0.0087	0.0002

*Texto Unificado de la Legislación Ambiental, LibroVI De la Calidad Ambiental, DE-3516, RO-E2-31-marzo-2003, Tabla 3 y 4

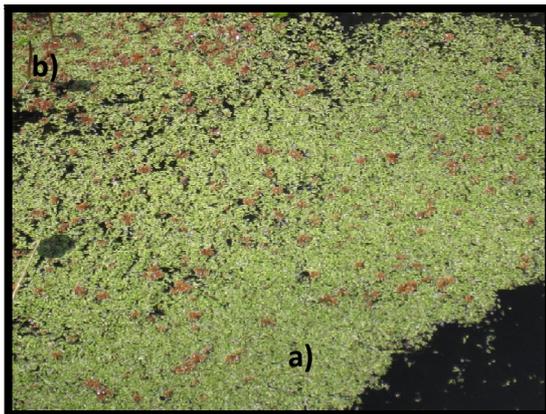
PSI PRODUCTOS Y SERVICIOS
INDUSTRIALES C. LTDA.

FIRMA AUTORIZADA

ANEXO IV-B



Fotografía 3.1 Vista panorámica de la laguna



Fotografía 3.2 Vista de la **a)** Lemna minor y **b)** *Azolla caroliniana*



a) *Lemna minor* (Lenteja de agua) **b)** *Azolla caroliniana* (Helecho de agua)

ANEXO IV-C

Identificación de las especies vegetales, realizado en el
Laboratorio de Botánica de la Universidad de Cuenca

EVALUACIÓN DE LA ESPECIE

Eichornia crassipes

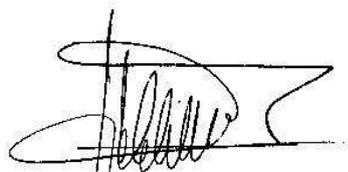
En la ciudad de Cuenca Ecuador, dada el día 7 de Octubre del 2011, se procedió al reconocimiento de la especie mencionada, en el Laboratorio Botánico de la Universidad de Cuenca, en la Facultad de Ciencias Agropecuarias, con la cooperación del Ing. Klever Rivas Docente de la Universidad.

EVALUACIÓN MACROSCOPICA:

1. **Forma:** Tallo corto, con hojas en rosetas, ascendentes a extendidas, pecíolos cortos.
2. **Textura:** Membranosa, hinchada y bulbosa
3. **Superficie:** Glabra
4. **Color:** Verde claro

DESCRIPCION BOTÁNICA:

NOMBRE CIENTÍFICO	<i>Eichornia crassipes</i>
NOMBRE VULGAR	JACINTO DE AGUA – CAMALOTE – LECHUGIN
REINO	PLANTAE
DIVISIÓN	MAGNOLIOPHYTA
FAMILIA	PONTEDERIACEAE
PLANTA ENDÉMICA	AMAZONAS
USO TRADICIONAL	MEDICIANAL Y CONTROL BIOLOGICO



Ing. Klever Rivas

EVALUACIÓN DE LA ESPECIE

Lemna minor

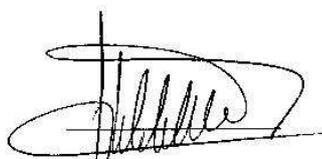
En la ciudad de Cuenca Ecuador, dada el día 7 de Octubre del 2011, se procedió al reconocimiento de la especie mencionada, en el Laboratorio Botánico de la Universidad de Cuenca, en la Facultad de Ciencias Agropecuarias, con la cooperación del Ing. Klever Rivas Docente de la Universidad.

EVALUACIÓN MACROSCOPICA:

1. **Forma:** Tiene una forma asimétrica de elíptica a estrechamente ovada u obovada con el apéndice redondeado y plana por ambas caras, raíz simple.
2. **Color:** Verde

DESCRIPCION BOTÁNICA:

NOMBRE CIENTÍFICO	<i>Lemna minor</i>
NOMBRE VULGAR	LENTEJA DE AGUA – LIMACHOS – OVAS
REINO	PLANTAE
DIVISIÓN	MAGNOLIOPHYTA
FAMILIA	LEMNACEAE
PLANTA ENDÉMICA	EUROPA Y AMERICA DEL NORTE
USO TRADICIONAL	ALIMENTO PARA PECES



Ing. Klever Rivas

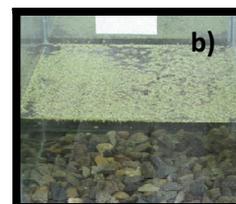
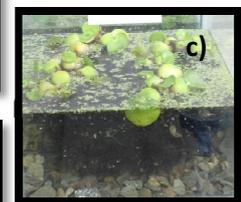
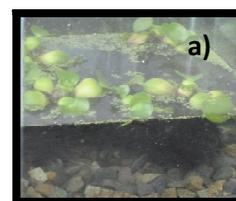
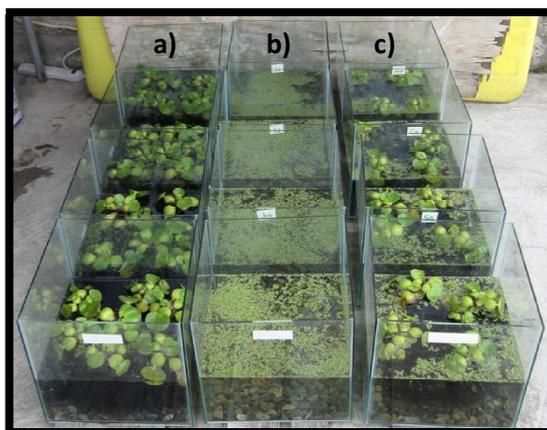
ANEXO IV-D



Fotografía 4.1 Raíces de la *Eichornia crassipes*, el color azulado que indica que son jóvenes



Fotografía 4.2 Especies con una buena pigmentación y que no posean ningún tipo de anomalías en sus partes



Fotografía 4.3 Posicionamiento de las especies vegetales; **a)** Tratamiento con la *Eichornia crassipes*, **b)** Tratamiento con la *Lemna minor*, **c)** Tratamiento Combinado (*Eichornia crassipes* y *Lemna minor*)

ANEXO IV-E

Control de las variables durante la fase de adaptación

TABLAS DE CONTROL

Etapas 1:

Día 1

<i>Eichornia crassipes</i>	Conductividad	
	μs	pH
R 1	260	7
R 2	233	7
R 3	248	7
R 4	248	7

<i>Lemna minor</i>	Conductividad	
	μs	pH
R 1	260	7
R 2	233	7
R 3	248	7
R 4	248	7

Combinada	Conductividad	
	μs	pH
R 1	260	7
R 2	233	7
R 3	248	7
R 4	248	7

Día 2

Eichornia crassipes

R 1
R 2
R 3
R 4

Conductividad μs	pH
312	7
275	7,1
276	7
298	7

Lemna minor

R 1
R 2
R 3
R 4

Conductividad μs	pH
406	7,1
366	7,1
364	7,1
356	7,1

Combinada

R 1
R 2
R 3
R 4

Conductividad μs	pH
410	7,1
298	7,1
299	7,1
357	7,1

Día 3

Eichornia crassipes

R 1
R 2
R 3
R 4

Conductividad μs	pH
301	7,1
275	7,1
268	7,1
289	7,1

Lemna minor

R 1
R 2
R 3
R 4

Conductividad μs	pH
358	7,2
348	7,2
348	7,2
344	7,2

Combinada

R 1
R 2
R 3
R 4

Conductividad μs	pH
372	7,1
280	7,1
297	7,2
375	7,1

ANEXO IV-F

Descripción del mercurio I nitrato di-hidratado



104437 Mercurio (I) nitrato di-hidratado

Información sobre producto

Fórmula empírica (según Hill)	$\text{Hg}_2\text{N}_2\text{O}_6 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
Fórmula químico	$\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
Número HS	2852 00 00
Número CE	233-886-4
Masa molar	561.22 g/mol
Categoría de almacenamiento	Almacenar entre +15°C y +25°C.
Número de índice CE	080-002-00-6
Número CAS	14836-60-3

Datos químicos y físicos

Solubilidad en agua	20 g/l (20 °C)
Punto de fusión	70 °C (descomposición)
Masa molar	561.22 g/mol
Densidad	4.78 g/cm ³ (20 °C)
Densidad aparente	2340 kg/m ³

Información de seguridad de acuerdo a GHS

Indicación de peligro(s)	H330: Mortal en caso de inhalación. H310: Mortal en contacto con la piel. H300: Mortal en caso de ingestión. H373: Puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas. H410: Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
Precaución(s)	P280: Llevar guantes de protección/ prendas de protección. P273: Evitar su liberación al medio ambiente. P304 + P340: EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar. P302 + P352: EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.
Señal	Peligro

Pictograma de peligro(s)	
Clase de almacenamiento	6.1B Sustancias no combustibles, tóxicos
WGK	WGK 3 muy contaminante para el agua
Disposición	20 Sales y residuos de mercurio. El mercurio elemental se recoge con Chemizorb® Hg (art. 112576): categoría G.

Información de seguridad

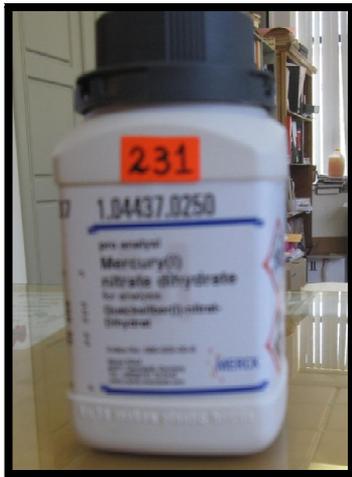
Frase R	R 26/27/28-33-50/53 Muy tóxico por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel. Peligro de efectos acumulativos. Muy tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.
Frase S	S 13-28-45-60-61 Manténgase lejos de alimentos, bebidas y piensos. En caso de contacto con la piel, lávese inmediata y abundantemente con jabón y agua. En caso de accidente o malestar, acúdase inmediatamente al médico (si es posible, muéstresele la etiqueta). Elimínense el producto y su recipiente como residuos peligrosos. Evítese su liberación al medio ambiente. Recábense instrucciones específicas de la ficha de datos de seguridad.
Características de peligrosidad	muy tóxico, peligroso para el medio ambiente
Hazard Symbol	 Very toxic  Dangerous for the environment

Información de transporte

Clasificación (Transporte terrestre) ADR, RID	UN 1627 Quecksilber(I)nitrat, 6.1, II
Clasificación (Transporte marítimo) IMDG-Code	UN 1627 MERCUROUS NITRATE, 6.1, II, Marine Pollutant: P, Segregation Group: 7 (Heavy metals and their salts (including their organometallic compounds)), 11 (Mercury and mercury compounds)
Clasificación (Transporte aéreo) IATA-DGR	UN 1627 MERCUROUS NITRATE, 6.1, II

ANEXO IV-G

Fotografía del nutriente y del reactivo para la preparación de la solución



Fotografía 3.3 Reactivo mercurio I nitrato dihidratado

Fotografía 3.4 Nutriente para las plantas acuáticas



ANEXO IV-H

Análisis inicial de la concentración de mercurio
(CESEMIN)



REPORTE DE RESULTADOS

CLIENTE: SR. DARÍO FLORES
MUESTRA: AGUA (EXPERIMENTO 1)
FECHA: 2011-11-01

ANÁLISIS QUÍMICO

MUESTRA	MERCURIO miligramos/litro
EXPERIMENTO 1	1,22

OBSERVACIONES:

Método: Generación de Hidruros - Absorción Atómica

Ing. Maritza Flores
Responsable del Área de Metales

Ing. Catalina Peñaherrera
Directora

Ayudante de laboratorio: Ing. Angélica Astudillo

cc. archivo

ANEXO IV-H

Análisis de control (CESEMIN)



REPORTE DE RESULTADOS

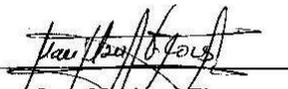
CLIENTE: SR. DARÍO FLORES
MUESTRA: AGUA (1 MUESTRA)
FECHA: 2011-12-01

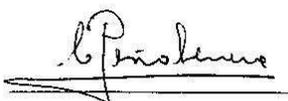
ANÁLISIS QUÍMICO

MUESTRA	MERCURIO miligramos/litro
AGUA EXPERIMENTAL	0,36

OBSERVACIONES:

Método: Generación de Hidruros - Absorción Atómica


Ing. Maritza Flores
Responsable del Área de Metales


Ing. Catalina Peñaherrera
Directora

Ayudante de laboratorio: Ing. Angélica Astudillo

cc. archivo

ANEXO IV-I

Análisis final de los parametros de DBO₅ Y DQO
(CESEMIN)

 ETAPA <small>EMPRESA NACIONAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS</small> LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 2
---	---	---

FECHA: 2011/11/17

INFORME N°: 581/11

CLIENTE

NOMBRE: SRTA. MARIUXI JARAMILLO
DIRECCIÓN: Calle El Artesano - Cuenca

MUESTRA

CODIGO: 581/01-13/11
DESCRIPCIÓN: Agua tratada con plantas
PROCEDENCIA: UPS-Cenca
FECHA DE RECEPCIÓN: 2011/11/10
ENTREGADAS POR: Srta. Mariuxi Jaramillo

RESULTADOS

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	LENTEJA 0 581/01/11	LENTEJA 1 581/02/11
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2011/11/10 2011/11/15	mg/l	2.8	2.5
DQO	PEE/LS/FQ/02	2011/11/10	mg/l	23*	27

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	LENTEJA 2 581/03/11	LENTEJA 3 581/04/11
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2011/11/10 2011/11/15	mg/l	2.5	2.4
DQO	PEE/LS/FQ/02	2011/11/10	mg/l	31	27

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	JACINTO 0 581/05/11	JACINTO 1 581/06/11
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2011/11/10 2011/11/15	mg/l	2.1	2.9
DQO	PEE/LS/FQ/02	2011/11/10	mg/l	33	27

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	JACINTO 2 581/07/11	JACINTO 3 581/08/11
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2011/11/10 2011/11/15	mg/l	2.7	2.3
DQO	PEE/LS/FQ/02	2011/11/10	mg/l	23*	19*

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	COMBINADA 0 581/09/11	COMBINADA 1 581/10/11
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2011/11/10 2011/11/15	mg/l	3.3	2.6
DQO	PEE/LS/FQ/02	2011/11/10	mg/l	33	19*

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MC0406-12

 ETAPA <small>UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL PERÚ</small> LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004	INFORME DE RESULTADOS Página 2 de 2
--	--	---

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	COMBINADA 2 581/11/11	COMBINADA 3 581/12/11
DBO5	PEE/LS/FQ/01	2011/11/10 2011/11/15	mg/l	4.4	4.3
DQO	PEE/LS/FQ/02	2011/11/10	mg/l	28	30

PARAMETRO	METODO	FECHA REALIZACION	UNIDADES	INICIAL 581/13/11
DBO5 *	PEE/LS/FQ/01	2011/11/10 2011/11/15	mg/l	0.7
DQO *	PEE/LS/FQ/02	2011/11/10	mg/l	2

SM: STANDARD METHODS, Edición 21

PARAMETRO	DBO5	DQO
INCERTIDUMBRE	15.1 % (95 %, k=1.96)	14.1 % (95 %, k=1.96)

Atentamente,



Ing. Yolanda Torres Moscoso
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.
- "Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"

MCC006-12

ANEXO V-A

Análisis final de la concentración de mercurio
(CESEMIN)



C E S E M I N
Centro de Servicios y Análisis de Minerales
Metálicos y No Metálicos
UNIVERSIDAD DE CUENCA



REPORTE DE RESULTADOS

CLIENTE: SR. DARÍO FLORES
MUESTRA: AGUA (12 MUESTRAS)
FECHA: 2011-11-10

ANÁLISIS QUÍMICO

MUESTRA	MERCURIO miligramos/litro
Jacinto 0	0,0165
Jacinto R1	0,0145
Jacinto R2	0,0150
Jacinto R3	0,0110
Lenteja 0	0,0595
Lenteja R1	0,0485
Lenteja R2	0,0530
Lenteja R3	0,0415
Combinado 0	0,0235
Combinado R1	0,0340
Combinado R2	0,0370
Combinado R3	0,0270

OBSERVACIONES:

Método: Generación de Hidruros - Absorción Atómica

Ing. Maritza Flores
Responsable del Área de Metales

Ing. Catalina Peñaherrera
Directora

Ayudante de laboratorio: Ing. Angélica Astudillo

cc. archivo

ANEXO V-B

Método utilizado en el Laboratorio (CESEMIN) para el
análisis de mercurio



ANÁLISIS DE MERCURIO EN AGUA

MÉTODO: GENERACIÓN DE HIDRUROS
CESEM IN 024-V004

ALCANCE:

Este método describe la determinación de Hg en agua de beber y aguas naturales claras en concentraciones sobre 1 ug/litro.

REACTIVOS:

- HCl al 30%
- Solución de KMnO_4 al 5%
- HNO_3 al 1.5%
- H_2SO_4 al 1.5%
- HNO_3 al 30% más H_2SO_4 al 30%
- Borohidruro de Sodio.
- Hidróxido de Sodio.
- Solución Patrón de Mercurio.

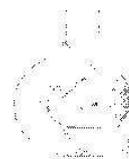
EQUIPO:

- Generador de Hidruros MHS-10
- Espectrofotómetro de Absorción Atómica AAnalyst 100 de Perkin Elmer

PREPARACIÓN DE PATRONES Y BLANCO:

- Preparar 100ml de un patrón de 1ug Hg/ml (en 1.5% de HNO_3) tomando 1ml del patrón de 100ppm y aforando a 100ml con agua destilada.
- Tomar 2 balones de 100ml cada uno y rotular: 0.01ppm (Patrón 1) y 0.05ppm (Patrón 2).
- Adicionar a cada balón agua destilada hasta la mitad, añadir 1.5ml de HNO_3 concentrado y 1.5 ml de H_2SO_4 concentrado, adicionar además unas 2 gotas de solución de KMNO_4 al 5%. Para el Patrón 1 adicionar 1ml de la solución de 1ppm y para el Patrón 2 adicionar 5ml de la solución de 1ppm, y aforar con agua destilada.
- Si es necesario se pueden preparar patrones de mayor concentración de acuerdo a las muestras a determinar.
- Homogenizar cada patrón adecuadamente.

Para la preparación del blanco adicionar a un balón de 100ml agua destilada más 1.5ml de HNO_3 concentrado y 1.5 ml de H_2SO_4



concentrado, adicionar unas 2 gotas de solución de KMnO_4 al 5% y aforar con agua destilada hasta completar el volumen.

CALIBRACIÓN CON LOS PATRONES

Introducir los parámetros de calibración en el equipo. Como concentración del patrón 1 introducir el valor de 0.1 que corresponde al contenido de Hg en los 10 ml del patrón que reaccionará en el frasco de reacción con el boro hidruro de sodio. Como concentración del patrón 2 introducir el valor de 0.5, valor que corresponde al contenido de Hg en los 10 ml del patrón que reaccionará con el boro hidruro de sodio.

Colocar en el recipiente de reacción 10 ml de blanco, y presionar conjuntamente el botón de inmersión y el de lectura y dejar reaccionar, cuando el valor se registre en pantalla pulsar A/Z para su encendido. Seguidamente tomar 10 ml del patrón de 0.01ppm, cuyo contenido es de 0.1 μg de Hg en los 10ml de solución y dejar reaccionar, calibrar como patrón 1. Seguir el mismo procedimiento con el patrón 2.

PROCEDIMIENTO:

Para las determinaciones de mercurio. Colocar alicuotas de muestra (por duplicado) de 10 ml en el interior del frasco de reacción y acidificar con 1ml de solución de HNO_3 al 30% más H_2SO_4 al 30%. Para oxidar cualquier enlace orgánico de mercurio, la solución de KMnO_4 debe ser añadida gota a gota hasta que el color violeta se mantenga. Por lo menos 60 segundos debe esperarse antes de que la determinación sea efectuada.

Antes de proceder a la lectura de las muestras, leer el patrón 1 como si fuese una muestra para verificar la estabilidad de la calibración del equipo y luego proceder con la lectura de las muestras.

La oxidación con KMnO_4 no solamente permite que los compuestos inorgánicos tales como $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ sean determinados confiablemente, sino que también lo sean los compuestos orgánicos tales como cloruro de metil mercurio y acetato de fenil mercurio.

Para todas las determinaciones se usan normalmente alicuotas de 10 ml de muestra. Para determinar concentraciones muy bajas, alicuotas de muestras de 50 ml pueden ser empleadas.



CÁLCULOS:

La concentración de mercurio en la muestra puede ser obtenida a partir de los valores de concentración de las muestras leídos en el equipo, considerando los volúmenes de muestra empleados. Expresar el resultado en mg de mercurio por litro de muestra. Si fue necesario hacer una dilución de la muestra para la determinación de mercurio dentro del rango de calibración de los patrones, considerar el correspondiente factor de dilución para los cálculos.

REFERENCIAS:

1. Perkin Elmer. Analytical Methods Using the MHS Mercury/Hydride System. 1985.
2. D Maier, H.-W. Sinemus and E. Wiedeking: Z. Analytical Chem. 296, 114-124 (1979).

BIBLIOGRAFÍA

- OROZCO, Carmen, y otros, *Contaminación ambiental una visión desde la química*, Intenational Thomson Editores Spain, Madrid 2003.
- HERNANDEZ, Aurelio y GALAN, Pedro, *Manual de depuración Uralita, Sistema para depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20.000 habitantes*, 3^{era} Edición, Thomson Paraninfo, 2000.
- BABOR, Joseph y AZÑAREZ, José, *Química general moderna*, Editora Emprendedores, México 1999.
- BIASIOLI, G., y otros, *Química general inorgánica*, Serie Arquetipo KAPELUSZ Editora SA, Buenos Aires 1997.
- SPIRO, Thomas, y STIGLIANI, William, *Química Medioambiental*, 2^{da} Edición, Pearson 2000.
- COREAL, Rodrigo, *Tratamiento y Postratamiento de Aguas Residuales*, Fundación Universitaria de Boyacá, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Centro de Investigaciones para el Desarrollo, CIPADE, Colombia 2006.
- ROMERO, Jairo, *Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principios de diseño*, Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia 2005.
- YANEZ, Fabián, *Lagunas de estabilización, Teoría, Diseño, Evaluación y Mantenimiento*. Colombia 2002.
- TORRE E, y otros, *El proceso de minerales en el Ecuador: visión de un metalurgista*, Departamento de metalurgia extractiva, Escuela Politécnica Nacional, Revista DEMEX, núm. 20, Enero 2003.

- POSADA, Martha Isabel y ARROYAVE, María del Pilar, *Efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas tropicales*, Revista de Estudios de Impactos Ambientales, núm. 6, diciembre, 2006. Recuperado septiembre 2011 revista.eia.edu.co/articulos6/Articulo5.pdf.
- OLIVERO, Jesús y JOHNSON, Boris, *Lado gris de la minería del oro: La contaminación con mercurio en el norte de Colombia*, Universidad de Cartagena 2002. Recuperado Agosto 2011 reactivos.com/.../LIBRO_MERCURIO_-_Olivero-Johnson-Colombia.pdf.
- ESTRADA, Islena, *Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (hafss) para remoción de metales pesados en aguas residuales*, Pereira 2010. Recuperado julio 2011 repositorio.utp.edu.co/tesisdigitales/texto/333918e82.pdf.
- ARENAS, Adolfo y otros, *Evaluación de la planta Lemna minor como biorremediadora de aguas contaminadas con mercurio*, Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado, Venezuela 2011. Recuperado Noviembre 2011 www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc.../1-ACI1036-10-full.pdf.
- VÁSQUEZ, Carlos, *Especiación de mercurio en el medio ambiente*, recuperado Diciembre 2011. http://isagoge.atspace.com/documentos/Archivo_isagoge5/ESPECIACIÓN_DE_MERCURIO_EN_EL_MEDIO_AMBIENTE.pdf.
- PASTOR, Rosalinda y otros, Tesis, tema *Fitorremediación en el tratamiento de aguas residuales con metales con especies del humedal natural de Pampa Chica – Iquitos*, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana 2009. Recuperado Noviembre 2011 <http://www.unapiquitos.edu.pe/oficinas/iiunap/archivos/2009/química/ARTICULO-DRA%20ROSALINDA%20PASTOR.pdf>.
- ALCARAZ, José, *El método fitosociológico*, Universidad de Murcia, España 2010. (versión de 25 de enero de 2010). Recuperado Agosto 2011

<http://es.scribd.com/doc/58835747/manual-braun-blanquet-releve>.

- PNUMA, *Evaluación Mundial sobre el mercurio*, PNUMA productos químicos. Publicado por el PNUMA Productos Químicos Ginebra, Suiza Diciembre de 2002. Versión en español publicada en Junio 2005. Recuperado Agosto 2011
www.chem.unep.ch/.../final-assessment-report-Nov05-Spanish.pdf.

- CALDERAS, C y otros, *Efecto combinado del HgCl₂ y el KNO₃ sobre la extracción del mercurio y la composición elemental del Jacinto de agua*, Universidad de Barcelona, España 2008. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos Castellón, 23-24 de julio de 2008. Recuperado Agosto 2011
www.redisa.uji.es/artSim2008/agua/A4.pdf.

- NUÑEZ, Roberto, y otros, *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*, Julio - Septiembre 2004, Recuperado Junio 2011
http://suel.wikispaces.com/file/view/Fitorremediación_Fundam_Aplic.pdf.

- ÁVILA, José y CASTILLO, David, *Jacinto de agua (Eichornia crassipes) alternativa para el tratamiento de agua dulce en producción acuícola*, ESPOL, Guayaquil, Ecuador 2000. Recuperado Junio 2011
www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4695/1/7216.pdf.

- Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, Anexo 1. Recuperado junio 2011
www.recaiecuador.com/.../TULAS.pdf

- Estadísticas mineras 2005. Dirección Nacional de Minería (DINAMI). Recuperado Junio 2011
<http://www.arcom.gob.ec/>

- Biorremediación: Organismos que limpian el ambiente, recuperado Septiembre 2011.

http://www.porquebiotecnología.com.ar/educación/cuaderno/ec_36.asp?cuaderno=36.

- Ficha de datos de seguridad del Nitrato mercurioso, recuperado Julio 2011.
<http://www.analytyka.com.mx/spanish/FDS/M/141423.htm>.
- Uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales, recuperado Agosto del 2011.
<http://www.ecojoven.com/Ecología/aresiduales.html>.

GLOSARIO

Amalgama: Aleación del mercurio con otros metales como la plata y el oro.

Bioabsorción: Es cuando un organismo retiene una sustancia en estado líquido o gaseoso.

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).

Bionutrientes: Mezcla de nutrientes esenciales para las plantas y los microorganismos benéficos del ecosistema. Se suministra a los cultivos con el fin de mantener los niveles ideales o corregir las deficiencias, sobretodo en elementos menores.

Biotecnología: Es el empleo de organismos vivos para la obtención de un bien o servicio útil para el hombre.

Cloroplastos: Son un tipo de plastos, orgánulos exclusivos de las células vegetales. Tienen una forma alargada y su importancia se debe a que son los orgánulos donde se realiza la fotosíntesis.

Clorosis: Es una condición anormal donde el follaje produce insuficiente clorofila. Cuando esto ocurre, las hojas no tienen la coloración normal verde; pueden ser verde pálidas, amarillas o amarillo blanquecino.

Disolución: La disolución o solución, por lo tanto, es la mezcla homogénea resultante tras disolver cualquier sustancia en un líquido. En una disolución, es posible distinguir entre el soluto (la sustancia que se disuelve en la mezcla y que suele aparecer en menor cantidad) y el disolvente o solvente (la sustancia donde se disuelve el soluto).

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno. Es la cantidad de oxígeno requerida, para estabilizar la materia orgánica contenida en aguas contaminadas o aguas industriales residuales, que pueden descomponerse por la acción de microbios aéreos.

DQO: Demanda Química de Oxígeno. Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica e inorgánica contenida en el agua después de corregir la influencia de los cloruros.

Eficiencia del proceso: Se la obtuvo restando el 100% a la pérdida.

Fuentes antropogénicas: Que es de origen humano, producido por el hombre.

Metilación: Es la adición de un grupo metilo (-CH₃) a una molécula.

Mitocondrias: Órgano del citoplasma de las células con núcleo diferenciado que se ocupa de la respiración celular.

Necrosis: Es la muerte de un conjunto de células o de cualquier tejido del organismo provocado por un agente nocivo que ha producido una lesión tan grave que no se puede reparar o curar.

Peciolo: Es la parte de la hoja que une el limbo a la rama.

Pigmentación: Es la coloración de tejidos vivos con pigmentos.

Pteridofitos: Se aplica a las plantas con tallos, hojas y raíces y con un sistema vascular bien desarrollado, caracterizadas por reproducirse mediante alternancia de generaciones.

Senescencia: Envejecimiento de la especie por alteración de los órganos que tienen una acumulación crónica de metales pesados.