

Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de
INVESTIGACION

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

**“EFICIENCIA DEL JACINTO DE AGUA EICHHORNIA CRASSIPES Y LENTEJA
DE AGUA LEMNA MINOR L. EN LA REMOCIÓN DE CADMIO EN AGUAS
RESIDUALES”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

AUTORA

SANDOVAL VILCHEZ JOSELYN DANIELA

ASESOR

MUÑOZ ORTEGA CESAR AUGUSTO

JURADO

DR. ZAMORA TALAVERANO NOÉ SABINO JORGE

DR. GOMEZ ESCRIBA BENIGNO PAULO

MG. ZÚÑIGA DÍAZ WALTER BENJAMIN

MG. VENTURA BARRERA CARMEN LUZ

LIMA - PERU

2019

DEDICATORIA

A mis padres Anderson y Rosario y a mis hermanas Gabriela y Camila. Son mi inspiración y motivo para salir adelante, a ellos, todo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por darme la fortaleza y sabiduría necesaria en este proceso y seguir adelante en cada etapa, a mis padres y a mis hermanas por su amor, apoyo y consejos, por los ánimos a luchar a alcanzar mis metas.

Al Ing Cesar Muñoz, por su asesoría en la presente tesis durante toda su etapa de elaboración. A mis profesores Ing. Omar Vásquez, por sus consejos y asesoría durante la etapa de experimentación en laboratorio y revisión, Ing. Ruben Martinez, por su apoyo y sus enseñanzas.

A mis docentes informantes, Ing. Benigno Gómez, Ing. Noe Zamora, Ing. Gladys Rojas, Ing. Carmen Ventura, por la revisión y comentarios de mejora del presente trabajo de investigación.

A mis amigos, los que me brindaron su apoyo moral y motivación para la culminación del trabajo de investigación.

RESUMEN

La peligrosidad del cadmio radica principalmente en el impacto que tiene en la salud, la biota acuática y la toxicidad del metal, siendo el problema más grave la bioacumulación de este sumado a la gran cantidad de industrias en el país, haciendo que sea un contaminante común en agua y sedimentos a los alrededores de instalaciones industriales.

Este trabajo de investigación inicia a partir de la hipótesis que menciona que las especies *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* alcanzarán una eficiencia mayor a 70% en la remoción de cadmio para el tratamiento de aguas residuales industriales, como primer paso para validar esta hipótesis se formula el objetivo principal de evaluar el grado de eficiencia de las especies *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Lemna minor L.* (lenteja de agua) en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales, con la finalidad de conocer la mejor alternativa en cuanto al uso de estas especies.

Como objetivos secundarios, se desea determinar el grado de eficiencia de *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* además analizar los cambios morfológicos que se puedan apreciar durante el periodo de ensayo.

Para la evaluación de la eficiencia de las macrófitas en la remoción de cadmio, se ha utilizado dos módulos piloto y agua simulada con concentración de 2 mg/l de cadmio bajo condiciones de laboratorio. El primer módulo está compuesto de *Eichhornia crassipes* y el segundo módulo está compuesto de *Lemna minor L.* El agua simulada se hizo circular a través de los módulos paralelamente, durante un periodo de once (11) días de ensayo y muestreadas para su análisis cada dos (02) días, obteniéndose como resultado valores de parámetros físicos como pH, conductividad eléctrica, temperatura y valores de concentraciones de cadmio.

De las evaluaciones y resultados obtenidos, se evidencia que *Eichhornia crassipes* presenta una eficiencia de 83.57% mientras que *Lemna minor L.* presenta eficiencia de 39.35%, siendo el principal cambio morfológico la variación de color de las especies durante el ensayo.

Palabras clave: cadmio, bioacumulación, fitorremediación, macrófitas, *Eichhornia crassipes.*, *Lemna minor L.*

ABSTRACT

The danger of cadmium is mainly the impact in health, aquatic biota and the metal toxicity, being the worst issue the bioaccumulation of this and the great industry in the country making cadmium a common pollutant in water and sediment around factories.

This investigation starts from the hypothesis that mentions species *Eichhornia crassipes* and *Lemna minor L.* will achieve an efficiency great than 70% in the removal of cadmium for the treatment of industrial wastewater. As first step to validate this hypothesis, the main objective is to assess the degree of efficiency of the species *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) and *Lemna minor L.* (duckweed) in the removal of cadmium in industrial wastewater, with the porpoise of knowing the best alternative in terms of the use of these species.

As secondary objectives, it is required to determinate the degree of efficiency from *Eichhornia crassipes* and *Lemna minor L.* and also analyze morphologic changes that could appreciate during the trial period.

In order to assess the efficiency of the macrophytes in the removal of cadmium, it has been used two pilot modules and simulated water with a concentration of 2mg/l of cadmium under lab conditions. The first module is compound of *Eichhornia crassipes* and the second module is compound of *Lemna minor L.* The simulated water was circulated through the modules in parallel, during a period of eleven (11) days of testing and sampled for analysis every two (02) days, obtaining as a result values of physical parameters such as pH, electrical conductivity temperature and values of cadmium concentrations.

From the assessment and obtained results, it is evident that *Eichhornia crassipes* presents an efficiency of 83.57%, while *Lemna minor L.* presents an efficiency of 39.35% being the mainly morphological change the color of the species during the trial.

Keywords: cadmium, bioaccumulation, phytoremediation, macrophytes, *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor L.*

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Descripción y formulación del problema	13
1.2 Antecedentes	15
1.3 Objetivos	20
1.3.1. Objetivo general	20
1.3.2. Objetivos específicos	21
1.4 Justificación e importancia	21
1.5 Hipótesis	22
II. MARCO TEÓRICO	24
2.1 Bases teóricas	24
2.1.1. Fitorremediación	24
2.1.2. Humedales	25
2.1.3. Metales pesados	31
2.1.4. Plantas acuáticas	35
2.2 Definición de términos básicos	42
2.2.1. Aguas residuales	42
2.2.2. Rizofiltración	43
2.2.3. Fitotoxicidad	43
2.2.4. Bioacumulación	43
2.2.5. Eficiencia	44

2.2.6. Eficacia.....	44
2.3 Marco legal.....	44
2.4 Descripción del sistema de tratamiento.....	51
2.4.1. Módulos de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales	51
III. MÉTODO	55
3.1. Tipo, nivel y diseño de investigación.....	55
3.1.1. Tipo de investigación	55
3.1.2. Niveles de investigación.....	55
3.1.3. Diseño de investigación.....	56
3.2 Ámbito temporal y espacial.....	56
3.3 Variables.....	56
3.4 Población y muestra	60
3.4.1. Población	60
3.4.2. Muestra.....	60
3.4.3. Unidad de análisis	61
3.5 Instrumentos y equipos.....	61
3.5.1. Equipos	61
3.5.2. Instrumentos	63
3.6 Metodología	63
3.6.1. Recolección de información	64
3.6.2. Preparación de patrones.....	69

3.6.3. Condiciones instrumentales.....	69
IV. RESULTADOS.....	74
4.1. Parámetros físicos	74
4.2. Concentración de cadmio (Cd).....	79
4.3. Cambios morfológicos	82
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	87
VI. CONCLUSIONES	89
VII. RECOMENDACIONES	90
VIII. REFERENCIAS	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Mecanismos de fitorremediación	24
Tabla 2: Tabla resumen de tipo, nivel y diseño de la investigación	56
Tabla 3: Variables de estudio	57
Tabla 4: Operacionalización de variables	58
Tabla 5: Condiciones del Equipo de Absorción Atómica.....	70
Tabla 6: Concentración vs. Absorbancia	71
Tabla 7: Resultados de Parámetros físicos.....	74
Tabla 8: Resultados de Concentración de Cadmio	79
Tabla 9: Valores promedio de concentración final de Cadmio.....	80
Tabla 10: Comportamiento de <i>Eichhornia crassipes</i> durante el periodo de muestreo .	83
Tabla 11: Comportamiento de <i>Lemna minor L.</i> durante el periodo de muestreo	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Humedal artificial de flujo superficial con macrófitas flotantes	27
Figura 2: Humedal artificial de flujo superficial con macrófitas sumergidas.....	28
Figura 3: Humedal artificial de flujo subsuperficial con de flujo horizontal.....	29
Figura 4: Humedal artificial de flujo subsuperficial con de flujo vertical	30
Figura 5: Principales plantas acuáticas	35
Figura 6: Lenteja de agua <i>Lemna minor L.</i>	40
Figura 7: Jacinto de agua <i>Eichhornia crassipes</i>	42
Figura 8: Diseño de sistema de tratamiento	52
Figura 9: Medidas de sistema de tratamiento.....	53
Figura 10: Sistema de tratamiento con macrófitas flotantes	54

Figura 11: Equipos utilizados para la medición in situ	62
Figura 12: Digestión de muestras.....	68
Figura 13: Patrones de cadmio utilizados	69
Figura 14: Equipo de Absorción Atómica	70
Figura 15: Concentración vs Absorbancia	72
Figura 16: Resumen de procedimiento de la investigación	73
Figura 17: Valores registrados de pH para Eichhornia crassipes.....	75
Figura 18: Valores registrados de pH para Lemna minor L.....	76
Figura 19: Valores registrados de Conductividad eléctrica para Eichhornia crassipes	77
Figura 20: Valores registrados de Conductividad eléctrica para Lemna minor L.	77
Figura 21:Valores registrados de Temperatura para Eichhornia crassipes	78
Figura 22: Valores registrados de Temperatura para Lemna minor L.	79
Figura 23: Concentración de cadmio (Cd) en agua tratada con Eichhornia crassipes .	81
Figura 24: Concentración de cadmio (Cd) en agua tratada con Lemna minor L.	82

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación de ambientes acuáticos por metales pesados se ha convertido en un serio problema en el desarrollo mundial. Los metales pesados a diferencia de contaminantes orgánicos son persistentes en la naturaleza, además, tienden a acumularse en diferentes componentes del ambiente. Estos metales son liberados de una variedad de fuentes como minería, aguas residuales urbanas, fundiciones, industrias químicas y textiles. Estos metales pesados son altamente tóxicos para las plantas acuáticas y animales, así como también no desaparecen fácilmente del ambiente, su tratamiento usualmente requiere remoción con el uso de tecnología siendo estas generalmente costosas, de intensiva energía y diseñada para metales específicos. Contrario a esto, la fitorremediación (remoción de contaminantes mediante el uso de plantas) ofrece una tecnología promisoría para la remoción de metales pesados de las aguas residuales. (Mishra, 2008)

Entre los metales pesados más peligrosos, se señala al cadmio, el cual no es un elemento esencial para los sistemas biológicos, sino que se encuentra presente como contaminante tanto en alimentos como agua y aire (siendo estos últimos en donde recorre mayores distancias) por lo que su presencia en el ambiente se debe principalmente a la contaminación antropogénica.

Entre las técnicas de fitorremediación existente mencionamos a la rizofiltración, la cual utiliza las raíces de plantas para descontaminar agua superficial, subterránea o efluentes líquidos contaminados con metales pesados, toxinas orgánicas, entre otros elementos, siendo una de las opciones que presenta mejor relación de costo-beneficio respecto a otros métodos empleados en el tratamiento de efluentes líquidos. Además, es estética y naturalmente amigable con el ambiente, por lo que se presenta como una forma de descontaminación socialmente aceptable para las comunidades circundantes y para los organismos de control respectivos (Guevara, De la Torre, & Ana Villegas, 2009)

Las plantas acuáticas, también conocidas como macrófitas, están representadas por toda la vegetación que crece la zona litoral de lagos, embalses, ríos, ya sea en la zona de interfaz agua -tierra (emergentes), sobre la superficie de agua (flotantes) o totalmente sumergidas (sumergidas).

Mientras que las macrófitas emergentes y sumergidas toman los nutrientes de los sedimentos o del agua intersticial, las flotantes lo toman simplemente del agua; estas características han permitido emplearlas como una técnica denominada rizofiltración la cual utiliza especies acumuladoras e hiperacumuladoras con la capacidad de absorber, acumular, trasladar y concentrar gran cantidad de ciertos elementos tóxicos en sus estructuras principalmente metales pesados y productos xenobióticos. (Caviedes & Ricardo, 2016)

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar el grado de eficiencia de dos especies macrófitas flotantes *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* en la remoción de cadmio en aguas residuales de tipo industrial, para lo cual se plantea un ensayo de rizofiltración por un periodo de 11 días bajo condiciones de laboratorio utilizando agua simulada, lo cual permitirá conocer las potenciales cualidades de cada especie además de implementar la información científica para posteriores trabajos de investigación, siendo una alternativa de tecnología limpia, económica y rentable para su uso en futuros sistemas de tratamiento de aguas contaminadas con dicho metal.

En el Capítulo I, se describe el problema principal ¿Cuál es el grado de eficiencia de *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales? Del cual partiremos para determinar los objetivos e hipótesis, los cuales serán demostrados a través de la medición de variables.

En el Capítulo II se detalla el marco teórico, el cual ayudará a entender el proceso y evolución del trabajo de investigación definiendo términos básicos como fitorremediación, metales pesados, y las características de las macrófitas flotantes utilizadas, además del marco legal.

En el Capítulo III se desarrolla la metodología de investigación de tipo experimental prospectivo, longitudinal y analítico pues es desarrollada con la intervención del investigador y con datos recogidos a propósito medidos a través del tiempo planteando y probando la hipótesis para establecer la asociación entre factores. Además, se detalla desde la obtención de macrófitas flotantes hasta la etapa de experimentación.

En el Capítulo IV se realiza la descripción del sistema de tratamiento utilizado para el presente trabajo de investigación, tales como el diseño, cantidad de agua simulada y procedimiento del trabajo de investigación.

En el Capítulo V se detallan los resultados obtenidos en cuanto a la eficiencia de remoción de cadmio de las especies *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* además de los cambios morfológicos que presentaron durante el periodo de ensayo.

Finalmente, en el Capítulo VI se señala la relación entre los resultados de la presente tesis e investigaciones de otros autores, para posteriormente presentar las conclusiones y recomendaciones.

1.1 Descripción y formulación del problema

Descripción del problema

Según los cálculos, anualmente se libera en forma natural unas 25 mil toneladas de cadmio al ambiente. El principal aporte proviene de la descomposición de las rocas y que luego son vertidas al curso de los ríos. Una parte menor es liberada a la atmósfera como consecuencia

de los incendios forestales, la quema de combustibles fósiles, las erupciones volcánicas y los residuos industriales. Siendo evidente que un elemento que es liberado al ambiente de manera natural además de los producidos por desechos industriales requiere de altas concentraciones en el organismo para provocar efectos no deseados. Por eso los principales problemas de salud asociados con el cadmio pueden ser detectados en zonas de minas y de explotación de este metal o de los metales asociados. (D'Alessandro, 2016)

El cadmio en el agua puede provenir de descargas industriales y de desechos mineros. El cadmio se usa ampliamente en el recubrimiento de metales, químicamente el cadmio es muy similar al zinc y estos dos metales experimentan frecuentemente procesos geoquímicos juntos.

La peligrosidad del metal pesado cadmio, radica en principalmente en el impacto que tiene en la salud, la biota acuática y la toxicidad del metal, siendo el mayor problema la bioacumulación del mismo, esto sumado a la gran cantidad de industrias y mineras presentes en nuestro país hacen que el cadmio sea un contaminante común en el agua y sedimentos en lugares cercanos a instalaciones industriales y mineras. (Manahan, 2006)

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de estos en la cadena alimenticia. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento de los metales desde la solución a la raíz de la planta.

En plantas, el concepto de bioacumulación se refiere a la agregación de contaminantes; algunos de ellos son más susceptibles a ser fitodisponibles que otros. (Prieto, González, Román, & Prieto, 2009)

Por ello, en la presente investigación se analiza la eficiencia de dos especies de plantas en la remoción de cadmio en aguas residuales simuladas, la cual se realizará en el Laboratorio de Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la

Universidad Nacional Federico Villarreal, con la finalidad de determinar cuál de ellas puede ser potencialmente utilizadas en industrias con dichos efluentes.

Se utilizan métodos de fitorremediación debido a que presentan ventajas sobre otros organismos biológicos, tales como que pueden almacenarse por más tiempo en forma de semilla, los costos de mantenimiento son mínimos, son frecuentemente utilizados en los ensayos de fitotoxicidad, entre otros.

Formulación del problema

Problema principal

¿Cuál es el grado de eficiencia de *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales?

Problemas secundarios

- ¿Cuál es la concentración final de cadmio en aguas residuales industriales después del tratamiento con *Eichhornia crassipes*?
- ¿Cuál es la concentración final de cadmio en aguas residuales industriales después del tratamiento con *Lemna minor L.*?
- ¿Cuáles son los cambios morfológicos cualitativos en *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* en función a la exposición de cadmio en aguas residuales industriales?

1.2 Antecedentes

Antecedentes nacionales

- **Poma, V., Valderrama, A. (2014) Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de cadmio (II) y mercurio (II) con la especie *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(3), 164-173, Lima**

En su investigación realizaron estudios para medir la capacidad de sorción de cadmio Cd (II) y mercurio Hg (II) de la especie *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) optimizando concentración de nutrientes, pH y concentración de iones metálicos a temperatura ambiente y soluciones acuosas de cadmio y mercurio. Como resultado, se encontró que la concentración óptima de cadmio y mercurio es de 5 mg/l y los porcentajes de sorción fueron de 16.56% para cadmio y 15.6% para mercurio en un periodo de 7 días.

- **Gómez, B. (2013) *Determinación de la tolerancia a plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg) de Pistia stratiotes “huama”, Eichhornia crassipes “putu putu” y Lemna minor “lentejita”* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Iquitos**

El objetivo de la tesis fue determinar la tolerancia fitotóxica a mercurio Hg, plomo Pb y cadmio Cd de *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, evaluando los efectos de diferentes concentraciones de dichos metales sobre el crecimiento, tolerancia y capacidad de acumulación en condiciones de laboratorio. Como se resultado se obtuvo que la especie *Lemna minor* resiste la presencia de cadmio (0.128 a 0.64 mg/l) en agua además de una buena acumulación de dicho metal, mientras que *Eichhornia crassipes* resiste la presencia de cadmio hasta una concentración de 0.128 mg/l presentando también una buena acumulación de dicho metal.

- **Fernández, L., Enrique P. (2013) *Capacidad acumuladora de cadmio en raíces de Scirpus californicus expuestas a diferentes concentraciones de nitrato de cadmio en condiciones de laboratorio, Revista Científica de Estudiantes, 1(2), e14, Trujillo***

En la dicha investigación se determinó la capacidad acumuladora de cadmio en raíces de *Scirpus californicus* en condiciones de laboratorio; para ello, luego de la aclimatación y

adaptación del material experimental durante 30 días, se aplicó el diseño experimental de estímulo creciente con cinco tratamientos: 0; 0,5; 1,0; 1,5 y 2,0 ppm de cadmio, durante 15 días. Como resultado, se encontró que las raíces del tratamiento con 1,5 y 2,0 ppm de cadmio acumularon mayor cantidad de este elemento, con cambios severos en el color, engrosamiento y crecimiento longitudinal. Finalmente se concluye que las raíces de *S. californicus* tienen capacidad de acumular, tolerar y resistir altas concentraciones de cadmio.

- **Choque, M. (2010) *Cuantificación de la remoción de Pb y Cd mediante la lenteja de agua Lemna minor y Azolla fuliculoides de las aguas de la bahía interior de Puno* (tesis de posgrado) Universidad Nacional del Altiplano, Puno**

En su investigación determina las propiedades fisicoquímicas de la lenteja de agua y *azolla* además de la adsorción de Pb y Cd de las aguas de la bahía del lago Titicaca. Como resultado, presenta que el porcentaje de remoción de cadmio Cd (II) y plomo Pb (II) en lenteja de agua aumenta según el transcurso de tiempo, siendo 62.56% y 65.55% de remoción respectivamente en 30 días de contacto con agua contaminada con dicho metal, mientras que a los 5 días fue de 2.38% y 0.48% respectivamente siendo en ambos casos mayores a la remoción de *Azolla fuliculoides*

- **Hurtado A., Soto, J. (2006) *Evaluación del Tratamiento de agua ácida con plomo mediante Fitorremediación* (tesis de pregrado) Universidad Nacional de Ingeniería, Lima**

En su investigación utiliza dos módulos pilotos para la evaluación de las aguas ácidas, el primer módulo consiste en tres compartimientos que contienen conchas de abanico, compost y plantas (*Typha.Cyperus*) y el segundo módulo compuesto por plantas (*Typha.Cyperus*), concluyendo en su investigación que el primer módulo puede ser empleado en el tratamiento

de aguas ácidas, ya que obtienen mejores resultados comparados con el segundo módulo en el que utilizan solo plantas.

Antecedentes internacionales

- **Caviedes, D., Ricardo, D. (2016) Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. *Producción más limpia* 11(2), 126-149, Colombia**

El artículo de revisión muestra una recopilación de numerosas investigaciones en relación con el empleo de treinta (30) especies de plantas acuáticas (macrófitas) comunes en el trópico americano para la remoción de metales pesados tales como mercurio Hg, manganeso Mn, hierro Fe, cadmio Cd, plomo Pb, cromo Cr, zinc Zn, cobre Cu, aluminio Al, níquel Ni y arsénico As usualmente encontrados en aguas residuales generadas en actividades industriales. Entre las macrófitas analizadas se encuentran a *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* cuyo rango en porcentaje de remoción de cadmio fue de 40-85% y 33-50% respectivamente.

- **Bharti S, Kumar T. (2012) Phytoremediation of the coalmine effluent. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 81(1), 36-42, India**

. (Fitorremediación de efluente de mina de carbón) En la presente investigación el efluente de una mina de carbón fue sometido a fitorremediación por un periodo de siete (07) días usando dos macrófitas por separado *Azolla pinnata* y *Lemna minor L.* Se analizó la concentración inicial de ocho (08) metales en el efluente: hierro Fe, manganeso Mn, cobre Cu, zinc Zn, níquel Ni, plomo Pb, cromo Cr y cadmio Cd. La concentración inicial de cadmio en dicho efluente fue de 0.06 mg/l, tras el periodo de ensayo la concentración final en agua tratada con *Azolla pinnata* fue de 0.009 mg/l mientras que la concentración final en agua tratada con *Lemna minor L.* 0.008 mg/l siendo la eficiencia de remoción de 85% y 86.7% respectivamente

- **Martelo, J., Lara, J. (2012) Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221-243, Colombia**

Señalan en su investigación que los tratamientos de aguas residuales que involucran macrófitas flotantes demostraron ser eficientes en la remediación de aguas con contenido de nutrientes, materia orgánica y metales pesados tales como arsénico As, zinc Zn, cadmio Cd, cobre Cu, plomo Pb, cromo Cr y mercurio Hg encontrándose porcentajes máximos de remoción entre 85% y 95%. Entre las especies más empleadas se encuentran el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y lenteja de agua (*Lemna minor L.*) teniendo la primera de estas un porcentaje de remoción de cadmio entre 40% y 85% en aguas residuales industriales.

- **Mishra, V., Tripathi, B.D. (2008) Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes. *Bioresource technology*, 99(1), 7091-7097, India**

(Remoción simultánea y acumulación de metales pesados de tres macrófitas acuáticas) en la presente investigación señalan la efectividad de tres (03) macrófitas *Pistia stratiotes L.* (lechuga de agua), *Spirodela polyrrhiza* (duckweed) y *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) para la remoción de cinco (05) metales pesados (hierro Fe, zinc Zn, cobre Cu, cromo Cr y cadmio Cd) sometidas a concentraciones de 1 mg/l, 2 mg/l y 5 mg/l de dichos metales en condiciones de laboratorio. Como resultado se reveló que las tres especies presentan un alto grado de remoción (mayor a 90%) de los diferentes metales durante 15 días de ensayo siendo *Eichhornia crassipes* la más eficiente, removiendo el mayor porcentaje de cadmio en concentraciones de 2 mg/l.

- **Arroyave M. (2004) La Lenteja de Agua (*Lemna minor L.*): una planta acuática promisoría. *Revista EIA*, (1), 33-38, Colombia**

Se menciona en su investigación la capacidad de fitorremediación de esta macrófita, por su capacidad de absorber tanto nutrientes como contaminantes de los ecosistemas acuáticos tales como cadmio Cd, cromo Cr, cobre Cu, níquel Ni y selenio Se observándose que en condiciones experimentales de laboratorio, *Lemna minor L.* resultó ser un buen acumulador de cadmio Cd, selenio Se y cobre Cu, un acumulador moderado de cromo Cr y pobre acumulador de níquel Ni y plomo Pb, concluyendo que dicha especie es buen potencial para la remoción de cadmio de aguas residuales contaminadas con dicho elemento ya que puede acumular altas concentraciones (13.3 g Cd) en ellos, además, su rápido crecimiento la hace una especie apropiada para actividades de fitorremediación.

- **Delgado, M., Bigeriego, M. y Guardiola, E. (1993) Uptake of Zn, Cr and Cd by water hyacinths. *Water Resources*, 27(2), 269-272, España**

Señalan en su investigación que el jacinto de agua *Eichhornia crassipes* absorbe el 48% de zinc, 60% de cromo y 42% de cadmio presente en agua residual, entre estos metales analizados el cadmio fue el más tóxico, mostrando necrosis y oscurecimiento en la planta cuando la concentración en la solución fue igual y mayor a 2ppm, además que la producción de dicha especie fue drásticamente reducida cuando la concentración de cadmio en la solución fue mayor a 0.5 ppm

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el grado de eficiencia de las especies *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar el grado de eficiencia de *Eichhornia crassipes* en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales.
- Determinar el grado de eficiencia de *Lemna minor L.* en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales.
- Analizar cambios morfológicos en *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* en función a la exposición de cadmio en aguas residuales industriales.

1.4 Justificación e importancia

Justificación

Las especies *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* fueron seleccionadas para evaluar su comportamiento y la capacidad de remoción de metales pesados como el cadmio en agua bajo condiciones de laboratorio.

Estas macrófitas son perennemente acuáticas esparcidas por todo el mundo, consideradas nocivas y extremadamente invasivas en ambientes de aguas frescas. Estas especies llevan a cabo todo su ciclo de vida como plantas flotantes, solo el sistema radicular está completamente sumergido; toman los metales del agua, produciendo una concentración interna mayor en las capas que sus alrededores y mostrando mayor capacidad metal-acumuladora que las no hiperacumuladoras plantas terrestres. Su gran biomasa, gran eficiencia de remoción, sistema de fibra radicular y gran tolerancia a los metales las hace una excelente opción para el proceso de fitorremediación. (Mishra, 2008)

El presente estudio se justifica como alternativa ecológica y económica para el tratamiento de aguas residuales industriales utilizando especies fitorremediadoras, las cuales son previamente analizadas en ensayos de laboratorio, para posteriormente ser parte de un

sistema de tratamiento como humedales o wetlands, los cuales son económica y ambientalmente viables.

Importancia

Debido a la habilidad que tienen las macrófitas acuáticas para asimilar hasta cierto punto todos los constituyentes del agua considerados como contaminantes, estas se han empleado en la detección y remoción de sustancias en efluentes de aguas residuales o domésticas e industriales; la importancia de las macrófitas radica en su facilidad para ser empleadas en núcleos rurales debido a su bajo consumo de energía convencional y a la practicidad en el montaje y operación de los sistemas de tratamiento (Caviedes & Ricardo, 2016), además aumenta la estética del paisaje del entorno mejorando la percepción del lugar de aplicación y es fácilmente replicable en otros proyectos pequeños.

La importancia a nivel económica radica en el bajo costo de mantenimiento y operación, pues al utilizar plantas acuáticas se realiza un tratamiento natural.

Los resultados de la presente investigación permitirán conocer las características fitorremediadoras de cada una de las especies analizadas en la remoción de cadmio mediante la rizofiltración, la cual determinará su potencial uso en el tratamiento de aguas residuales.

1.5 Hipótesis

Hipótesis Principal

Hi: Las especies *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* alcanzarán una eficiencia mayor a 70% en la remoción de cadmio para el tratamiento de aguas residuales industriales.

Hipótesis Secundarias

- Las especies *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* cumplen con características removedoras de metales pesados.
- El grado de eficiencia de remoción de cadmio en aguas residuales de *Eichhornia crassipes* es superior a la de *Lemna minor L.*
- Los cambios morfológicos de las especies *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* son evidentes durante el tratamiento.

II. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se exponen las investigaciones científicas necesarias que fueron empleadas como base para el desarrollo de la presente investigación, las cuales han sido extraídos de libros, artículos científicos, publicaciones en internet y tesis con la finalidad de guiar a futuros investigadores y lectores en general, teniendo una percepción clara de los términos manejados en el desarrollo de este estudio.

2.1 Bases teóricas

2.1.1. Fitorremediación

Tal como señala Delgadillo (2011), “la fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen in situ o ex situ la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas”.

De esta manera, se utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes, encontrándose una gran diversidad de especies que se emplean para este fin, algunas de ellas reciben el nombre de hiperacumuladoras debido a su gran capacidad para acumular metales pesados.

Las fitotecnologías se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen lugar en las plantas y en los microorganismos asociados a ellas, tales como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición. En la Tabla 1 se presentan los mecanismos de fitorremediación:

Tabla 1: Mecanismos de fitorremediación

Proceso	Mecanismo	Contaminantes
Fitoestabilización	Complejación	Orgánicos e inorgánicos
Fitoextracción	Hiperacumulación	Inorgánicos
Fitovolatilización	Volatilización a través de las hojas	Orgánicos e inorgánicos

Proceso	Mecanismo	Contaminantes
Fitoimmobilización	Acumulación en la rizósfera	Orgánicos e inorgánicos
Fitodegradación	Uso de plantas y microorganismos asociados para degradar	Orgánicos
Rizofiltración	Uso de raíces para absorber contaminantes del agua	Orgánicos e inorgánicos

Fuente: Delgadillo et al., 2011

2.1.2. Humedales

Ramsar (2006) señala lo siguiente: “Los humedales son zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio y la vida vegetal y animal asociada a él. Los humedales se dan donde la capa freática se halla en la superficie terrestre o cerca de ella o donde la tierra está cubierta por aguas poco profundas”.

La Convención de Ramsar aplica un criterio amplio a la hora de determinar qué humedales quedan sujetos a sus disposiciones. Con arreglo al texto de la Convención (Artículo 1.1), se entiende por humedales: **“las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”**. Además, a efectos de proteger sitios coherentes, el Artículo 2.1 estipula que los humedales que se incluirán en la Lista de Ramsar de Humedales de Importancia Internacional: **“podrán comprender sus zonas ribereñas o costeras adyacentes, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja, cuando se encuentren dentro del humedal”**.

En general, se reconocen cinco tipos de humedales principales:

- Marinos (humedales costeros, lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral)
- Estuarinos (incluidos deltas, marismas de marea y manglares)
- Lacustres (humedales asociados con lagos)
- Ribereños (humedales adyacentes a ríos y arroyos)
- Palustres (es decir, “pantanosos” - marismas, pantanos y ciénagas).

Además, hay humedales artificiales, como estanques de cría de peces y camarones, estanques de granjas, tierras agrícolas de regadío, depresiones inundadas salinas, embalses, estanques de grava, piletas de aguas residuales y canales. La Convención de Ramsar ha adoptado un Sistema Ramsar de Clasificación de Tipos de Humedales que incluye 42 tipos, agrupados en tres categorías: humedal es marinos y costeros, humedales continentales y humedales artificiales.

2.1.2.1. Humedales artificiales

Entre los humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de aguas residuales, podemos definir los siguientes: humedales de flujo superficial (FWS-Free Water Surface) y los de flujo subsuperficial (SFS-Sub Surface Flow). (Arias, 2010)

2.1.2.1.1. Humedal artificial de flujo superficial

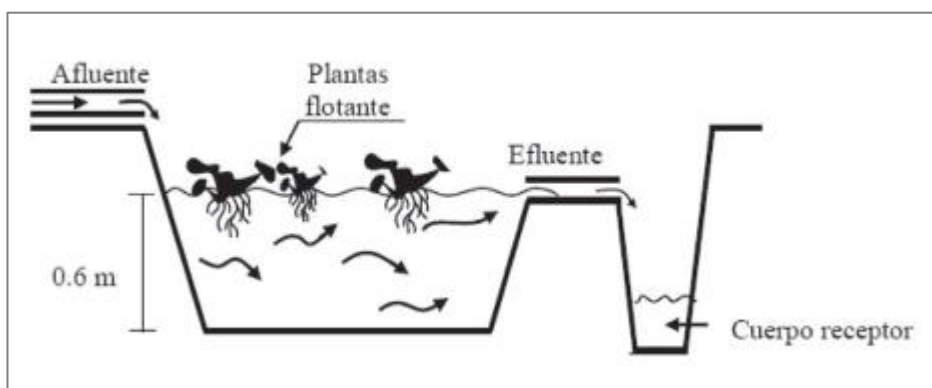
Este tipo de humedal consiste en canales con la superficie del agua expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por una cubierta impermeable, vegetación emergente y niveles de agua poco profundos que oscilan entre 0.1 y 0.6 metros, en donde el tratamiento se produce durante la circulación lenta del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación.

Este sistema se puede dividir, de acuerdo con el tipo de macrófitas utilizadas como se muestra a continuación:

- **Sistema con macrófitas flotantes:** Tal como señala Hurtado (2006), los sistemas con macrófitas flotantes están formados por grandes lagunas con bajos niveles de agua y provistas de plantas macrófitas que flotan libremente en la superficie, tal como se muestra en la Figura 1. Estos sistemas son especialmente eficaces en la eliminación de nitrógeno y el fósforo; ya que estos elementos son absorbidos en grandes cantidades por las plantas. Para aumentar la capacidad de tratamiento y asegurar el mantenimiento de las condiciones aeróbicas necesarias para el control biológico de mosquitos, se emplean sistemas complementarios de aireación como por ejemplo el sistema de aireación con difusores de burbuja fina. (Figueroa K. S., 2015)

Entre las especies utilizadas en este sistema se encuentra el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y lentejas de agua (*Lemna spp.*, *Spirodela spp.*, *Wolffia spp.*). (Hurtado, 2006).

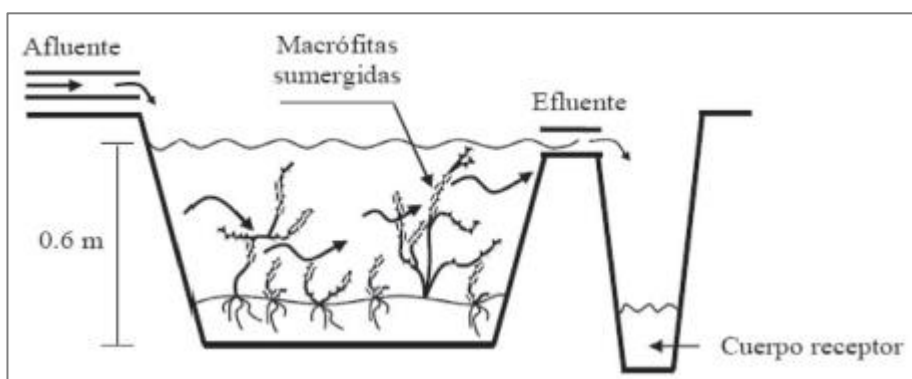
Figura 1: Humedal artificial de flujo superficial con macrófitas flotantes



Fuente: Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas,

- **Sistemas con macrófitas sumergidas:** los cuales están compuestos por lagunas con bajo nivel de agua y plantas macrófitas cuyo tejido fotosintético se encuentra totalmente sumergido, tal como se muestra en la Figura 2. Las especies sumergidas generalmente resultan poco adecuadas en los sistemas de depuración debido a su baja productividad en aguas residuales, por tanto, tienen un papel complementario si se encuentran en ciertos sistemas en combinados con otras plantas, son en general muy sensibles a todo límite de paso de la luz y a concentraciones de sólidos en suspensión elevados puede disminuir de manera importante su crecimiento (Hurtado, 2006).

Figura 2: Humedal artificial de flujo superficial con macrófitas sumergidas



Fuente: Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas,

2010

2.1.2.1.2. Humedal artificial de flujo subsuperficial

Este tipo de humedal utiliza macrófitas emergentes que consiste en un filtro biológico relleno de un medio poroso (piedra volcánica, grava, etc.), en el cual las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales pretratadas atraviesan de forma horizontal o vertical el lecho filtrante, en estos sistemas el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie del medio granular. Estos humedales a su vez se clasifican a su vez en

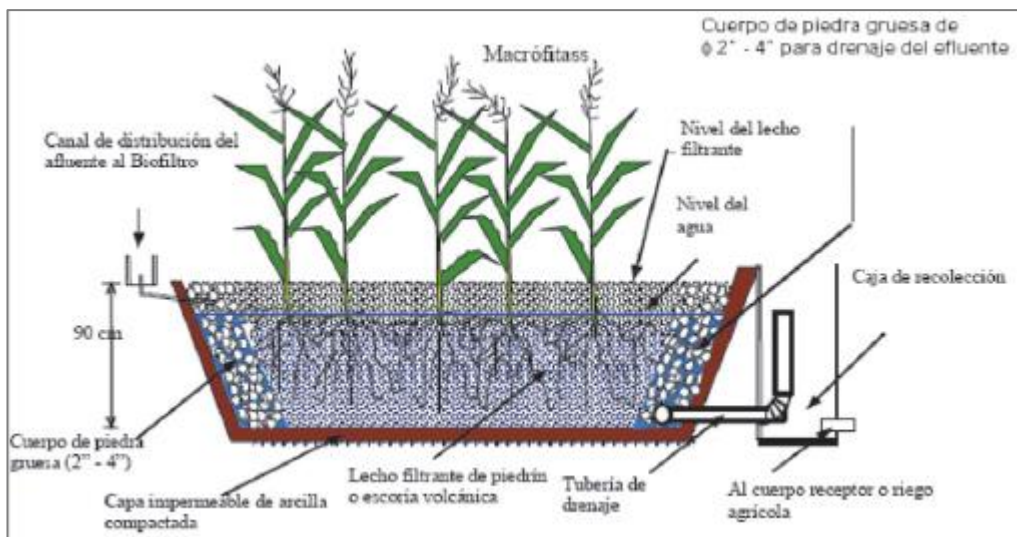
humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y flujo vertical según la manera como las aguas pretratadas atraviesan el lecho filtrante.

Las especies vegetales sembradas son la quinuilla (*Typha sp.*), la caña o carrizo (*Phragmites australis*), y el junco (*Joncus sp.*) en forma de mono o policultivo (Hurtado, 2006).

- **Humedales de flujo horizontal:** en el cual las aguas residuales fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, en una trayectoria horizontal y con una ligera inclinación (1-3%) a través del lecho filtrante, hasta la superficie de recolección del efluente, tal como se muestra en la Figura 3.

En este proceso la eliminación de contaminantes ocurre por la combinación de fenómenos tales como la degradación aeróbica y anaeróbica de las sustancias orgánicas, la absorción y la sedimentación de los contaminantes.

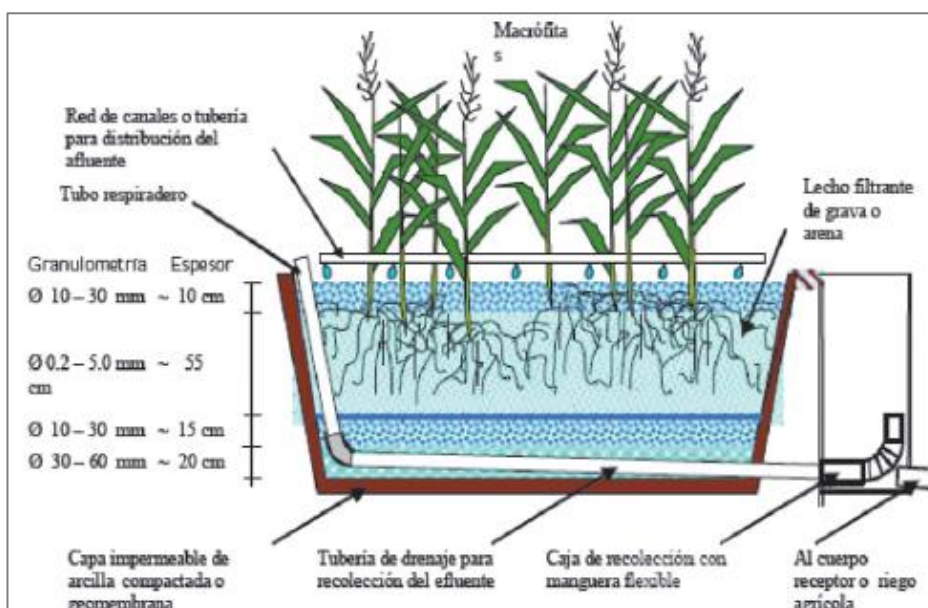
Figura 3: Humedal artificial de flujo subsuperficial con de flujo horizontal



Fuente: Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas,

- **Humedales de flujo vertical:** en el cual las aguas pretratadas se distribuyen de manera uniforme e intermitente sobre la superficie del lecho filtrante, cuyo espesor varía entre 800 y 1200 mm con profundidades hasta de 1.2 metros, y luego percolan hacia la zona de recolección, tal como se muestra en la Figura 4.

Figura 4: Humedal artificial de flujo subsuperficial con de flujo vertical



Fuente: Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas,

2010

2.1.2.2. Ventajas de la aplicación de humedales artificiales

- Los humedales artificiales pueden ser eficaces en la remoción de contaminantes de cualquier vertido de agua residual, ya sea doméstico, industrial, agrícola o minero.
- Es de bajo costo de construcción, operatividad y mantenimiento ya que no requiere equipos ni materiales sofisticados, sino que se emplean frecuentemente materiales de la zona sin requerir personal calificado.
- Constituyen un ecosistema que formará parte del paisaje natural del entorno.

2.1.3. Metales pesados

En química, “metal pesado” se refiere a un tipo de elementos químicos, muchos de los cuales son tóxicos para los seres humanos, pues presentan mayor peligro ambiental debido a su uso extensivo, a su toxicidad y a su amplia distribución. Ninguno ha prevalecido aun en el medio ambiente en tal extensión como para constituir un peligro amplio. Sin embargo, se está descubriendo que cada uno de ellos ocurre a niveles tóxicos en ciertos lugares. Los metales difieren de los compuestos orgánicos tóxicos en que son totalmente no degradables, con lo que se acumulan en los sistemas ambientales, de ahí su toxicidad. Los últimos sumideros de los metales pesados son los suelos y sedimentos.

Los metales pesados se encuentran cerca de la parte inferior de la tabla periódica, con lo que sus densidades son altas en comparación con los otros materiales. Aunque asociamos a los metales pesados con la contaminación del agua y de los alimentos, en realidad son transportados en su mayor parte de un lugar a otro a través del aire, como gases o especies adsorbidas, o como especies adsorbidas en las partículas materiales suspendidas. (Baird, 2001)

2.1.3.1. Cadmio

Tal como señala Repetto, 1995 (como se citó en Luna, 2016), el cadmio no es un elemento esencial para los sistemas biológicos, sino que se encuentra presente como contaminante tanto en alimentos como agua y aire (siendo estos últimos en donde recorre mayores distancias). Se presenta en la corteza terrestre a niveles bajos, encontrándose en la greencknita o sulfuro de cadmio (mineral que lo contiene en cantidad apreciable); por lo que su presencia en el ambiente se debe principalmente a la contaminación antropogénica.

2.1.3.1.1. Propiedades fisicoquímicas

- Peso atómico:48
- Masa atómica:112.41
- Grado de oxidación: II
- Densidad:8.642 g/cm⁻³
- Punto de fusión: 320.9 °C
- Punto de ebullición: 767 °C
- Características: insoluble en el agua, pero fácilmente soluble en ácidos minerales. Se encuentra en forma natural en la corteza terrestre y combinado con otros elementos como oxígeno formando óxido de cadmio, cloro formando cloruro de cadmio o sulfuro formando sulfuro o sulfato de cadmio, siendo estos solubles en agua. (Luna, 2016)

2.1.3.1.2. Fuentes y vías de exposición

El cadmio se obtiene como subproducto del tratamiento metalúrgico del zinc y del plomo a partir de sulfuro de cadmio; compuesto muy tóxico. Además de contaminar el ambiente desde su fundición y refinación, contamina también por sus múltiples aplicaciones industriales. (Ramírez, 2002).

Este metal tiene diversos usos y una vida media entre 30 y 40 años (Ramírez, 2002, pág. 57) , características que no permiten el reciclaje por lo que se acumula progresivamente en el ambiente. Los principales usos y aplicaciones del cadmio o sus compuestos se mencionan a continuación:

- Como pigmento en pinturas, esmaltes, plásticos, textiles, vidrios, tintas de impresión, caucho, lacas, etc.
- En aleación con cobre, aluminio y plata.

- En la producción de pilas de cadmio-níquel.
- Como estabilizador de termoplásticos, como el PVC.
- En fotografía, litografía y procesos de grabado.
- Como “endurecedor” de ruedas y llantas de automóvil.
- En fabricación de foto - conductores y células solares fotoeléctricas.
- El electroplatinado.
- En fabricación de “controles” de reactores nucleares.

Entre las principales fuentes de contaminación se mencionan las siguientes: la minero metalurgia de metales no ferrosos, la metalurgia del hierro y acero, la fabricación de fertilizantes fosfatados, la incineración de residuos de madera, carbón o “plásticos”, la combustión de aceite y gasolina y las aplicaciones industriales de cadmio.

2.1.3.1.3. Toxicocinética

La toxicocinética del cadmio presenta las etapas de absorción, distribución, metabolismo y excreción y eliminación (Díaz, 2014), los cuales son definidos de la siguiente manera:

- **Absorción**

El cadmio metálico y las sales de cadmio no se absorben bien, aproximadamente un 25%, 1- 10% o <1% de la dosis se absorbe tras la exposición respiratoria, oral o dérmica respectivamente. Independientemente de la vía de entrada, el cadmio se distribuye ampliamente en el organismo, concentrándose principalmente en hígado y riñón. Una vez absorbido, el cadmio se excreta muy lentamente, siendo las excreciones urinaria y fecal muy similares.

En la absorción por inhalación, una parte de estas partículas se deposita en el tracto respiratorio y los pulmones, mientras que el resto son exhaladas. Las partículas grandes

(mayores de 10 μm de diámetro) se depositan por impacto en la parte superior del tracto respiratorio, y se eliminan en gran parte por procesos mucociliares de manera que una pequeña fracción se absorbe finalmente por vía oral. Las partículas de menor tamaño (0,1 μm) tienden a penetrar en los alvéolos, y dependiendo de la solubilidad de las partículas, se absorben y distribuyen por el organismo, el tamaño de partícula determina la absorción pulmonar.

En cuanto a la exposición oral, la absorción se estima aproximadamente entre 1-10% aunque la mayor parte del cadmio pasa por el tracto digestivo sin ser absorbido. La carga corporal de hierro influye en la absorción de cadmio, es decir, las personas con bajas reservas de hierro presentan una absorción de cadmio de entre 6 y 8%, mientras que en aquellos con reservas de hierro adecuadas la absorción oscila entre 2.3 y 2.4%, lo cual parece depender de la fisiología del individuo (edad, reservas de hierro, calcio y zinc, embarazos, etc.) como de la presencia de otros iones y diversos componentes de la dieta.

- **Distribución**

El cadmio se distribuye por todo el organismo concentrándose principalmente en hígado y riñón, es independiente de la vía de exposición, pero sí se relaciona directamente con la duración de la exposición.

- **Metabolismo**

El cadmio no se biotransforma. Una vez absorbido se elimina muy lentamente, sin embargo, existen mecanismos biológicos de defensa para reducir su potencial tóxico, por lo que la toxicidad del cadmio se neutraliza por almacenamiento a largo plazo más que por biotransformación o aumento de la eliminación.

- **Excreción y eliminación**

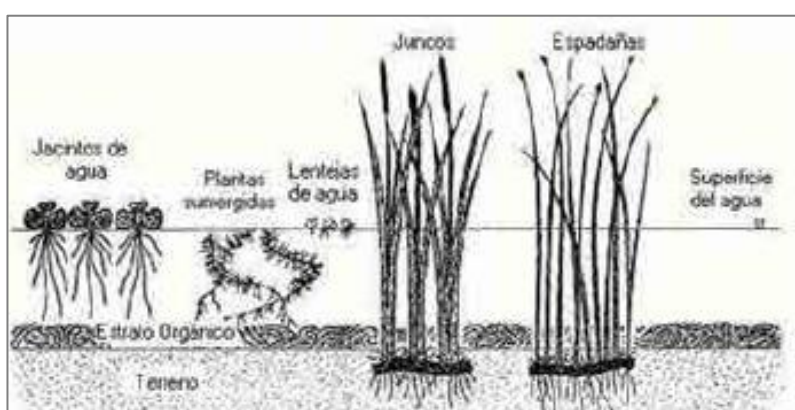
Una vez absorbido, el cadmio se excreta muy lentamente, por lo que se este elemento tiene una larga vida media La mayor parte del cadmio ingerido o inhalado y trasportado vía

mucociliar al aparato digestivo, no se absorbe debido a la escasa absorción a nivel gastrointestinal y se excreta en las heces. Tras la absorción la principal vía de eliminación de cadmio es a través de la orina, por lo que se considera que el cadmio urinario refleja la carga corporal de cadmio

2.1.4. Plantas acuáticas

Se denomina plantas acuáticas a aquellas que requieren una gran cantidad de agua en sus raíces para vivir, crecen en medios muy húmedos y completamente inundados, pero tienen los mismos requerimientos nutricionales de las plantas terrestres. Se pueden clasificar en flotantes, sumergidas y emergentes tal como se muestra en la Figura 5. Este tipo de plantas facilitan la integración paisajística de los sistemas y recrean los ecosistemas complejos donde intervienen otros elementos como insectos, anfibios y aves, regulando el sistema. Además, ofrecen la posibilidad de obtener productos valorizables con diversos fines. Entre los posibles aprovechamientos están los usos ornamentales, cama para ganado, producción de compost, producción de forrajeras, obtención de fibras para trabajos artesanales, etc. (García, 2012).

Figura 5: Principales plantas acuáticas



Fuente: EPA 2003

2.1.4.1. Plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales por medio de estanques con plantas acuáticas es de interés actual por el potencial que presenta en la depuración de estas. Algunos de estos sistemas han logrado proporcionar un tratamiento integral, es decir, no solo se remueven eficientemente material orgánico y sólidos suspendidos, sino que también se logran reducir nutrientes, sales disueltas, metales pesados y patógenos. (García, 2012, pág. 3)

De acuerdo con Brix, H. y Fernandez, J. (citado en Martelo, 2012) los procesos que tienen lugar para la depuración de contaminantes con macrófitas flotantes se dan a través de tres mecanismos

primarios:

- Filtración y sedimentación de sólidos.
- Incorporación de nutrientes en plantas y su posterior cosechado.
- Degradación de la materia orgánica por un conjunto de microorganismos facultativos asociados a las raíces de las plantas; y en los detritos del fondo de la laguna, dependiendo del diseño.

Estos sistemas de tratamiento se basan en el mantenimiento de una cobertura vegetal de macrófitas flotantes sobre la lámina de agua y se disponen a modo de estanques o canales en serie, debidamente aislados en los que discurre en afluente (...) La eficiencia en remoción de contaminantes aumenta significativamente en sistemas que operan bajo condiciones aerobias. (Martelo, 2012).

Las plantas acuáticas se dividen básicamente en tres grupos: emergentes, flotantes y sumergidas. (Pérez, 2009, pág. 7)

A. Plantas emergentes

Las plantas emergentes presentan las porciones basales bajo la superficiales del agua y desarrollan sus estructuras reproductivas en fase aérea. (Ramos, 2013, pág. 2)

Las plantas emergentes se caracterizan por su gran capacidad de fotosíntesis y crecimiento, Las especies emergentes más comunes son: tule (*Typhia sp.*), juncos (*Scirup sp.*) y carrizos (*Phragmites sp.*).

B. Plantas flotantes

Las plantas flotantes se subdividen en enraizadas y libres. (Ramos, 2013, pág. 2)

Plantas flotantes enraizadas: las hojas y estructura floral reposan sobre la superficie del agua y las raíces se encuentran adheridas al sedimento.

Plantas flotantes libres: desarrollan sus hojas en la superficie y las raíces cuelgan libremente en la columna de agua.

La productividad de las plantas flotantes enraizadas y las plantas flotantes libres es tan alta o mayor que la de las emergentes, y tiene la ventaja de que mientras éstas tienen menos tejidos respiratorios, poseen la habilidad de utilizar dióxido de carbono CO_2 foto-respirado, almacenado en los espacios llenos de aire; las más usadas en la construcción de humedales son: lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), ombligo de Venus (*Hydrocotyle ranunculoides*), y plantas de los géneros: Spirodela, Lemna, Wolffia.

C. Plantas sumergidas

Las macrófitas sumergidas alcanzan el máximo nivel de adaptación acuática al desarrollar órganos fotosintéticos y reproductivos bajo la columna de agua, incluso bajo condiciones limitadas de luz. (Ramos, 2013, pág. 2).

Las plantas sumergidas muestran menor velocidad de productividad que los otros dos tipos, esto es debido a que bajo el agua, la intensidad de la luz y la difusión del CO₂ son menores. Por otra parte, las plantas sumergidas pueden usar CO₂ de otras fuentes tales como los carbonatos, del CO₂ liberado por la actividad anaerobia de los sedimentos o a través del proceso de refijación del CO₂ del ciclo del carbono; algunas de las especies usadas en humedales construidos son: *Myriophyllum aquaticum*, *Elodea canadienses*, y *Potamogeton crispus*.

- **Ventajas**

La principal ventaja que ofrecen estos sistemas es la gran superficie de contacto que tienen sus raíces con el agua residual, ya que ésta les baña por completo, lo que permite una gran actividad depuradora de la materia orgánica por medio de los microorganismos adheridos a dicha superficie o por las propias raíces directamente.

- **Desventajas**

La principal desventaja de los sistemas con macrófitas flotantes es la capacidad limitada de acumular biomasa, por lo que se deben hacer retiros periódicos de la misma para permitir el crecimiento de las plantas, y esto encarece el proceso en lo que a mano de obra se refiere. Otra desventaja es la proliferación de mosquitos como vectores transmisores de enfermedades, lo que condiciona la ubicación de los sistemas lejos de centros poblados.

2.1.4.2. Lenteja de agua (Lemna minor L.)

- Reino: Plantae
- División: Fanerógamas
- Clase: Liliopsida
- Orden: Arel

- Familia: Lemnaceae
- Género: Lemna
- Especie: Lemna minuta

Lemna minor L. es una planta angiosperma (plantas con flores), monocotiledónea, perteneciente a la familia Lemnaceae. Su cuerpo vegetativo corresponde a una forma taloide, es decir, en la que no se diferencian el tallo y las hojas. Consiste en una estructura plana y verde y una sola raíz delgada de color blanco. El talo ha sido interpretado de diversas maneras: un tallo modificado, una hoja o como parcialmente tallo y hoja.

Su tamaño es muy reducido, alcanzando de 2 a 4 mm de longitud y 2 mm de ancho. Es una de las especies de angiospermas más pequeñas que existen en el reino de las plantas.

La lenteja de agua es una planta monoica, con flores unisexuales. Las flores masculinas están constituidas por un solo estambre y las flores femeninas consisten en un pistilo formado por un solo carpelo. El periantio está ausente. Las flores nacen de una hendidura ubicada en el borde de la hoja, dentro de una bráctea denominada espata, muy común en las especies del orden arales. El fruto contiene de 1 a 4 semillas.

La forma más común de reproducción es la asexual por gemación. En los bordes basales se desarrolla una yema pequeña que origina una planta nueva que se separa de la planta progenitora. Sin embargo, es común encontrar las plantas agregadas formando grupos de 2 a 4 individuos. (Arroyave, 2004)

Figura 6: Lenteja de agua *Lemna minor* L.



Fuente: www.aquaterralive.com, 2018

2.1.4.3. Jacinto de agua (Eichhornia crassipes)

- Reino: Plantae
- División: Magnoliophyta
- Clase: Liliopsida
- Orden: Commelinales
- Familia: Pontederiaceae
- Género: Eichhornia
- Especie: *Eichhornia crassipes*

Es una planta hidrófita libre flotadora que pertenece a la familia de las Pontederiaceae, originaria del Amazonas en Sudamérica. Su rápido y congestionado crecimiento (hasta de 60 Kg m²) ha provocado que actualmente se le considere como maleza nociva y esté atrayendo la atención global debido a que estas características provocan un fuerte impacto al ambiente, a la salud humana y al desarrollo económico.

El Jacinto de agua crece preferentemente en cuerpos de agua nutricionalmente enriquecidos, pero también es capaz de hacerlo sobre suelos húmedos, puede tolerar muy bien amplias variaciones en la concentración de nutrientes, en la temperatura y en los niveles de pH.

Es una planta libre flotadora, perene, que posee hojas de color verde brillante, espigas florales de color violeta o amarillas y una raíz fibrosa que puede llegar a medir hasta 3 metros de largo, las inflorescencias poseen entre 8 y 15 flores, los frutos son unas pequeñas cápsulas que contienen alrededor de 450 semillas, las raíces son fibrosas y poseen una gran cantidad de pequeñas hebras que funcionan como una especie de red para captar nutrientes y algunas partículas suspendidas. (Juárez, 2011)

Figura 7: Jacinto de agua *Eichhornia crassipes*



Fuente: www.fotonatura.org, 2018

2.2 Definición de términos básicos

2.2.1. Aguas residuales

Las aguas residuales pueden definirse como una combinación de los desechos líquidos procedentes de viviendas, instituciones y establecimientos comerciales e industriales, junto con las aguas subterráneas, superficiales y de lluvia que puedan agregarse a las anteriores (Vázquez, 2003). Las aguas residuales recogidas en comunidades o municipios deben ser conducidas a cuerpos de agua receptores o al mismo terreno. Se hace por tanto necesario conocer los contaminantes presentes en estas aguas con el fin de aplicar un tratamiento adecuado que evite la degradación y contaminación de los cauces (USAL, s/f).

2.2.2. Rizofiltración

La rizofiltración, es una técnica de fitorremediación que usa raíces de plantas para descontaminar agua superficial, subterránea o efluentes líquidos contaminados con metales pesados, toxinas orgánicas, entre otros elementos.

Las plantas que se utilizan con este fin se cultivan en invernaderos, con las raíces sumergidas en agua, en lugar de tierra. Cuando el sistema radicular de la planta está bien desarrollado, sus raíces se colocan en contacto con el agua o efluente a tratar. A medida que las raíces se van saturando en agua y contaminantes se van cortando y eliminando. La rizofiltración es una de las opciones que presenta mejor relación de costo-beneficio respecto a otros métodos empleados para el tratamiento de efluentes líquidos. Además, es estética y naturalmente amigable con el ambiente, por lo que se presenta como una forma de descontaminación socialmente aceptable para las comunidades circundantes y para los organismos de control respectivos. (Guevara, De la Torre, & Ana Villegas, 2009)

2.2.3. Fitotoxicidad

La fitotoxicidad es un efecto detrimental, nocivo o dañino de una sustancia química que se puede expresar en distintos órganos en la planta. Es una característica indeseable no siempre evitada en el desarrollo de un nuevo compuesto químico. La misma se manifiesta a través de síntomas como reducción del crecimiento de la planta, enrollamiento foliar, manchas, clorosis y necrosis internerval, lesiones, caída de flores y frutos y reducción de la producción. (Carmona & Gassen Dirceu y Scandiani)

2.2.4. Bioacumulación

Se entiende la acumulación de un contaminante en un organismo o comunidad biológica debido a la captación directa desde el agua y/o por ingestión. El término se emplea para

describir tanto los procesos dinámicos de la acumulación como el resultado final de la misma en el organismo. La parte de bioacumulación resultante del reparto directo del contaminante entre las fases acuosas y biológicas recibe el nombre de bioconcentración. (Figueroa & Marino, 2004).

2.2.5. Eficiencia

La eficiencia es la capacidad de disponer de algo o alguien para conseguir un determinado efecto utilizando apropiadamente los recursos o realizándolos en el menor tiempo posible (Real Academia Española, 2017).

2.2.6. Eficacia

La eficacia se define como la capacidad de lograr el efecto que se desea o espera sin tener en cuenta el uso de recursos ni la optimización del tiempo (Real Academia Española, 2017).

2.3 Marco legal

La calidad del agua residual dependerá del uso de las aguas del cuerpo receptor al cual se vierte o del uso directo de las aguas residuales tratadas.

- **Ley General de Aguas, Ley N°17752**

Artículo 7°: El Poder Ejecutivo podrá:

c) Declarar zonas de protección, en los cuales, cualquier actividad que afecte a los recursos de agua, podrá ser limitada, condicionada, o prohibida.

Artículo 10°: El Ministerio de Agricultura y Pesquería en cuanto a la conservación e incremento, y el Ministerio de Salud en lo que respecta a la preservación de los recursos hídricos, están obligados a:

a) Realizar los estudios e investigaciones que fuesen necesarios;

b) Dictar las providencias que persigan, sancionen y pongan fin a la contaminación, o pérdida de las aguas, cuidando su cumplimiento,

c) Desarrollar acción educativa y asistencia técnica permanentes para formar conciencia pública sobre la necesidad de conservar y preservar las aguas.

Artículo 17°: En estados declarados de emergencia por escasees exceso contaminación u otras causas, la Autoridad de Aguas o la Sanitaria, en su caso dictarán las disposiciones convenientes para que las aguas sean protegidas y suministradas en beneficio de la colectividad e interés general, atendiendo preferentemente el abastecimiento de las poblaciones y las necesidades primarias.

Artículo 22°: Está prohibido verter o emitir cualquier residuo, sólido, líquido o gaseoso que pueda contaminar las aguas, causando daños o poniendo en peligro la salud humana o el normal desarrollo de la flora o fauna o comprometiendo su empleo para otros usos. Podrán descargarse únicamente cuando:

a) Sean sometidos a los necesarios tratamientos previos;

b) Se compruebe que las condiciones del receptor permitan los procesos naturales de purificación;

c) Se compruebe que con su lanzamiento submarino no se causará perjuicio a otro uso.

d) En otros casos que autorice el Reglamento. La Autoridad Sanitaria dictará las providencias y aplicará las medidas necesarias para el cumplimiento de la presente disposición. Si, no obstante, la contaminación fuere inevitable, podrá llegar hasta la revocación del uso de las aguas o la prohibición o la restricción de la actividad dañina.

Artículo 32°: El otorgamiento de cualquier uso de agua está sujeto al cumplimiento de las siguientes condiciones concurrentes:

a) Que no impida la satisfacción de los requerimientos de los usos otorgados conforme a las disposiciones de la presente ley;

b) Que se compruebe que no se causará contaminación o pérdida de recursos de agua;

c) Que las aguas sean apropiadas en calidad, cantidad y oportunidad para el uso al que se destinarán;

d) Que no se alteren los usos públicos a que se refiere la presente ley; y

e) Que hayan sido aprobadas las obras de captación, alumbramiento producción o regeneración, conducción, utilización, avenamiento, medición y las demás que fuesen necesarias.

Artículo 85°: Quedan sujetas a las disposiciones específicas del presente Título y a las demás de esta Ley que les sean aplicables, la realización de estudios y la ejecución y modificación de obras destinadas a los siguientes fines:

b) Evacuación de desagüe y descarga de los afluentes, relaves y materiales sólidos provenientes de la minería, industria y de otros usos.

Artículo 122°: El que contaminare aguas superficiales o subterráneas, con daño para la salud humana, la colectividad o la flora o fauna, infringiendo alguna de las disposiciones pertinentes de la presente Ley, o a las que, para evitar la contaminación, hubiera dictado la Autoridad competente, será sancionado de acuerdo con lo dispuesto en el Artículo 274° del Código Penal, quedando obligado a reparar los daños y perjuicios ocasionados.

- **Ley General del Ambiente, Ley N°28611**

Artículo 1° Del objetivo

La presente Ley es la norma ordenadora del marco normativo legal para la gestión ambiental en el Perú. Establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país

Artículo 3° Del rol del Estado en materia ambiental

El Estado, a través de sus entidades y órganos correspondientes, diseña y aplica las políticas, normas, instrumentos, incentivos y sanciones que sean necesarios para garantizar el efectivo ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades contenidas en la presente Ley.

Artículo 11° De los lineamientos ambientales básicos de las políticas públicas

Sin perjuicio del contenido específico de la Política Nacional del Ambiente, el diseño y aplicación de las políticas públicas consideran los siguientes lineamientos:

b. La prevención de riesgos y daños ambientales, así como la prevención y el control de la contaminación ambiental, principalmente en las fuentes emisoras.

En particular, la promoción del desarrollo y uso de tecnologías, métodos, procesos y prácticas de producción, comercialización y disposición final más limpias.

Artículo 31° Del Estándar de Calidad Ambiental

31.1 El Estándar de Calidad Ambiental - ECA es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos.

Artículo 32° Del Límite Máximo Permisible

32.1 El Límite Máximo Permisible - LMP, es la medida de la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su determinación corresponde al Ministerio del Ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental. Los criterios para la determinación de la supervisión y sanción serán establecidos por dicho Ministerio."

32.2 El LMP guarda coherencia entre el nivel de protección ambiental establecido para una fuente determinada y los niveles generales que se establecen en los ECA. La implementación de estos instrumentos debe asegurar que no se exceda la capacidad.

Artículo 66° De la salud ambiental

66.1 La prevención de riesgos y daños a la salud de las personas es prioritaria en la gestión ambiental. Es responsabilidad del Estado, a través de la Autoridad de Salud y de las personas naturales y jurídicas dentro del territorio nacional, contribuir a una efectiva gestión del ambiente y de los factores que generan riesgos a la salud de las personas.

Artículo 90° Del recurso agua continental

El Estado promueve y controla el aprovechamiento sostenible de las aguas continentales a través de la gestión integrada del recurso hídrico, previniendo la afectación de su calidad ambiental y de las condiciones naturales de su entorno, como parte del ecosistema donde se encuentran; regula su asignación en función de objetivos sociales, ambientales y económicos; y promueve la inversión y participación del sector privado en el aprovechamiento sostenible del recurso.

Artículo 113° De la calidad ambiental

113.1 Toda persona natural o jurídica, pública o privada, tiene el deber de contribuir a prevenir, controlar y recuperar la calidad del ambiente y de sus componentes.

113.2 Son objetivos de la gestión ambiental en materia de calidad ambiental:

a. Preservar, conservar, mejorar y restaurar, según corresponda, la calidad del aire, el agua y los suelos y demás componentes del ambiente, identificando y controlando los factores de riesgo que la afecten.

b. Prevenir, controlar, restringir y evitar según sea el caso, actividades que generen efectos significativos, nocivos o peligrosos para el ambiente y sus componentes, en particular cuando ponen en riesgo la salud de las personas.

c. Recuperar las áreas o zonas degradadas o deterioradas por la contaminación ambiental.

d. Prevenir, controlar y mitigar los riesgos y daños ambientales procedentes de la introducción, uso, comercialización y consumo de bienes, productos, servicios o especies de flora y fauna.

e. Identificar y controlar los factores de riesgo a la calidad del ambiente y sus componentes.

g. Promover el desarrollo de la investigación científica y tecnológica, las actividades de transferencia de conocimientos y recursos, la difusión de experiencias exitosas y otros medios para el mejoramiento de la calidad ambiental.

Artículo 117° Del control de emisiones

117.1 El control de las emisiones se realiza a través de los LMP y demás instrumentos de gestión ambiental establecidos por las autoridades competentes.

117.2 La infracción de los LMP es sancionada de acuerdo con las normas correspondientes a cada autoridad sectorial competente.

Artículo 120° De la protección de la calidad de las aguas

120.1 El Estado, a través de las entidades señaladas en la Ley, está a cargo de la protección de la calidad del recurso hídrico del país.

120.2 El Estado promueve el tratamiento de las aguas residuales con fines de su reutilización, considerando como premisa la obtención de la calidad necesaria para su reuso, sin afectar la salud humana, el ambiente o las actividades en las que se reutilizarán.

Artículo 121° Del vertimiento de aguas residuales

El Estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho

vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes.

Artículo 122° Del tratamiento de residuos líquidos

122.2 El sector Vivienda, Construcción y Saneamiento es responsable de la vigilancia y sanción por el incumplimiento de LMP en los residuos líquidos domésticos, en coordinación con las autoridades sectoriales que ejercen funciones relacionadas con la descarga de efluentes en el sistema de alcantarillado público.

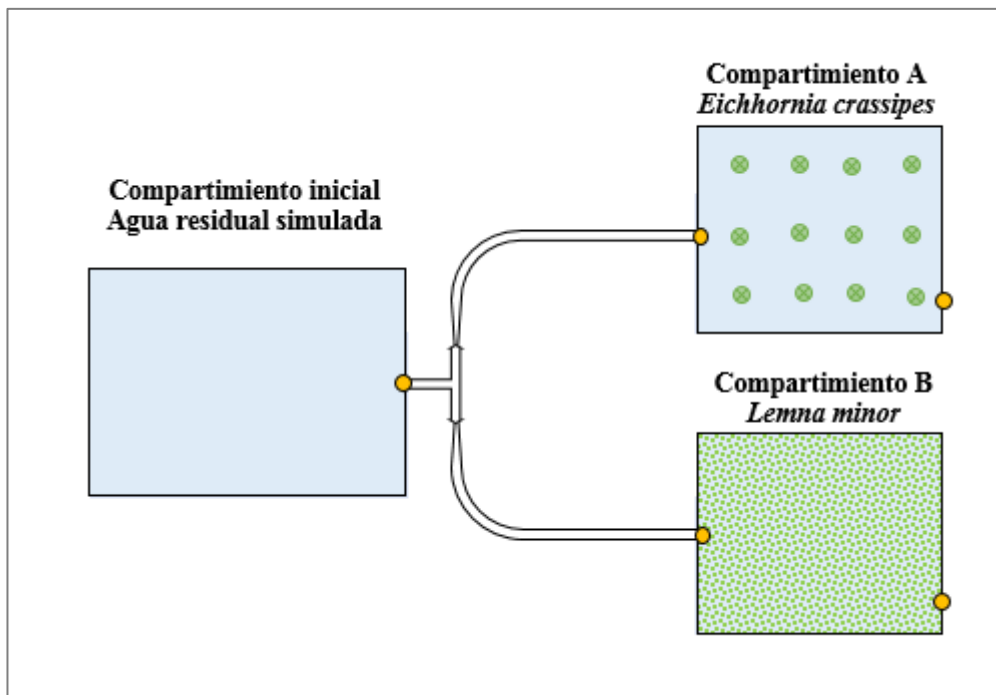
122.3 Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con lo establecido en las normas legales vigentes. El manejo de las aguas residuales o servidas de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador, a través de terceros debidamente autorizados a o a través de las entidades responsables de los servicios de saneamiento, con sujeción al marco legal vigente sobre la materia.

2.4 Descripción del sistema de tratamiento

2.4.1. Módulos de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales

Los módulos piloto del sistema de tratamiento presentan un área de aproximadamente 0.6 m^2 con un volumen de 40 litros tal como se muestra en la Figura 8, el cual fue diseñado para la presente investigación y se encuentra en el Laboratorio de Geografía y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo.

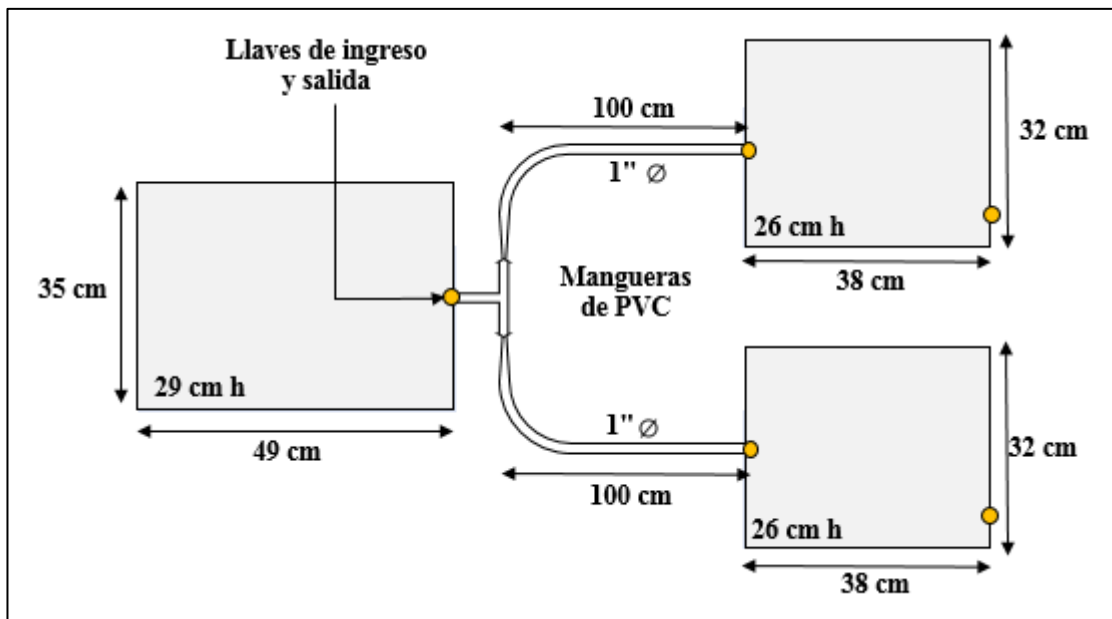
Figura 8: Diseño de sistema de tratamiento



Fuente: Elaboración propia

El diseño de humedal artificial antes mencionado consta de tres compartimientos de plástico PET conectados entre sí con manguera de PVC de 1 pulgada de diámetro; el primer compartimiento de 49x35cm y 29 cm de alto en el cual se encuentra el agua residual simulada (con presencia de cadmio) y los dos compartimientos con macrófitas flotantes consta de 38x32cm y 26 cm de alto cada uno. Adicionalmente, cuenta con válvulas de ingreso y salida de 1/2" de diámetro, la primera válvula de salida del compartimiento inicial se encuentra a 5 cm de la base, las dos válvulas de ingreso a los compartimientos de cada macrófita se encuentran a 10 cm de la base y las dos válvulas de salida de cada compartimiento a 5 cm de la base tal como se muestra en la Figura 9

Figura 9: Medidas de sistema de tratamiento



Fuente: Elaboración propia

La presente investigación se centra en evaluar la eficiencia de las especies macrófitas flotantes (*Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.*) en la remoción de cadmio en aguas residuales simuladas en laboratorio bajo un sistema de alimentación estacionario de flujo superficial. Este sistema consiste en alimentar 20 litros de agua con contenido de 2mg/l de cadmio conducidos a través de un sistema de distribución en cada módulo, cuyo periodo de retención del agua residual simulada será de dos (02) días y el periodo de ensayo será de once (11) días, el cual se encuentra dentro de los tiempos de exposición o retención al contaminante específico señalado por Sekomo, Rousseau, & Saleh, 2012.

Se analizarán dos módulos, cada módulo consta de un solo compartimiento con cada especie macrófita por donde circulará el agua residual simulada, tal como se muestra en la Figura 10.

Figura 10: Sistema de tratamiento con macrófitas flotantes



Fuente: Elaboración propia

Los análisis que se realizarán son: mediciones de pH, temperatura, conductividad eléctrica y la concentración de cadmio.

III. MÉTODO

3.1. Tipo, nivel y diseño de investigación

Para determinar el tipo, nivel y diseño de investigación se tomó como referencia los Seminarios de Investigación señalados por Supo, 2012.

3.1.1. Tipo de investigación

Los tipos de investigación de la presente tesis se encuentran clasificadas de la siguiente manera:

- Según la intervención del investigador: experimental.
- Según la planificación de la toma de datos: prospectivo, pues los datos necesarios para el estudio son recogidos a propósito de la investigación (primario), por lo que posee control del sesgo de medición.
- Según el número de ocasiones en que mide la variable de estudio: longitudinal, pues la variable de estudio es medida en dos o más ocasiones, por ello de realizar comparaciones (antes-después) son entre muestras relacionadas.
- Según el número de variables de interés: analítico, pues el análisis estadístico por lo menos es bivariado, plantea y pone a prueba la hipótesis y su nivel más básico establece la asociación entre factores.

3.1.2. Niveles de investigación

Los niveles de investigación son los siguientes:

- Relacional: pues permite relacionar la información entre las variables de estudio y sus mediciones.
- Explicativo: pues se desarrollan estudios experimentales y se basa en antecedentes investigativos.

- **Aplicativo:** Plantea intervención de ciertas especies a propósito de obtener un resultado.

3.1.3. Diseño de investigación

El diseño de investigación de la presente tesis es Experimental, pues se realiza la intervención y control de las mediciones de las variables de estudio.

En la Tabla 2 se presenta de manera resumida y comparativa el tipo, nivel y diseño de investigación del presente estudio.

Tabla 2: Tabla resumen de tipo, nivel y diseño de la investigación

Tipo	Nivel	Diseño
Experimental	Relacional	Experimental
Prospectivo	Explicativo	
Longitudinal		
Analítico	Aplicativo	

Fuente: Elaboración propia

3.2. Ámbito temporal y espacial

La presente investigación se desarrolla durante tres meses: mayo, junio y julio del año 2018 en las instalaciones de la Universidad Nacional Federico Villarreal, específicamente en el Laboratorio de Geografía y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Ambiental, Geográfica y Ecoturismo.

3.3 Variables

Las variables independientes y dependientes se definieron según el objetivo de la tesis y se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Variables de estudio

Tipo	Variables	Indicador
Independientes	- Concentración final de cadmio en agua	mg/L
Dependientes	- Grado de eficiencia de <i>Eichhornia crassipes</i> en la remoción de cadmio.	%
	- Grado de eficiencia de <i>Lemna minor L.</i> en la remoción de cadmio.	

Fuente: Elaboración propia

En la

Tabla 4 se presenta un cuadro resumen acerca de la operacionalización de variables en la cual se centra la investigación.

Tabla 4: Operacionalización de variables

Problema	Pregunta		Objetivo general	Objetivos específicos	Hipótesis principal	Hipótesis secundarias	Variables	Indicadores	Unidades
	general	derivada del problema							
Las plantas tienen la capacidad de remoción de metales pesados de aguas residuales.	¿Cuál es el grado de eficiencia del <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor L.</i> en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales?	Evaluar el grado de eficiencia de las especies <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor L.</i> en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales.	- Determinar el grado de eficiencia de <i>Eichhornia crassipes</i> en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales.	Las especies <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor L.</i> alcanzarán una eficiencia mayor a 70% en la remoción de cadmio para el tratamiento de aguas residuales industriales.	Las especies <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor L.</i> cumplen con características removedoras de metales pesados.	Concentración final de cadmio en agua	Concentración final de cadmio en agua tratada con <i>Eichhornia crassipes</i>	mg/L	
			-Determinar el grado de eficiencia de <i>Lemna minor L.</i> en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales.				Concentración final de cadmio en agua tratada con <i>Lemna minor L.</i>	mg/L	

Problema	Pregunta		Objetivo general	Objetivos específicos	Hipótesis principal	Hipótesis secundarias	Variables	Indicadores	Unidades
	general	derivada del problema							
				Analizar cambios morfológicos en <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor L.</i> en función a la exposición de cadmio en aguas residuales industriales.	El grado de eficiencia de remoción de cadmio en aguas residuales de <i>Eichhornia crassipes</i> es superior a la de <i>Lemna minor L.</i>	Grado de eficiencia de <i>Eichhornia crassipes</i> en la remoción de cadmio.	Eficiencia de <i>Eichhornia crassipes</i>	%	
					<i>Los cambios morfológicos de las especies <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor L.</i> son evidentes durante el tratamiento.</i>	Grado de eficiencia de <i>Lemna minor L.</i> en la remoción de cadmio.	Cambios morfológicos en <i>Eichhornia crassipes</i>	Tamaño, color, área cubierta	
							Eficiencia de <i>Lemna minor L.</i>	%	
							Cambios morfológicos en <i>Lemna minor L.</i>	Tamaño, color, área cubierta	
								%	

Fuente: Delgadillo et al., 2011

3.4 Población y muestra

3.4.1. Población

La población general engloba a todas las plantas acuáticas, las cuales están clasificadas en tres grupos con base en sus formas de vida: flotantes, emergentes y sumergidas, definidas en el Capítulo II.

3.4.2. Muestra

Tal como señala el título de la investigación, la eficiencia de remoción de cadmio durante el proceso de fitorremediación dependerá principalmente de la especie de planta utilizada, el estado de crecimiento de la planta y de las características del metal a remover. Por lo que las plantas que se utilizarán presentan las siguientes características (Nuñez, 2004):

- Tolerantes a altas concentraciones de metales
- Acumuladoras de metales
- Alta productividad y rápida tasa de crecimiento
- Especies locales, representativas de la comunidad natural
- Fácilmente cosechables

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, las plantas acuáticas flotantes son las seleccionadas como muestra puesto que presentan las siguientes características importantes:

- Capacidad de aumentar su biomasa en corto tiempo
- Especies de fácil adquisición
- Rendimiento considerable
- Aprovechamiento de biomasa

3.4.3. Unidad de análisis

La unidad de análisis es definida por el investigador para realizar mediciones (Supo, 2012). En la presente investigación, la unidad de análisis está definida por el agua residual simulada y tratada con *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.* utilizada en los 11 días de ensayo. Se empleó 100 ml de agua residual simulada extraída cada 2 días de cada sistema de tratamiento, sumando un total de 500 ml de agua residual simulada y tratada con *Eichhornia crassipes* y 500 ml de agua residual simulada y tratada con *Lemna minor L.*

3.5 Instrumentos y equipos

En los siguientes subcapítulos se detallan los equipos, instrumentos y materiales utilizados en la presente investigación.

3.5.1. Equipos

Medición in situ

- Balanza analítica BAMERSAC AS220/C/2
- Conductímetro HACH s/n Sension 7
- Medidor de pH digital (peachímetro) MOD PH-009 (III)

Figura 11: Equipos utilizados para la medición in situ



a) Balanza analítica utilizada para pesar cantidad correspondiente de Cd

b) Multiparámetro utilizado para la medición de la conductividad eléctrica

c) Peachímetro utilizado para la medición in situ de pH

Digestión de muestras

- Placa caliente THERMO SCIENTIFIC Type 2200
- Campana extractora THERMO SCIENTIFIC PSM Advange

Determinación de metales por Espectrometría de Absorción Atómica

- E Equipo de absorción atómica THERMO ELECTRONIC CORPORATION S SERIES
- Computadora i3 Windows 7
- SOLAAR Software for Thermo Scientific iCE 3000 Series AA Spectrometers

Análisis de la información

- Computadora i3 windows 7
- Microsoft Word (edición y recopilación de información)
- Microsoft Excel (análisis de datos)

3.5.2. Instrumentos

Diseño de sistema de tratamiento

- 3 llaves de ingreso y salida de media pulgada (1/2")
- 2 mangueras de agua de media pulgada (1/2") de diámetro y un metro (1) de largo
- 3 conectores hembra y macho respectivamente
- 2 codos de 1/2"
- 1 recipiente de PVC de 40 litros de capacidad y medidas 49x35x29cm
- 2 recipientes de PVC de 20 litros de capacidad y medidas 38x32x26cm
- Agua destilada
- Agua potable

Reactivos

- Nitrato de Cadmio $CdNO_3 \cdot 4H_2O$
- Ácido Nítrico HNO_3
- Agua destilada

Materiales de laboratorio

- Vasos precipitados de 250 ml para digestión de muestras
- Fiolas de 100 ml para análisis de muestras
- Pipetas de 5 ml, 2 ml, 1 ml y 0.5 ml
- Probetas de 100 ml
- Lunas de reloj
- Pinzas de metal

3.6 Metodología

La metodología de la presente investigación consiste en dos fases: la investigación experimental o de laboratorio y la investigación bibliográfica documentada puesto que para el

desarrollo será necesario la experimentación en donde se tendrá variables como las concentraciones de cadmio en agua, el potencial de remoción de cadmio y también los diferentes tipos de plantas acuáticas flotantes usadas para la fitorremediación. Además, se hace referencia a investigaciones realizadas anteriormente para comparar los datos finales y así obtener mejores resultados en cuanto al proceso de fitorremediación usando macrófitas flotantes.

- **Investigación experimental o de laboratorio:** Es el estudio en que se manipula ciertas variables independientes para observar los efectos en las respectivas variables dependientes, con el propósito de precisar la relación causa – efecto. Estos estudios son por lo general, considerados como los que mayor validez tienen en sus resultados.

Emplea un grupo experimental y uno de control para poder comparar los resultados. Realiza un control riguroso de las variables sometidas a experimentación por medio de procedimientos estadísticos. Provoca intencionalmente el fenómeno para observarlo con la ayuda de aparatos, equipos que permitan mayor rigor científico a los hallazgos. (Poveda, 2014)

- **Investigación bibliográfica–documental:** La investigación bibliográfica tiene el propósito de conocer, comparar, ampliar, profundizar y deducir diferentes enfoques, teorías, conceptualizaciones y criterios de diversos autores sobre una cuestión determinada, basándose en la elaboración de Proyectos, documentos (fuentes primarias), o en libros, revistas, periódicos y otras publicaciones (fuentes secundarias) (Poveda, 2014).

3.6.1. Recolección de información

Obtención de macrófitas

Las macrófitas flotantes utilizadas (*Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.*) fueron sometidas a un proceso de selección masal positiva, el cual es un método de mejoramiento de

plantas basado en la selección de individuos de una población los cuales poseen características deseables o superiores. (Saquimux, 2011)

Las macrófitas flotantes *Eichhornia crassipes* se obtuvieron del mercado de flores de Lima escogiéndose las de tamaño mediano y *Lemna minor L.* fue recolectada de las lagunas de los Pantanos de Villa en Chorrillos.

Aclimatación de las macrófitas

Eichhornia crassipes y *Lemna minor L.* fueron lavadas cuidadosamente con agua destilada para luego ser transferidas a recipientes con agua de grifo previamente reposada por un periodo de 24 horas para retirar el exceso de cloro. Se cultivó por una semana cambiando el agua regularmente (cada 48 horas). Posteriormente las macrófitas fueron trasladadas al lugar de experimentación y colocadas en los respectivos recipientes de plástico PET de 40 litros de capacidad y llenados con agua potable aproximadamente hasta un tercio de su capacidad real para que puedan crecer y desarrollarse de manera adecuada.

Agua residual simulada

Se dispuso a realizar la evaluación a 2 mg/l pues es la concentración a la que ninguna de las especies se ve afectada. Se preparó el agua residual para la presente investigación, utilizando Nitrato de Cadmio tetra hidratado $\text{CdNO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, con una concentración de 0.2744 gramos de cadmio diluidos en agua destilada a una concentración de 100 mg/l de cadmio en 1 litro de agua destilada, posteriormente se utilizó 400 ml de este patrón y se enrasó a 1 litro con agua destilada para luego agregar 19 litros de agua potable, teniendo así 20l de agua con 2 mg/l de cadmio y se dispuso en un contenedor el cual tiene conexión con los recipientes que contienen las especies a analizar.

El cálculo de dilución de la concentración inicial se realiza a través de la siguiente expresión matemática:

Ecuación 1: Cálculo de dilución

$$C_1V_1=C_2V_2$$

Proceso de fitorremediación

El proceso consiste en alimentar un volumen de 20 litros de agua con un contenido de 2 mg/l de cadmio y un pH de 7 conducidos a través de un sistema de distribución teniéndose 10 litros de agua residual simulada en cada módulo en donde se encuentran las macrófitas, el periodo de evaluación será cada dos (02) días, asimismo, el periodo de ensayo será de once (11) días.

Procesamiento de la información

Con los valores obtenidos de los análisis fisicoquímicos se procedió a la tabulación de los datos mediante la elaboración de un cuadro comparativo y gráficos de dispersión en el programa Excel con los datos obtenidos y en relación al tiempo de exposición de las plantas macrófitas y al agua contaminada con dicho metal.

3.2.4.2 Medición In situ

Como primer paso, se realizarán las mediciones in situ de los parámetros de pH, conductividad eléctrica y temperatura con los equipos mencionados anteriormente, además de observar cambios morfológicos en cada una de las especies.

3.2.4.3 Preparación de las muestras

Seguidamente, se tomará una muestra de 100 ml de cada sistema (*Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L.*) en un vaso precipitado para su evaluación. Se realizará la digestión

preliminar de metales para su posterior medición en el Equipo de Absorción Atómica. American Public Health Association; American Water Works Association; Water Pollution Control Federation (APHA, AWWA, WPCF, 1992) señala la metodología para la digestión de metales con la finalidad de reducir la interferencia de materia orgánica y convertir el metal asociado a las partículas en una forma que pueda determinarse por espectrometría de absorción atómica. Se utilizará el método de digestión menos complejo que permita alcanzar una recuperación completa y consistente, compatible con el método analítico y con el metal que se analiza. Por regla general, el ácido nítrico HNO_3 sólo es adecuado en el caso de muestras limpias o materiales que se oxidan con facilidad tal como se efectúa la presente investigación.

3.2.4.4 Digestión por ácido nítrico HNO_3

Tal como señala APHA, AWWA, WPCF, 1992, se realiza la digestión por ácido nítrico mezclando la muestra con 5ml de HNO_3 , se lleva a ebullición lenta y evaporación en un vaso precipitado de 250 ml tapado con una luna de reloj sobre una placa caliente hasta el menor volumen posible (Figura 12), siendo este entre 10 a 20 ml antes que tenga lugar una precipitación. Dado que la muestra es de agua residual simulada no es necesario añadir ácido nítrico paulatinamente durante la evaporación de la muestra.

Figura 12: Digestión de muestras



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se recoge con un poco agua destilada las paredes del vaso y se pasa a una fiola de 100 ml hasta enrasar con este líquido de enjuagado y se agita. Se procederá a la rotulación de cada fiola según la especie

3.2.4.5 Determinación de metales por Espectrometría de Absorción Atómica de Llama

En la Fotometría de Llama se mide la cantidad de luz emitida. Para determinados metales, la absorción atómica presenta una sensibilidad superior a la emisión de llama. Como cada metal tiene su propia longitud de onda de absorción característica, se utiliza como fuente luminosa una lámpara compuesta de dicho elemento; esto proporciona un método relativamente libre de interferencias espectrales o de radiación. La cantidad de energía absorbida en la llama a una longitud de onda característica es proporcional a la concentración del elemento en la muestra, en un intervalo de concentraciones limitado.

3.6.2. Preparación de patrones

Se preparan soluciones patrón de concentraciones conocidas de metal en agua con una matriz similar a la de la muestra. Para ello se utilizaron patrones a concentraciones de 0.5 mg/l, 1 mg/l y 2 mg/l de cadmio que se preparó a partir de un patrón de 100 mg/l y un blanco diluidos en 5ml de ácido nítrico HNO_3 y enrasados con agua destilada a 100 ml tal como se muestra en la Figura 13, las cuales horquillan la concentración de muestra esperada y que se encuentra dentro del intervalo de trabajo del método.

Figura 13: Patrones de cadmio utilizados



Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Condiciones instrumentales

Para el análisis de las muestras se utilizó el equipo de absorción atómica de serie **S 711756 v1,2** del Laboratorio de Geografía y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo, tal como se muestra en la Figura 14.

Figura 14: Equipo de Absorción Atómica



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5 se muestra las condiciones del espectrofotómetro para la lectura de cadmio, mientras que en la Tabla 6 y Figura 15 se muestra la curva de calibración de los estándares.

Tabla 5: Condiciones del Equipo de Absorción Atómica

	Parámetros	Característica
Generales	Modo instrumental	Llama
	Elemento	Cd
Espectrómetro	Modo medida	Absorbancia
	Longitud de onda (nm)	228.8
	Rendija (nm)	0.5
	Corriente lámpara (%)	50
	Corrección de fondo	D2

	Parámetros	Característica
Llama	Tipo de señal	Continuo
	Tiempo de medida (s)	2
	Tipo de llama	Aire – Acetileno (C ₂ H ₂)
	Toma del nebulizador (s)	4
	Flujo combustible (L/min)	0.9
	Altura de mechero (mm)	7
	Modo de calibración	Normal
Calibración	Unidades de contracción	mg/l
	Ajuste lineal	Curva segmentada
	Unidad de escala	mg/l
	Límites exceso de curvatura	-10% a + 10%

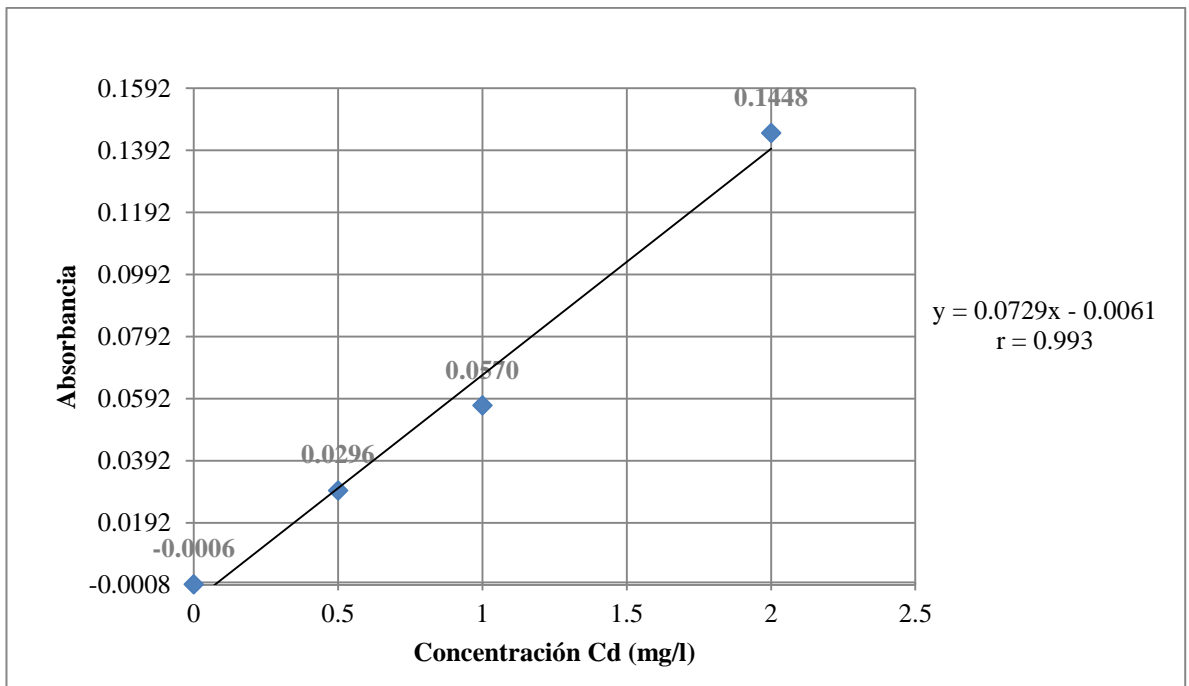
Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: Concentración vs. Absorbancia

Concentración (mg/l)	Absorbancia (nm)
0	-0.000
0.5	0.029
1	0.056
2	0.144

Fuente: Elaboración propia

Figura 15: Concentración vs Absorbancia

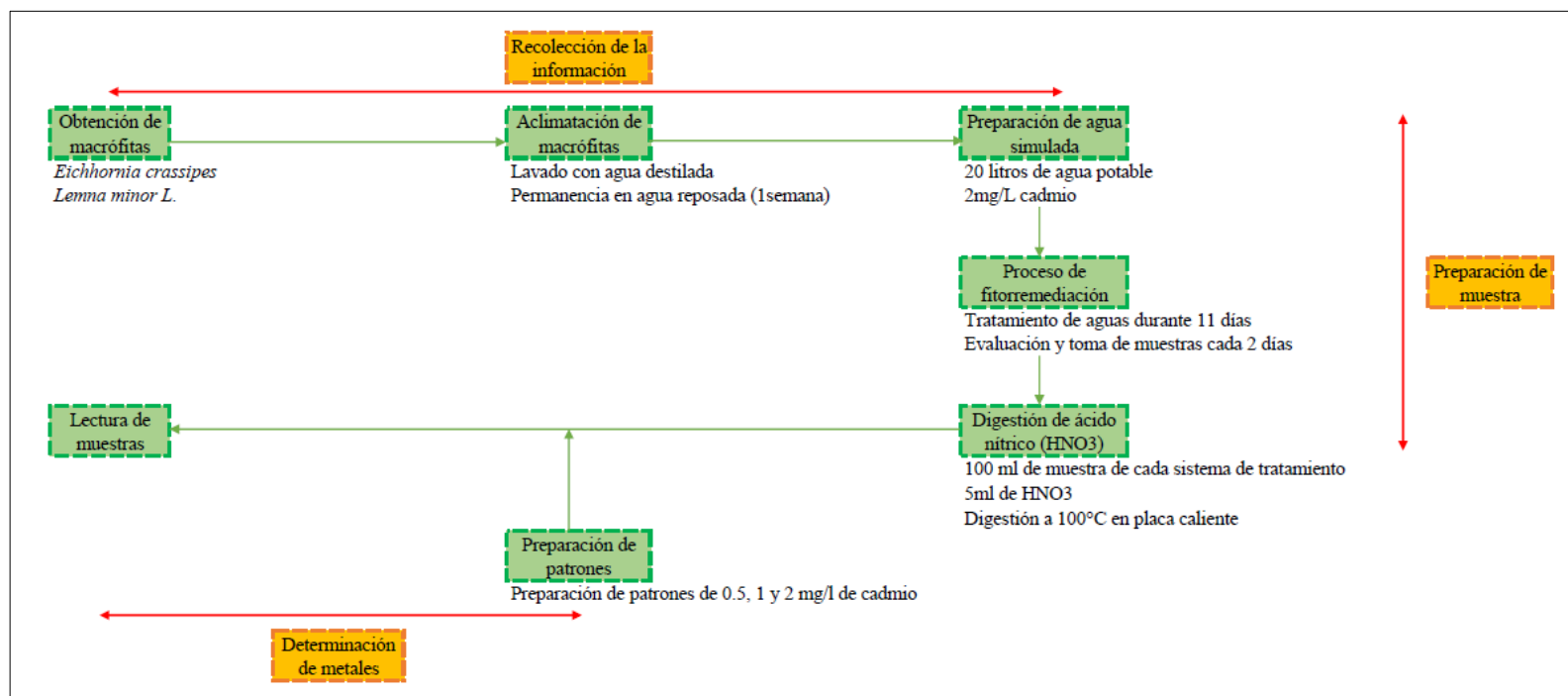


Fuente: Elaboración propia

En la

Figura 16 se muestra el procedimiento realizado desde la obtención de las especies hasta el resultado de remoción de cadmio de las especies *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor L*

Figura 16: Resumen de procedimiento de la investigación



Fuente: Elaboración propia

IV. RESULTADOS

4.1. Parámetros físicos

Se realizaron tres (03) repeticiones para la presente investigación, en la Tabla 7 se presentan los valores registrados para parámetros físicos evaluados in-situ.

Tabla 7: Resultados de Parámetros físicos

Ensayo	Valores	<i>Eichhornia crassipes</i>			<i>Lemna minor L.</i>		
		pH	C.E.	T°	pH	C.E.	T°
Ensayo 1	v0	7.3	340	23.0	7.3	340	23.0
	v1	6.6	348	22.0	7.4	335	22.0
	v2	6.7	355	21.0	7.5	352	21.0
	v3	6.8	360	20.3	7.6	355	20.0
	v4	6.8	372	21.2	7.7	358	21.3
	v5	6.9	381	19.1	7.7	361	19.0
Ensayo 2	v0	7.5	352	22.8	7.5	352	22.8
	v1	6.7	360	18.4	7.6	349	18.3
	v2	6.8	367	17.7	7.7	355	17.6
	v3	6.7	398	19.4	7.7	357	19.6
	v4	6.9	405	18.3	7.6	359	18.4
	v5	6.9	420	18.1	7.7	362	18.4
Ensayo 3	v0	7.0	393	18.2	7.0	393	18.2
	v1	6.7	441	16.4	7.2	379	16.4
	v2	6.8	474	17.8	7.5	403	16.9
	v3	6.8	477	17.8	7.6	405	17.1
	v4	6.8	479	17.8	7.7	407	17.5

	v5	6.9	480	18.3	7.8	408	18.0
Promedio		6.9	400.1	19.3	7.5	368.3	19.2

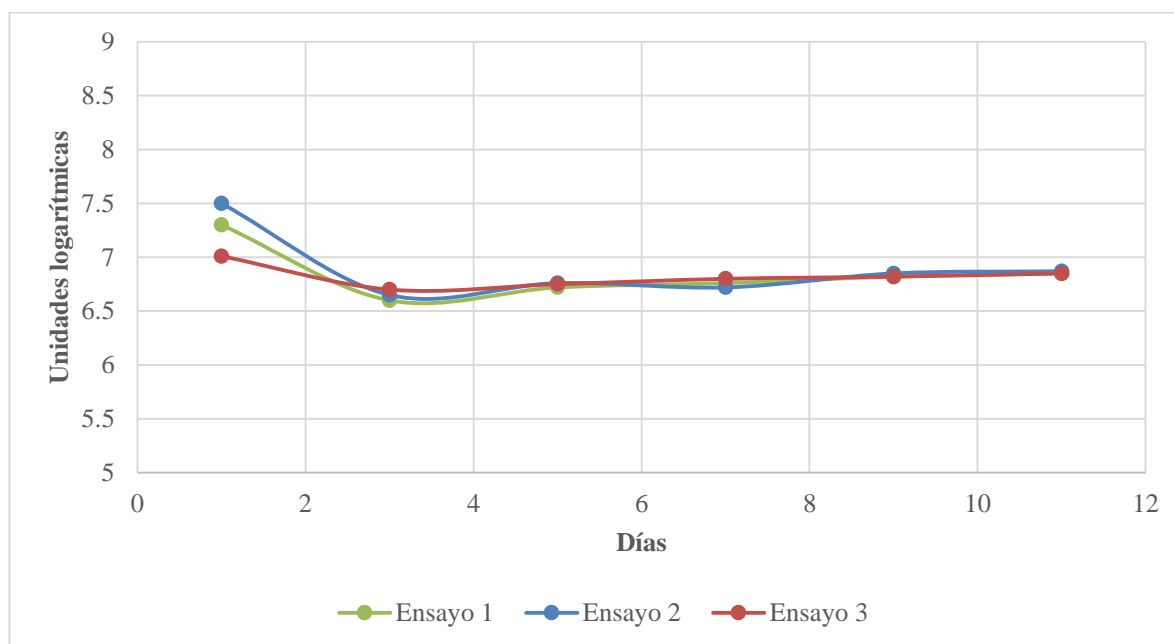
v0: Valores con los que inicia el experimento, v5: valores con los que finaliza el experimento

Fuente: Elaboración propia

Caracterización de pH

Tal como se muestra en la Figura 17, el comportamiento del pH en el agua tratada con *Eichhornia crassipes* decrece entre el día cero (medición inicial) y el día dos (primera medición) para luego aumentar progresivamente.

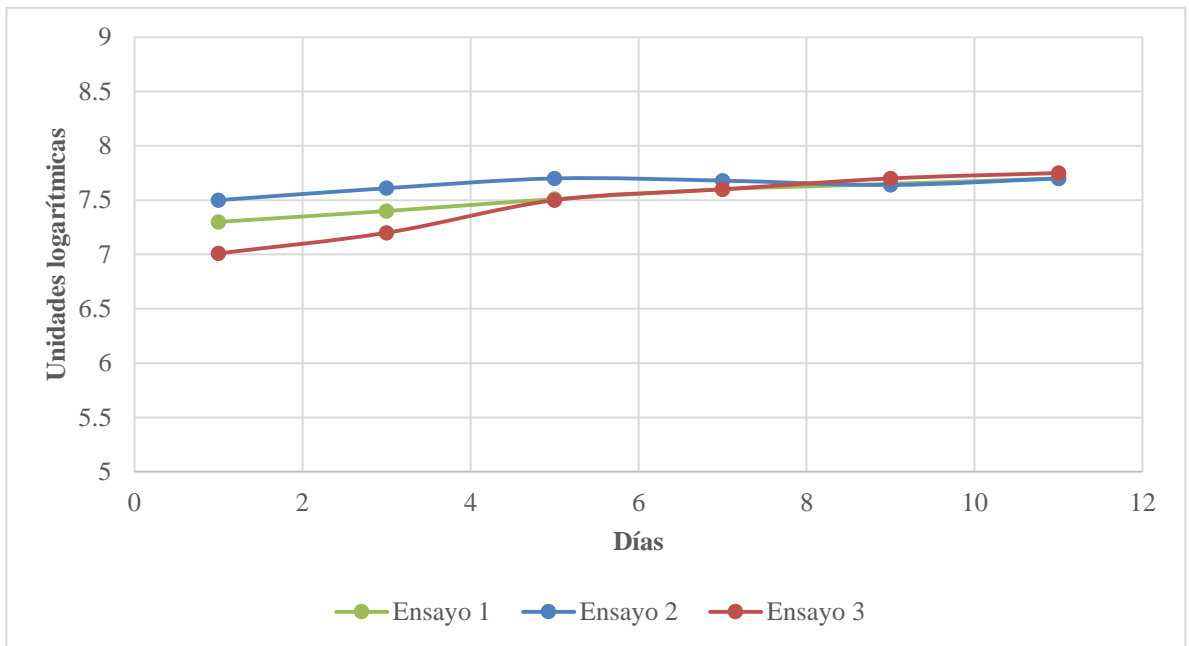
Figura 17: Valores registrados de pH para *Eichhornia crassipes*



Fuente: Elaboración propia

El pH en el agua tratada con *Lemna minor L.* se incrementa gradualmente de acuerdo con el tiempo de retención tal como se muestra en la Figura 18.

Figura 18: Valores registrados de pH para Lemna minor L.

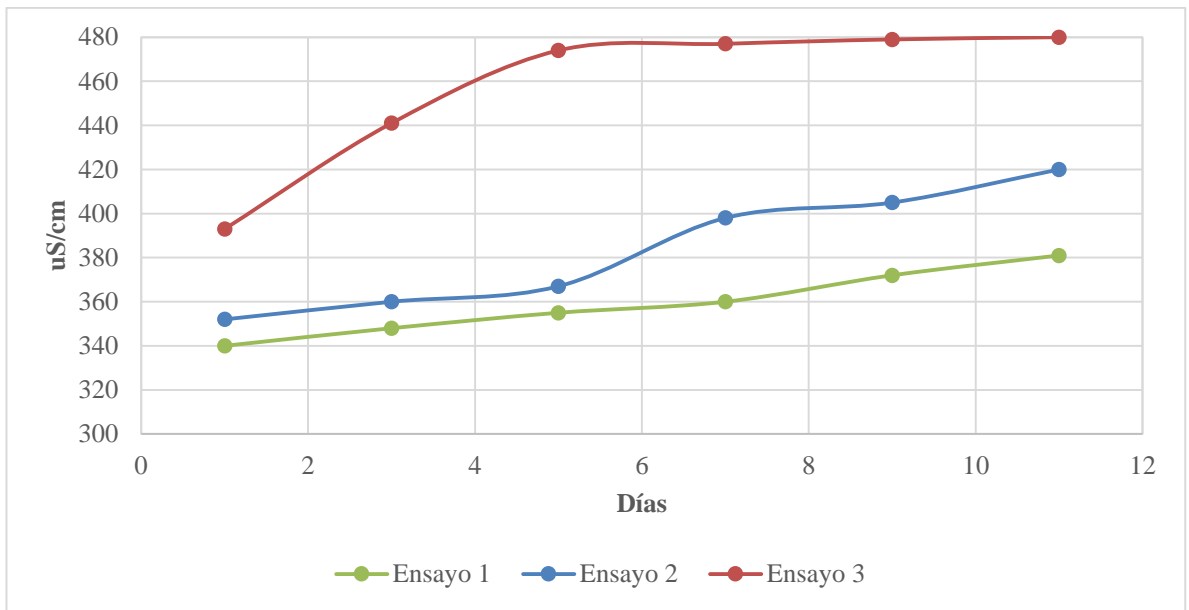


Fuente: Elaboración propia

Caracterización de Conductividad eléctrica

El comportamiento de la conductividad eléctrica en agua tratada con *Eichhornia crassipes* se incrementa gradualmente de acuerdo con el tiempo de retención, tal como se muestra en la Figura 19.

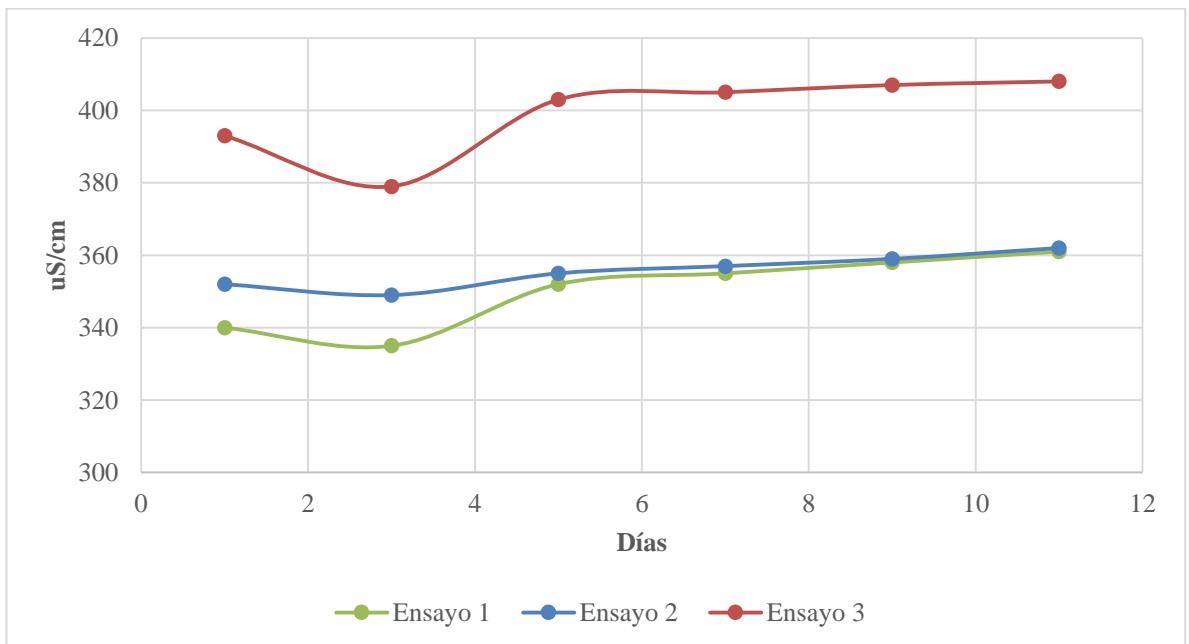
Figura 19: Valores registrados de Conductividad eléctrica para *Eichhornia crassipes*



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 20 se observa que la conductividad eléctrica en agua tratada con *Lemna minor L.* decrece, en los tres ensayos, entre el día cero (medición inicial) y el día dos (primera medición) para luego aumentar progresivamente.

Figura 20: Valores registrados de Conductividad eléctrica para *Lemna minor L.*

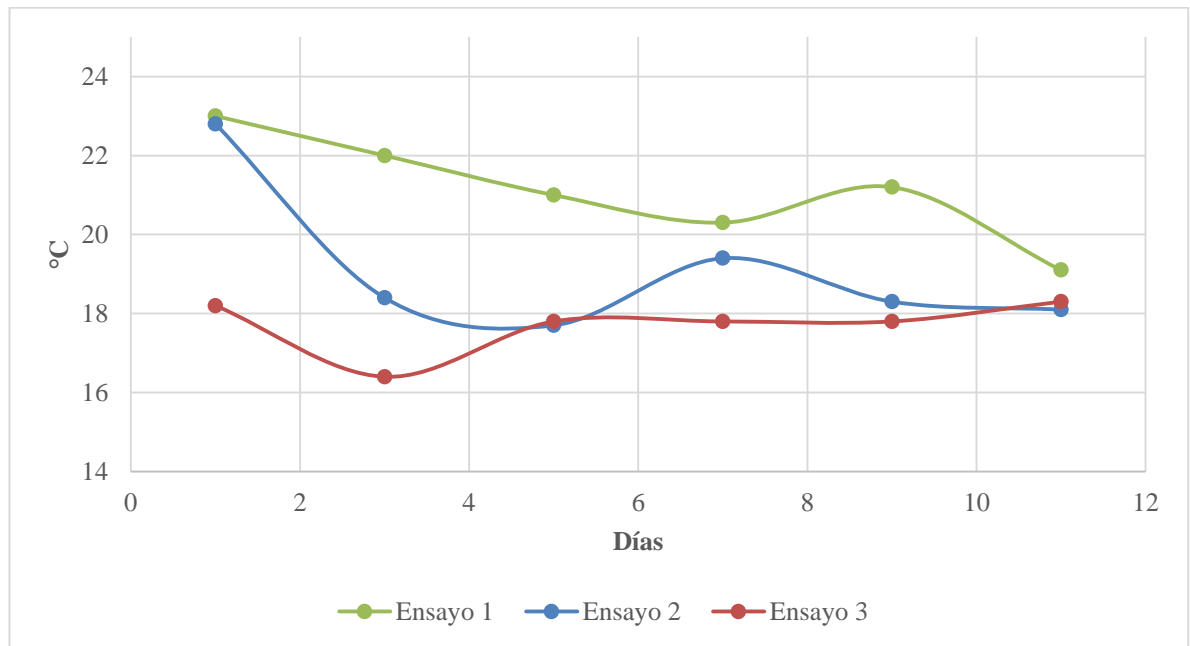


Fuente: Elaboración propia

Caracterización de la Temperatura

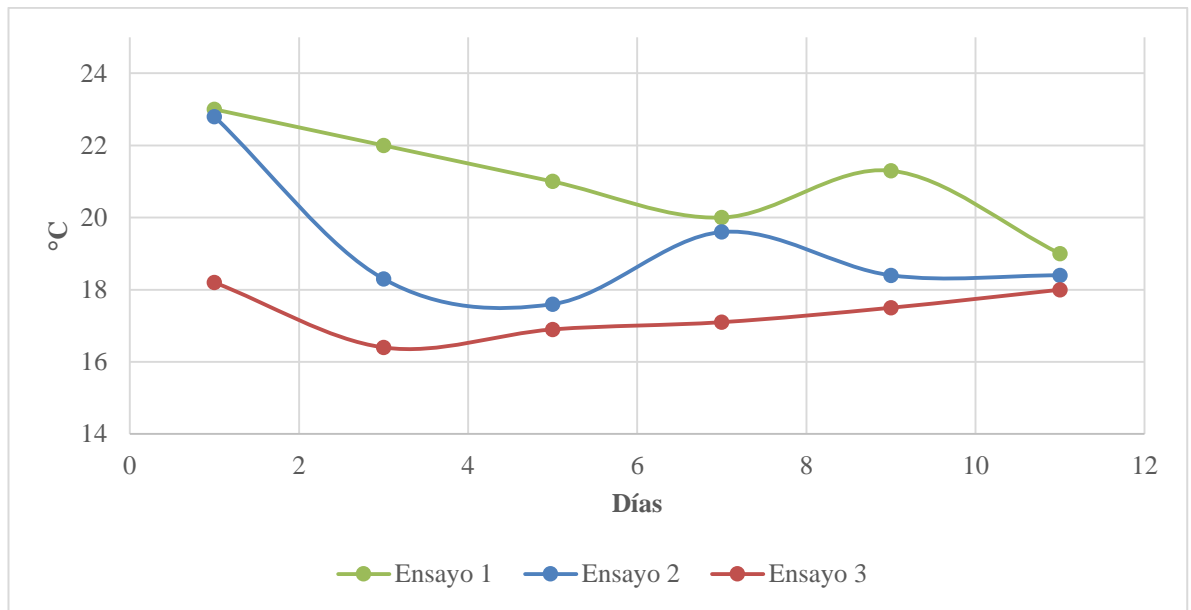
El comportamiento de la temperatura en cada compartimento varía de acuerdo con las condiciones ambientales del laboratorio y el entorno tal como se muestra en la Figura 21 y Figura 22.

Figura 21: Valores registrados de Temperatura para *Eichhornia crassipes*



Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Valores registrados de Temperatura para Lemna minor L.



Fuente: Elaboración propia

4.2. Concentración de cadmio (Cd)

Tal como se menciona en el subcapítulo 5.1, durante el tiempo de investigación las muestras de agua fueron recolectadas, digeridas y analizadas según el procedimiento señalado en el capítulo Metodología. En la Tabla 8 se presentan los resultados de cada ensayo mientras que en la Tabla 9 se muestran los valores promedios de concentración de Cadmio.

Tabla 8: Resultados de Concentración de Cadmio

Especie	Días	Ensayo 1 (mg/l)	Ensayo 2 (mg/l)	Ensayo 3 (mg/l)
Concentración inicial	v0	2	2	2
	v1	0.54	0.57	0.48
<i>Eichhornia crassipes</i>	v2	0.38	0.39	0.34
	v3	0.26	0.29	0.28

Especie	Días	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
		(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
	v4	0.25	0.26	0.21
	v5	0.21	0.19	0.18
<i>Lemna minor L.</i>	v1	1.84	1.97	1.75
	v2	1.72	1.92	1.72
	v3	1.68	1.81	1.53
	v4	1.61	1.83	1.49
	v5	1.37	1.76	1.02

v0: Concentración inicial del experimento, v5: valores con los que finaliza el experimento
Fuente: Elaboración propia

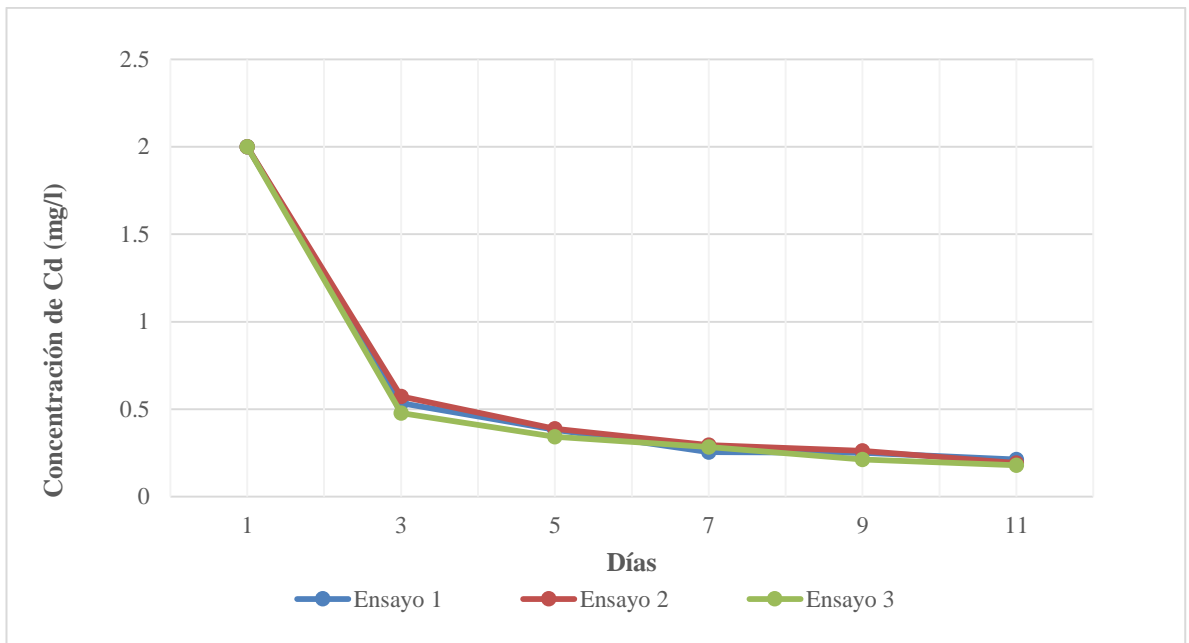
Tabla 9: Valores promedio de concentración final de Cadmio

Especie	Días	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
		(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Concentración inicial	v0	2	2	2	2
<i>Eichhornia crassipes</i>	v5	0.21	0.19	0.18	0.19
<i>Lemna minor L.</i>	v5	1.37	1.76	1.02	1.38

v0: Concentración inicial del experimento, v5: valores con los que finaliza el experimento
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 23 se muestran los valores resultantes del análisis de muestras tomadas en cada día durante las tres repeticiones en las que se observa la tendencia a disminuir durante los once (11) días de evaluación partiendo con una concentración inicial de 2 mg/l y llegando a valores de 0.21 mg/l, 0.19 mg/l y 0.18 mg/l en los Ensayos 1, 2 y 3 respectivamente, notándose una eficiencia de remoción de 83.57% para la especie *Eichhornia crassipes*.

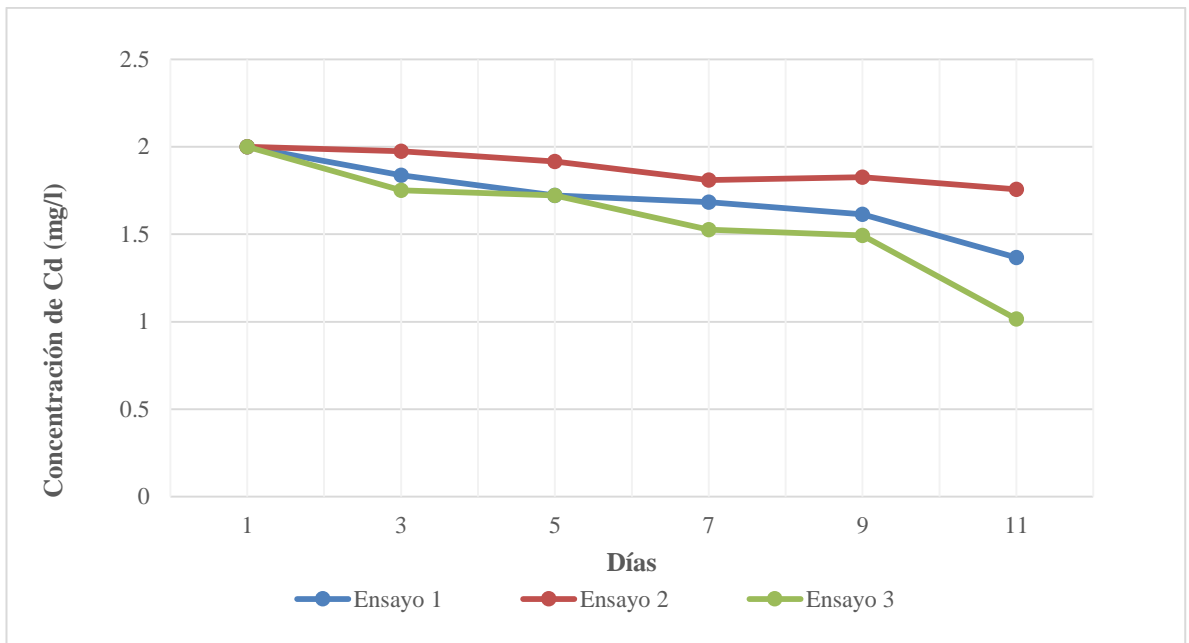
Figura 23: Concentración de cadmio (Cd) en agua tratada con *Eichhornia crassipes*



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 24 se muestran los valores resultantes del análisis de muestras tomadas en cada día durante las tres repeticiones en las que se observa la tendencia a disminuir durante los once (11) días de evaluación partiendo con una concentración inicial de 2 mg/l y llegando a valores de 1.37 mg/l, 1.76 mg/l y 1.02 mg/l en los Ensayos 1,2 y 3 respectivamente, notándose una eficiencia de remoción de 39.35% para la especie *Lemna minor L.*

Figura 24: Concentración de cadmio (Cd) en agua tratada con *Lemna minor* L.









Fuente: Elaboración propia

4.3. Cambios morfológicos

En la Tabla 10 y Tabla 11 se detallan los cambios morfológicos de *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* L. respectivamente observados durante el periodo de ensayo.



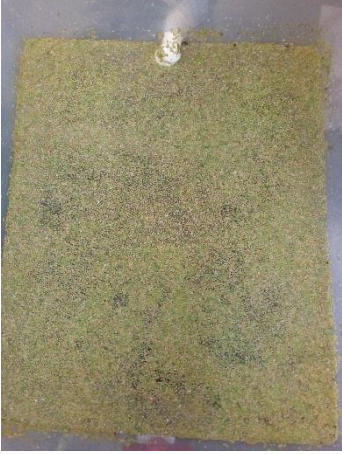
Tabla 10: Comportamiento de *Eichhornia crassipes* durante el periodo de muestreo




Días	Observaciones	Imagen
v0	<ul style="list-style-type: none"> • Acondicionamiento del sistema • Coloración verde oscuro brillante de las hojas de <i>Eichhornia crassipes</i> • Cobertura total del recipiente 	
v1	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración verde oscuro brillante de las hojas de <i>Eichhornia crassipes</i> • Crecimiento de bulbos en ciertas plantas • Cobertura total del recipiente 	
v2	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración verde oscuro brillante de las hojas de <i>Eichhornia crassipes</i> • Crecimiento de bulbos en ciertas plantas • Cobertura total del recipiente 	

Días	Observaciones	Imagen
v3	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración verde oscuro brillante de las hojas de <i>Eichhornia crassipes</i> • Cobertura total del recipiente • Agua de color amarillenta 	
v4	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración verde oscuro brillante de las hojas de <i>Eichhornia crassipes</i> • Cobertura total del recipiente • Hojas y bulbos en contacto con agua presentan color marrón • Agua color amarillenta 	
v5	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración verde oscuro opaco de las hojas de <i>Eichhornia crassipes</i> • Cobertura total del recipiente • Hojas y bulbos en contacto con agua presentan color marrón oscuro • Agua color amarillenta 	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Comportamiento de *Lemna minor* L. durante el periodo de muestreo

Días	Observaciones	Imagen
v0	<ul style="list-style-type: none"> • Acondicionamiento del sistema • Coloración verde brillante de las hojas de <i>Lemna minor</i> L. • Cobertura total del recipiente 	
v1	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración verdosa de las hojas de <i>Lemna minor</i> L. • Cobertura total del recipiente • Crecimiento de raíces en +0.2 cm. 	
v2	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración verdoso-amarillento de las hojas de <i>Lemna minor</i> L. • Cobertura total del recipiente con espacios vacíos • Tamaño de raíz se mantiene 	

Días	Observaciones	Imagen
v3	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración verdoso-amarillento oscuro de las hojas de <i>Lemna minor L.</i> • Cobertura total del recipiente con espacios vacíos • Tamaño de raíz se mantiene 	
v4	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración verdoso-amarillento claro de las hojas de <i>Lemna minor L.</i> • Cobertura total del recipiente con espacios vacíos • Tamaño de raíz se mantiene 	
v5	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración amarillento claro de las hojas de <i>Lemna minor L.</i> • Cobertura total del recipiente con espacios vacíos • Tamaño de raíz se mantiene 	

Fuente: Elaboración propia

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las plantas acuáticas flotantes (macrófitas) son especies que pueden ser utilizadas en fitorremediación tanto en humedales naturales o artificiales como en cuerpos de agua artificiales, lagos y lagunas. Sin embargo, se debe tener en consideración que no todas las especies presentan la misma capacidad fitorremediadora ni la misma capacidad de adaptación a distintos tipos de agua con acumulación de ciertos metales pesados.

Con respecto al crecimiento y adaptación de *Eichhornia crassipes*, este es continuo y homogéneo en toda su estructura, sin necesidad de nutrientes adicionales en el agua para su desarrollo, a diferencia de lo que señala Poma (2014) en cuya investigación optimiza la concentración de nutrientes para el óptimo desarrollo de esta especie, obteniendo en ambos casos resultados similares.

Cabe señalar, que la concentración de cadmio en el agua decrece en más de 70% a la concentración inicial a los dos días de iniciado el ensayo (primera medición). Los resultados obtenidos indican que la remoción de cadmio por esta macrófita fue muy alta con un porcentaje de 83.57% en 11 días de ensayo, en relación con Mishra (2008) cuya investigación señala que *Eichhornia crassipes* es más eficiente en la remoción de cadmio en aguas con concentración de 2 mg/l.

En cuanto a los cambios morfológicos presentes en *Eichhornia crassipes*, estas presentan cambio en la coloración de hojas y tallos pasando de un color verde brillante a marrón oscuro, sobretodo las hojas que estuvieron en contacto con el agua similar a lo que señala Delgado (1993) en su investigación, señalando que entre los metales analizados (cromo, zinc y cadmio) el cadmio fue el más tóxico para la planta, pues mostró necrosis y oscurecimiento de la planta cuando la concentración en la solución fue igual o mayor a 2ppm (2mg/l) y

Fernández (2013) cuya investigación señala que la acumulación de cadmio produce cambios severos en el color, engrosamiento y crecimiento longitudinal de la planta.

Por otra parte, del crecimiento y adaptación de *Lemna minor L.* se puede mencionar que su desarrollo es inferior en aguas con bajos contenidos de nutrientes como el agua potable (la cual se utilizó para el agua simulada), ya que el nitrógeno amoniacal, ion amonio y nitratos son los nutrientes preferido por esta especie tal como señala García (2012).

Con respecto al porcentaje de remoción de cadmio en agua, este fue de 39.35% en once (11) días de ensayo similar a lo que señala Caviedes (2016) en su investigación, siendo *Lemna minor L.* menos eficiente en la remoción de cadmio a diferencia de otros metales cuyo rango se encuentra entre 33-50%.

Conviene subrayar que el porcentaje de remoción de cadmio de *Lemna minor L.* para concentraciones menores de 2 mg/l es mucho mayor y eficiente tal como señalan diversos autores como Gomez (2013), Choque (2010) y Bharti (2012) en sus investigaciones.

En relación a los cambios morfológicos presentes en *Lemna minor L.*, estas presentan cambio en la coloración de hojas pasando de un color verde brillante a verde amarillento y las raíces de verde claro a blanquecino, pudiendo ser por la poca cantidad de nutrientes del agua y por la concentración inicial de cadmio.

VI. CONCLUSIONES

- Al analizar la eficiencia de remoción de cadmio en aguas residuales de las macrófitas *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Lemna minor L.* (lenteja de agua) a una concentración de 2 mg/l de cadmio, se concluye que la primera tiene un alto grado de eficiencia, diferenciándose de la segunda en 47%.
- El nivel de remoción de cadmio de *Eichhornia crassipes* varía de 2 mg/l (concentración inicial) de cadmio a una concentración final promedio de 0.19 mg/l, el cual representa una eficiencia de remoción de 83.57%, siendo esta eficiencia clasificada como muy alta superando el rango de 70 a 77% en 11 días de ensayo. Esta especie ha presentado mejor adaptación, crecimiento y desarrollo durante el ensayo, tanto en sus resultados de la evaluación de cambios morfológicos como en los valores mostrados en la remoción de cadmio en aguas, lo que la califica como una especie adecuada para ser usada en el tratamiento de aguas contaminadas con dicho metal a bajas concentraciones.
- El nivel de remoción de cadmio de *Lemna minor L.* varía de 2 mg/l (concentración inicial) de cadmio a una concentración final promedio de 1.38 mg/l, el cual representa una eficiencia de remoción de 39.35%, siendo esta eficiencia clasificada como media encontrándose en el rango de 30 a 50% en 11 días de ensayo.
- En relación con los cambios morfológicos en ambas especies, *Eichhornia crassipes* se desarrolla fácilmente en aguas con bajo contenido de nutrientes a diferencia de *Lemna minor L.*, cuyo crecimiento y desarrollo fue limitado. Se observa el impacto negativo que tienen las aguas con cadmio sobre las plantas, pues durante el ensayo pasaron de tener color verde brillante a verde oscuro y marrón en el caso de *Eichhornia crassipes* y verde amarillento en *Lemna minor L.*

VII. RECOMENDACIONES

- Fomentar el uso de macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales industriales como una alternativa económica y ecológicamente viable para las industrias del país.
- Realizar ensayos utilizando agua con nutrientes tales como nitratos y fosfatos, para determinar el comportamiento de estas especies y si estos influyen en la remoción de cadmio.
- Realizar ensayos con otros metales bioacumulables para ampliar las características bioacumuladoras de cada una de las especies, ya sea utilizando un único volumen de agua con dichos metales o por separado y a diferentes concentraciones.
- Repetir la investigación realizada a diferentes altitudes (m.s.n.m.) para determinar el comportamiento de cada especie en la remoción de cadmio u otros metales.

VIII. REFERENCIAS

- American Public Health Association; American Water Works Association; Water Pollution Control Federation. (1992). *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales* (17 ed.). (J. Bravo, Ed., & S. Diorki, Trans.) Madrid, España: Ediciones Días de Santos S.A.
- Arias, M. S. (2010). *Fitorremediación con Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales procinas*, 74. Retrieved from Informador Técnico: doi:<https://doi.org/10.23850/22565035.5>
- Arroyave, M. d. (2004). *Scielo*. Retrieved julio 10, 2017, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372004000100004&lng=en&tlng=es.
- Baird, C. (2001). *Química Ambiental*. Barcelona: Reverte.
- Bharti, S. K. (2012). Phytoremediation of the coalmine effluent. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 81(1), 36-42. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651312001170?via%3Dihub>
- Carmona, M., & Gassen Dirceu y Scandiani, M. (n.d.). *El Ganado S.R.L.* Retrieved julio 10, 2017, from <http://elganadosa.com/site/articles/problemas-de-fitototoxicidad-en-soja.pdf>
- Caviedes, D., & Ricardo, D. y. (2016). Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. *Producción+Limpia*, 11(2), 126-149.

- Choque, M. (2010). *Cuantificación de la remoción de Pb y Cd mediante la lenteja de agua Lemna minor y Azolla Azolla fuliculoides de las aguas de la bahía interior de Puno*. Tesis de posgrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- D'Alessandro, M. (2016). *Rocas y Minerales*, Cadmio. Retrieved Setiembre 15, 2017, from <http://www.rocasyminales.net>
- Delgadillo, L. A. (2011). *Scielo*. Retrieved julio 10, 2017, from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&lng=es&tlng=es.
- Delgado, M. B. (1993). Uptake of Zn, Cr and Cd by water hyacinths. *Water Resources*, 27(2), 269-272.
- Díaz, M. (2014). *Concentración de cadmio en sangre en una población laboral hospitalaria y su relación con factores asociados*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Fernández, L. E. (2013). Capacidad acumuladora de cadmio en raíces de *Scirpus californicus* expuestas a diferentes concentraciones de nitrato de cadmio en condiciones de laboratorio. *I(2)*, 114. Retrieved from <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/ECCBB/article/view/472/449>
- Figueroa, J., & Marino, M. (2004). *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales*. Barcelona: Revelte.
- Figueroa, K. S. (2015). Diseño e implementación de un humedal artificial y aireación para la remoción de materia orgánica, en la laguna artificial del jardín botánico en el municipio de Tabio, Cundinamarca. *ResearchGate*, 20.

- García, Z. (2012). *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Tesis pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería , Lima.
- Gomez, B. (2013). *Determinación de la tolerancia a plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg) de Pistia stratiotes "huama", Eichhornia crassipes "putu putu" y Lemna minor "lentejita"*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Iquitos.
- Guevara, A., De la Torre, E., & Ana Villegas, E. C. (2009). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. Retrieved julio 10, 2017, from <http://www.rlmm.org/archivos/S01/N2/RLMMArt-09S01N2-p871.pdf>
- Hurtado, A. &. (2006). *Evaluación del tratamiento de agua ácida con plomo, mediante fitorremediación*. Tesis pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería , Lima.
- Juárez, G. (2011). *Cambios en la composición del lirio acuático Eichhornia crassipes debido a su grado de madurez y a su transformación biotecnológica*. Tesis, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, México, D.F.
- Luna, R. R. (2016). *Determinación de las concentraciones de cadmio y plomo*. Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Manahan, S. E. (2006). *Introducción a la química ambiental*. Reverte.
- Martelo, J. &. (2012). *Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte*. *SciELO*, 8(15), 221-243. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v8n15/v8n15a11.pdf>

- Mishra, V. T. (2008). Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes. *Bioresource Technology*, 99(1), 7091-7097. Retrieved from www.sciencedirect.com
- Núñez, R. M. (2004). *Revista ciencia*. Retrieved from http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf
- Pérez, M. (2009). *Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango*. Tesis, Centro de Investigación de Materiales Avanzados, S.C., Chihuahua, Chihuahua.
- Poma, V. V. (2014). Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de cadmio (II) y mercurio (II) con la especie *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(3), 164-173.
- Poveda, R. (2014). *Evaluación de especies acuáticas flotantes para la fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola previamente caracterizadas en el Cantón de Ambato, provincia de Tungurahua*. Tesis, Universidad Técnica de Ambato, Ambato.
- Prieto, J., González, C. A., Román, A. D., & Prieto, F. (2009). *Redalyc*. Retrieved 2017, from <http://uabj.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>
- Ramírez, A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de Medicina, UNMSM*, 51-64.
- Ramos, C. C. (2013, Enero). *Scielo*. Retrieved 2018, from <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v4n2/v4n2a09.pdf>

Ramsar. (2006). *Manual de la Convención Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*. Suiza: Secretaria de la Convención de Ramsar.

Real Academia Española. (2017). *Real Academia Española*, Actualizado. Retrieved Mayo 2018, from <http://dle.rae.es/?id=EPQzi07>

Real Academia Española. (2017). *Real Academia Española*, Actualizado. Retrieved mayo 2018, from <http://dle.rae.es/?id=EPQzi07>

Repetto, M. (1995). *Toxicología Avanzada*. Madrid: Días de Santos.

Saquimux, F. (2011). *Manual Técnico Agrícola*. Manual, Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola, Quetzaltenango, Guatemala.

Sekomo, C. B., Rousseau, D. P., & Saleh, S. A. (2012). Heavy metal removal in duckweed and algae ponds as a polishing step for textile wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 44, 102-110.

Supo, J. (2012). *Seminarios de Investigación Científica: Metodología de la investigación para las ciencias de la salud*. Createspace Independent Pub.