# EVALUACIÓN *IN VITRO* DE LA TARUYA (*Eichhornia Crassipes)* COMO AGENTE BIORREMEDIADOR EN AGUAS CONTAMINADAS CON CROMO

**PEDRO CORTÉS SUAREZ**
**JEIRSON DANIEL FLOREZ TELLEZ**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA SECCIONAL CARTAGENA**
**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA, ARTES Y DISEÑO**
**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**
**CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**
**2017**

# EVALUACIÓN *IN VITRO* DE LA TARUYA (*Eichhornia Crassipes)* COMO AGENTE BIORREMEDIADOR EN AGUAS CONTAMINADAS CON CROMO

**PEDRO CORTÉS SUAREZ**
**JEIRSON DANIEL FLOREZ TELLEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Químico.**

**DIRECTORA**

**SONIA LILIANA GOMEZ PRADA**
Ing. de Alimentos. Esp. Evaluación sensorial alimentaria
Msc. Ciencia de la Educación

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA SECCIONAL CARTAGENA**
**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA, ARTES Y DISEÑO**
**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**
**CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**
**2017**

## DEDICATORIA

Metas que demuestran que el camino es un gran aprendizaje de cada experiencia recorrida, por ello Gratitud. A nuestros padres por existir, creer en nosotros, por su cariño, tiempo, sacrificio y su apoyo en cada momento de nuestras vidas y enseñarnos que los triunfos son grandes conquistas, cuando trabajamos en equipo y con la certeza que una buena batalla, trae sus grandes recompensas.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, Por todo lo que somos y logramos ser.

A nuestros padres  por tener fe en nosotros.

A la Ing. Sonia Gomez por sus conocimientos, pautas, aprendizajes y ejemplo de profesionalismo en la gran orientación dada en este proceso.

A la Compañía Coca Cola FEMSA por su gran apertura en la construcción de este aprendizaje.

A nuestros amigos y futuros colegas por guiarnos y apoyarnos en cada proceso.

A Nuestra Universidad San Buenaventura y en especial a todo el equipo de trabajo de la Facultad de Ingeniería, Arte y Diseño por acogernos y guiarnos con sus valores y aprendizajes en todo el camino de nuestra carrera.

A mi esposa Vanessa Salazar y Sophie Cortés por ser la motivación más grande de Pedro Cortés.

A todas las personas que prestaron su ayuda para realizar esta investigación.

**CONTENIDO**


INTRODUCCIÓN ..... 1
RESUMEN ..... 4
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN ..... 5
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 5
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ..... 6
1.3. JUSTIFICACIÓN ..... 6
1.4. OBJETIVOS ..... 7
1.4.1. Objetivo general ..... 7
1.4.2. Objetivos específicos ..... 8
2. MARCOS DE REFERENCIAS ..... 8
2.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS ..... 8
2.2. MARCO TEÓRICO ..... 9
2.2.1. Macrófitas acuáticas ..... 9
2.2.2. Propiedades de absorción de la taruya (*Eichhornia Crassipes*). ..... 11
2.2.2.1. Degradación enzimática ..... 11
2.2.2.2. Remediación microbiana ..... 12
2.2.2.3. Fitorremediación ..... 12
2.2.3. Técnicas de fitorremediación ..... 13
2.2.4. ..... Características de la taruya (*Eichhornia Crassipes)* como agente biorremediador ..... 16
2.2.5. Los sistemas intensivos ..... 21
2.2.6. Los sistemas extensivos ..... 21
2.2.7. Procesos de depuración de contaminantes por la taruya ..... 22
2.2.8. Eliminación de sólidos en suspensión ..... 22
2.2.9. Eliminación de materia orgánica ..... 23
2.2.10. Eliminación de microorganismos patógenos ..... 23
2.2.11. Eliminación de metales pesados ..... 23
2.2.12. Eliminación de Nitrógeno ..... 25
2.2.13. Eliminación de Fósforo ..... 25
2.2.14. Contaminación por metales pesados. ..... 26

2.2.15. Biorremediación de Metales Pesados: ....26
2.2.16. Cromo ....28
2.3. MARCO LEGAL ....30
2.4. MARCO CONCEPTUAL ....32
3. DISEÑO METODOLÓGICO ....34
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN ....34
3.2. ENFOQUE ADOPTADO ....34
3.3. DISEÑO ADOPTADO ....34
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA ....35
3.5. TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS. ....35
3.5.1. Fuentes primaria ....35
3.5.2. Fuentes secundarias ....35
3.6. HIPÓTESIS DE TRABAJO ....35
3.7. VARIABLES ....35
3.7.1. Dependientes ....35
3.7.2. Independientes ....35
3.8. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES ....36
3.9. PROCESAMIENTO O MODELO PARA EL ANÁLISIS DE DATOS. ....37
3.9.1. Toma de muestras ....37
3.9.2. Materiales y métodos ....38
3.9.3. Fase de adaptación ....39
3.9.4. Fase de nutrición ....41
3.9.5. Fase de intoxicación ....41
3.9.6. Reactivo ....41
3.9.7. Cálculos ....42
3.9.8. Método de control ....44
4. ANALISIS DE RESULTADOS ....45
4.1. RESULTADOS ....45
4.2. ANLISIS ESTADISTICO ....46
5. CONCLUSIONES ....50
6. RECOMENDACIONES ....51
REFERENCIAS ....52
ANEXOS ....56

## Índice de Figuras

FIGURA 1. Técnicas de fitorremediación.....14

FIGURA 2. Proceso de fitoacumulación. .....15

FIGURA 3. *Eichhornia Crassipes*.....16

FIGURA 4. Flor de *Eichhornia Crassipes* .....17

FIGURA 5. Mecanismos de interacción entre los metales pesados y microorganismo. .....27

FIGURA 6. Especies de cromo VI dependiendo del pH.....29

FIGURA 7. Planta experimental.....37

FIGURA 8. Especies en fase de adaptación.....39

FIGURA 9. .....47

## Índice de Gráficos

GRAFICO 1. pH. .....40

GRAFICO 2. Conductividad. .....40

GRAFICO 3. Probabilidad de concentración final de cromo. .....48

GRAFICO 4. Valores de ajustes. .....48

GRAFICO 5. Valores de orden. .....49

## Índice de Tablas

TABLA 1. Métodos de biorremediación. .....12

TABLA 2. Ventajas y desventajas de la fitorremediación.....15

TABLA 3. Clasificación científica de la *Eichhornia Crassipes*.....17

TABLA 4. Composición química de la Taruya (*Eichhornia Crassipes*).....18

TABLA 5. Tipos de compuestos y usos. .....29

TABLA 6. Operacionalizacion de variable.....36

TABLA 7. Cuadro de labor.....39

TABLA 8. Nutrientes del fertilizante Flourish Excel.....41

TABLA 9. Peso atómico del trióxido de cromo.....42

TABLA 10. Concentración final de cromo en mg/L. .....45

TABLA 11. Porcentaje de absorción con relación a la concentración inicial…….....46

TABLA 12. DCA.....46

# INTRODUCCIÓN

El agua es un factor indispensable para el sostenimiento de la vida, siendo fundamental para el desarrollo de los procesos biológicos que la constituyen. Actualmente, la contaminación de este recurso se ha vuelto una de las problemáticas más urgentes para el ser humano, al ser la principal causa del deterioro de las fuentes hídricas por actividades como la industria, la agricultura, la minería, entre otras. Los contaminantes del agua van desde sedimentos, residuos orgánicos, nitratos, fosfatos, hasta metales pesados producto de la extracción minera, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de efluentes industriales. La peligrosidad de los metales pesados es mayor que el resto de contaminantes al no ser química ni biológicamente degradables y su impacto ambiental depende de su capacidad de acomplejamiento y su respuesta al entorno. Su concentración en los seres vivos es acumulativa por la ingesta de agua o alimentos contaminados, generando efectos nocivos. Siendo uno de los más peligrosos el Cromo[1].

En el ambiente solo se encuentran de manera estable el Cromo (III) y el Cromo (VI), siendo esta última la especie más tóxica, debido a que atraviesa fácilmente las membranas biológicas y puede ser transportado activamente al interior de las células por medio del transportador de sulfato, actuando como mutagénico y carcinogénico en el hombre. Además el Cr VI es un fuerte agente oxidante y en presencia de materia orgánica, es reducido a Cr III; esta transformación es más rápida en ambientes ácidos. Sin embargo, niveles elevados de Cr VI en el agua pueden sobrepasar la capacidad reductora del ambiente y puede así persistir como contaminante. Este metal es producto de actividades de tipo industrial donde es de gran importancia, tales como el refinado de Cromo, la industria del cuero y calzado, industria cementera, entre otras[2].

Ahora bien, para la descontaminación de las aguas con metales pesados, se utilizan y desarrollan soluciones convencionales basadas en la precipitación química, oxido-reducción y en sistemas de intercambio iónico, tecnologías eficaces pero con costos muy elevados, lo que hace necesario el desarrollo de métodos alternativos más accesibles. La biorremediación es un método que se basa en la utilización de organismos vivientes (microorganismos, plantas, hongos o enzimas), en la eliminación de desechos, siendo fitorremediación cuando se utilizan plantas para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. Esta es una tecnología ecoamigable, más económica y efectiva en la reducción de la contaminación por medio de procesos de absorción y adsorción usados para remover, transformar o estabilizar contaminantes[3].

Las macrófitas o plantas acuáticas tienen la capacidad de depurar contaminantes a través de mecanismos como la filtración y sedimentación de sólidos, la degradación de la materia orgánica a través de las raíces o de los microorganismos que se encuentran en ellas, entre otros procesos que llevan a cabo gracias a sus características morfológicas. Específicamente en la costa caribe colombiana, la *Eichhornia Crassipes*, comúnmente llamada Taruya o Jacinto de Agua, perteneciente a las macrófitas, ofrece una alternativa como un agente útil para fitorremediación. La Taruya se considera una planta invasora, pues cubre extensas superficies en lagunas, canales y presas, afectando la supervivencia de las plantas y animales nativos[4].

Las macrófitas o plantas acuáticas tienen la capacidad de depurar contaminantes a través de mecanismos como la filtración y sedimentación de sólidos, la degradación de la materia orgánica a través de las raíces o de los microorganismos que se encuentran en ellas, entre otros procesos que llevan a cabo gracias a sus características morfológicas. Específicamente en la costa caribe colombiana, la *Eichhornia Crassipes*, comúnmente llamada Taruya o Jacinto de Agua, perteneciente a las macrófitas, ofrece una alternativa como un agente útil para fitorremediación. Aunque se le considera una planta invasora, pues cubre extensas superficies en lagunas, canales y presas, afectando la supervivencia de las plantas y animales nativos; a pesar de las muchas desventajas propias de su característica invasora tiene como usos más importante la ornamentación, la producción de biogás y la biorremediación en aguas residuales agilizando el proceso de biodegradación[5].

Entre los principales procesos de depuración que realiza esta planta, se encuentra la eliminación de sólidos en suspensión, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, patógenos y metales pesados o traza. Dicha capacidad de adsorción se debe a la presencia de grupos hidroxilo en las moléculas de la celulosa que la conforman, facilitando la formación de puentes de hidrógeno con sustancias externas[5].

Se establece que para llevar a cabo la acumulación de metales pesados, el Jacinto de Agua presenta primeramente la absorción o vinculación a la superficie biológica (biosorción), seguido del transporte lento e irreversible, controlado por difusión al interior de la célula (bioacumulación), que puede ser por difusión del ion metálico a través de la membrana celular o por transporte activo por una proteína transportadora[4].

Teniendo en cuenta, la toxicidad del Cromo (VI) y su presencia en los efluentes debido a la diversa actividad industrial y minera que se desarrolla en la región, con el presente estudio se busca la evaluación de la *Eichhornia Crassipes* como agente de biorremediación en aguas contaminadas con Cromo, estableciéndola como investigación exploratoria de gran utilidad como base para proyectos y métodos de biorremediación con esta planta[6].

En el primer capítulo se expone el problema de investigación a abordar. Se explica la gran problemática que posee el país con la contaminación de sus cuerpos de aguas con metales pesados, los daños generados al ambiente y a la salud de las personas, se da a conocer la importancia de mitigar esta problemática haciendo uso de métodos biotecnológicos entre los que encontramos la biorremediación, además se muestran las beneficios de utilizar la taruya en este proceso.

En el segundo capítulo se exponen las diferentes bases teóricas y conceptuales pertinentes al proyecto a realizar, recopiladas en el marco de referencia, el marco legal para garantizar el cumplimiento de las normativas estipulados por la ley, además se dan a conocer diferentes investigaciones que se han realizado sobre la implementación de la biorremediación y fitorremediación en procesos de depuración en ambientes contaminados.

El tercer capítulo describe la metodología de investigación utilizada para llevar a cabo la elaboración del proyecto, se orientó bajo los criterios metodológicos de enfoque, tipo y diseño de investigación, población, fuentes de recolección de información, técnicas e instrumentos, procesamiento y análisis de datos. Por último, tenemos el cuarto capítulo en donde se dan a conocer los resultados obtenidos del proyecto y la interpretación de los datos conseguidos a lo largo de la elaboración de la investigación.

## RESUMEN

Los metales pesados provenientes de la industria son una fuente de contaminación de los cuerpos de agua. En Colombia las principales acciones de riesgo relacionadas con la exposición a cromo son el refinado de cromo, la industria del cuero y calzado, industria cementera, entre otras.

La biorremediación es una manera de restaurar las condiciones de los elementos de la naturaleza. Usando la Taruya (*Eichhornia Crassipes*) como agente fitorremediador el presente proyecto pretende evaluar su efectividad en la remoción de cromo en aguas contaminadas. Esta planta que se reproduce libremente en la región del Canal del Dique, del corregimiento de pasacaballos (Cartagena-Bolívar), se usa con el fin de identificar sus propiedades y evaluar su eficacia como agente de biorremediación en aguas contaminadas con cromo ($Cr^{+6}$).

Para realizar este propósito se analizaron varias muestras de agua intencionalmente contaminadas con trióxido de cromo y se utilizaron 20 plantas en buenas condiciones para descontaminar dichas muestras; se utilizaron 10 recipientes de vidrio con 8 litros de agua potable, adicionando trióxido de Cromo. Durante 17 días, se llevaron a cabo tres fases: adaptación, nutrición e intoxicación con la solución de cromo, monitoreando el pH y la conductividad del agua. Se determinó la concentración de Cromo en cada recipiente verificando su variación.

La *Eichhornia Crassipes* demostró su eficiencia en la remoción del metal pesado, al observar que la necrosis en las hojas durante la fase final confirmó la absorción de Cromo y se cuantificó con un porcentaje promedio de absorción con relación a la concentración inicial.



Palabras clave: Taruya, Biorremediación, Contaminación.

# EVALUACION *IN VITRO* DE LA TARUYA (*Eichhornia Crassipes)* COMO AGENTE BIORREMEDIADOR EN AGUAS CONTAMINADAS CON CROMO

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es un recurso indispensable para la vida y una necesidad prioritaria de la salud, por eso la contaminación hídrica es uno de los factores más preocupantes del ser humano. El tema del agua ha cobrado singular importancia, debido a la propagación de diversos estudios con respecto a la cantidad y calidad de líquidos del planeta, en donde los resultados de estos trabajos dan a conocer que la sociedad está expuesta a una crisis mundial del agua. Se prevé que en 2050 la demanda mundial de agua haya aumentado un 55%, debido principalmente a demandas relacionadas con la creciente urbanización en los países en desarrollo (OECD, 2012a). Las ciudades tendrán que ir más lejos o perforar más hondo para encontrar agua, o tendrán que depender de soluciones innovadoras o de tecnologías avanzadas para satisfacer sus necesidades hídricas[6].

Existen varias fuentes de contaminación hídrica a causa de actividades domésticas, industriales o agrícolas. Ríos y canales son contaminados por los desechos del alcantarillado, residuos industriales, detergentes y pesticidas que se escurren en tierras agrícolas. Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad alta. Son en general tóxicos para los seres humanos y entre los más susceptibles de presentarse en el agua destacamos: Mercurio, Cadmio, Níquel, Cobre, Plomo y Cromo[7].

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas. En general esto puede ocurrir durante la extracción minera, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de efluentes industriales y emisiones vehiculares. La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser química ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años. Además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros, por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación[8].

Cada metal y cada elemento químico contaminante tienen un mecanismo de acción y un lugar de acumulación preferido. Los daños en si son muy diversos dependiendo de cada metal, pero en general se puede decir que hay lesión celular como por

ejemplo el cromo disuelto en el agua puede disminuir su cantidad de oxígeno y provocar daños a la salud al ser cancerígeno y generar mutaciones en las células[9].

En Colombia la exposición al cromo es principalmente de origen industrial. Las principales actividades de riesgo relacionadas con la exposición a cromo son el refinado de cromo, la industria del cuero y calzado, industria cementera, artes gráficas, entre otras. Una de las fuentes frecuentes de exposición al cromo son las fábricas de curtiembres, que comprenden la manipulación de pieles animales y su modificación con fines industriales. Se calcula que en el país existen 800 empresas con esta finalidad, dentro de las cuales los proceso de manipulación implican actividades artesanales, con pobre protección e inadecuada destinación de residuos, lo cual aumenta el riesgo de exposición directa e indirecta a cromo en el contexto ocupacional y paraocupacional[10].

Diferentes estudios reportados en la literatura colombiana se han encargado de describir los efectos de toxicidad del cromo total sobre plantas acuáticas, sin embargo son pocos los estudios relevantes que evalúan la exposición directa en humanos. El cromo se encuentra en diferentes grados de oxidación, siendo el cromo VI la forma más tóxica, produciendo efectos cancerígenos, genotóxicos, entre otros, los cuales han sido pobremente estudiados en nuestro país[10].

## 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo evaluar la taruya (*Eichhornia Crassipes*) para utilizarla en la biorremediación de aguas contaminadas con cromo?

## 1.3. JUSTIFICACIÓN

El cromo es un metal altamente contaminante y cuyas consecuencias al ser ingerido por algún organismo complejo son nocivas. Los cuerpos de agua contaminados con este metal representan un inminente riesgo para la salud de las comunidades que consumen de estas o de los peces que la habitan; para poder descontaminar las aguas de los metales pesados se han investigado y utilizado tecnologías convencionales, las cuales pueden ser eficientes pero generalmente tienen costos elevados tanto en construcción como en operación por consiguiente lo idóneo es desarrollar nuevos métodos alternativos[2].

La biorremediación es un método que se basan en la utilización de organismos vivientes (hongos, bacterias, plantas o algún otro microorganismo o sus subproductos como enzimas), en la eliminación de desechos en ambientes contaminados, de manera que se puedan restaurar las condiciones naturales del mismo. El tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados utilizando plantas es otra línea de este método, la cual se llama fitorremediación en la cual la

planta asimila estos metales para ser después separados, o en otros casos los compuestos pueden ser neutralizados químicamente por los procesos de síntesis de la propia planta o volatizados[11].

Utilizar procesos naturales ayudan a que exista un equilibrio sostenible en las afectaciones naturales que son causadas por agentes contaminantes, externo al equilibrio natural de cualquier ecosistema, de allí que la taruya al ser una planta invasora que genera una gran cantidad de biomasa que produce, reduce la cantidad de luz que llega al interior de la masa de agua, además, al descomponerse disminuye drásticamente los niveles de oxígeno disuelto por lo cual la convierte en una amenaza de la diversidad nativa, la economía y/o salud humana[12].

Con la utilización de esta planta antes mencionada en el proceso de fitorremediación se le daría gran importancia a una especie que se considera invasora, pero que al descubrir sus múltiples características, como agente biorremediador, esta investigación es predecesora de muchas otras posibles ya que abre las puertas a proyectos relacionados a la biorremediación de cuerpos acuáticos por medio de la taruya y procesos altamente naturales que ayudaría a procesos industriales y de calidad con componentes o procesos propios de la naturaleza[2].

Este proyecto está acorde con los lineamientos del Grupo de Investigación de las Ciencias de las Ingenierías (GICI), acoplándose a la línea temática de bioprocesos y medio ambiente buscando dar soluciones atractivas tanto ambientales como económicas a la problemática ingenieril que tiene el sector industrial a nivel local, nacional e internacional, propiamente en las áreas de química y ambiente. Además asumir la investigación como un proceso continuo, permanente y sistemático, sustentado en la capacidad crítica, la interpretación y el debate académico interno y externo de sus resultados. Esto lo realiza tanto desde la investigación formativa como desde la básica y aplicada, así como lo indica el PEB[13].

## 1.4. OBJETIVOS

### 1.4.1. Objetivo general

Evaluar la taruya *(Eichhornia crassipes)* como agente de biorremediación en aguas contaminadas con cromo.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar las características de la taruya *(Eichhornia crassipes)* como agente biorremediador.

- Determinar las propiedades de la taruya *(Eichhornia crassipes)* de absorción.

- Evaluar la eficiencia de absorción de la taruya *(Eichhornia crassipes)* en aguas contaminadas con cromo.

## 2. MARCOS DE REFERENCIAS

### 2.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Zumárraga, D. [2], en el 2010 desarrolló una investigación para optar al título de ingeniera en biotecnología, titulado "Biorremoción de Cromo (Cromo Total y Cromo VI) en Agua Sintética por dos Inóculos Bacterianos Nativos Compuestos, a Escala de Laboratorio", el objetivo general de esta investigación fue evaluar la Biorremoción de Cromo en agua sintética por dos inóculos bacterianos nativos compuestos, a escala de laboratorio. Esta investigación concluye que los consorcios bacterianos nativos compuestos I 5 y M 3 remueven concentraciones de Cr VI en un porcentaje de 98% y cromo total para I 5 un 70% y para M 3 23% de una concentración inicial de 10 mg.L-1, en condiciones de laboratorio.

Así mismo, Jumbo, M. y Flores, E. [14], en el 2012, realizaron una investigación para optar al título de ingeniero ambiental, titulado "Fitorremediación Mediante el uso de dos Especies Vegetales *lemna minor* (*lenteja de agua)* y *Eichhornia crassipes* (*Jacinto de agua*) en Aguas Residuales Producto de la Actividad Minera", el objetivo general de esta investigación fue disminuir la concentración de sales de mercurio mediante plantas que actúan como bioacumuladores de los mismos. En esta investigación ultiman que la capacidad de absorción de las macrófitas acuáticas al mercurio fue del 29,5% por lo que afirman que es eficiente para remover este elemento del agua, lo cual es muy provechoso aplicarlo en la actividad minera o cualquier otra actividad por su bajo costo.

Asprilla, N. [15], en el 2013, elaboró una investigación para optar al título de magister en desarrollo sostenible y desarrollo, titulado "Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie *vetiver* (*vetiveria zizainodes*)", el objetivo general de esta investigación fue el del Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver (vetiveria zizainodes). En esta investigación se pudo concluir que

la especie *Vetiveria zizainoides* es una planta detoxificante, apropiada para tolerar y remover altas concentraciones de mercurio en condiciones controladas y estáticas, la especie pudo sobrevivir en un ambiente acuático estático sin ningún tipo de nutriente y sin recambio de agua gracias a los mecanismos eco-fisiológicos y moleculares de la misma y lo que la convierte en un nuevo objeto de investigación.

Lizcano, M. [16], en el 2004, desarrollo una investigación para optar al título especialista en química ambiental, titulado “Estudio de la biorremediación como una alternativa en la mitigación de la contaminación ambiental”, el objetivo general de esta investigación fue el estudio de la biorremediación como una alternativa en la mitigación de la contaminación ambiental. En la investigación se concluyó que se debe integrar el conocimiento de las vías degradativas y su regulación para obtener cepas degradadoras mucho más eficientes que las que podamos encontrar autóctonamente. Y por qué no modificar estas cepas para que tengan buenos mecanismos de quimiotaxis específicos y productoras de biosurfactantes para aumentar la biodisponibilidad. Así se podrían utilizar cepas específicas para cada contaminante disminuyendo mucho tiempo la degradación natural.

Cuartas, D. [17], en el 2012, realizo una investigación para optar por el título de magister en ecotecnologia, titulado “Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible”, el objetivo general de esta investigación fue la de evaluar la efectividad de la biorremediación en la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos generados en una estación de servicio de combustible. Se concluyó que no existen diferencias significativas entre la estrategia de bioaumentación y la estrategia de bioestimulación, para el tratamiento de los sedimentos contaminados con hidrocarburos, producidos por la estación de servicio, ambas estrategias lograron efectos positivos en la reducción de hidrocarburos totales de petróleo.

## 2.2. MARCO TEÓRICO

### 2.2.1. Macrófitas acuáticas

Las Macrófitas acuáticas son vegetales de talla visible que crecen en los humedales. Comprenden un variado grupo de plantas entre las cuales se destacan: el Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*), la Salvinia (*Salvinia Spp*), la lenteja de agua (*Lemna Spp*), la lechuga de agua (*Pistia Strartiotes*), entre otras. Las macrófitas tienen la capacidad de depurar contaminantes a través de mecanismos como la filtración y sedimentación de sólidos, la incorporación de nutrientes, la degradación de la materia orgánica a través de las raíces o de los microorganismos que se

encuentran en ellas, la nitrificación y desnitrificación, entre otros procesos que llevan a cabo gracias a sus características morfológicas[4].

Con la evolución de los organismos vegetales, algunas especies pasaron a ser plantas superiores con mecanismos sofisticados de adaptación al ambiente terrestre y a los humedales naturales. Las plantas que normalmente crecen en los humedales naturales pueden localizarse entre las áreas permanentemente inundadas y las terrestres circundantes al humedal. Las características de la zona acuática determinan el desarrollo adaptativo de la planta; así, en el humedal se distinguen dos grupos de plantas, los hidrofitos o plantas acuáticas estrictas y los higrofitos terrestres[18].

#### 2.2.1.1. Higrófitos terrestres

Se le llaman Higrófitos a aquellas plantas que sobreviven en ambientes terrestres húmedos. No son plantas acuáticas pero muestran un grado de adaptación morfológica y fisiológica a condiciones de humedad inferior a saturación por espacios. No sobreviven en terrenos secos y algunas especies pueden desarrollar tolerancia a la contaminación, como los Juncos (*Scirpus holoschoenus*)[18].

#### 2.2.1.2. Plantas estrictas: hidrófitos

Los hidrófitos son plantas que viven en el agua, que han desarrollado características de adaptación a los humedales. Los gases más importantes en la fisiología de las plantas son el oxígeno y el dióxido de carbono, pero la proporciones de estos componentes son muy diferentes en los medios acuáticos y más aún si se encuentran contaminados, es por eso que los hidrofitos desarrollaron mecanismos de adaptación a un medio con amplia disponibilidad hídrica pero con poco oxígeno, teniendo en cuenta que a mayor contaminación, menos oxigenación[18].

A diferencia de las plantas terrestres, las plantas acuáticas muestran epidermis muy delgadas, a fin de reducir la resistencia al paso de gases, agua y nutrientes, y posee tejidos con un gran desarrollo de los espacios intercelulares que da lugar a una red de conductos huecos en los que almacena y circula aire con oxígeno para facilitar la difusión de gases entre los órganos de la planta [4].

El lugar donde se sitúan los organismos vegetales flotantes y la forma como se desarrollan da lugar a tres tipos de plantas acuáticas estrictas: las plantas acuáticas sumergidas, las anfibias o emergentes y las flotantes[4].

#### 2.2.1.2.1. Plantas emergentes

Permanecen en el agua durante las primeras fases de desarrollo y emergen en la fase reproductora. Tienen una parte de su estructura vegetativa dentro del agua y otra parte fuera. También son llamadas helófitas, entre las cuales se encuentran las eneas (*Typha Domingensis)*, la *Typha Angustifolia*, la caña común o *Phragmites Australis*, entre otras. Actúan como filtro en los procesos de floculación y sedimentación que se llevan a cabo mayormente en los humedales artificiales, además, oxigenan el agua circundante en la rizósfera y sirven de soporte de microorganismos con la superficie de sus órganos sumergidos[18].

#### 2.2.1.2.2. Plantas sumergidas

Las plantas sumergidas pueden o no estar arraigadas en el fondo del humedal. Se desarrollan en la columna de agua y mantienen sus órganos vegetativos por debajo del agua, lo cual les brinda un importante efecto oxigenador dentro del humedal. Entre estas se destaca el ranúnculo de agua (*Ranunculus Aquatilis*) y el *Patomogeton*[18].

#### 2.2.1.2.3. Plantas flotantes

Existen dos tipos de plantas flotantes; las que presentan raíces suspendidas en el agua (como la Lenteja de agua o *Lemna Minor*) y las que se encuentran enraizadas en el fondo del humedal, estas últimas por lo general crecen en humedales de poca profundidad, tienen sus raíces ancladas al suelo fangoso y sus hojas permanecen flotando sobre la superficie, un ejemplo de esta especie es el Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*). Las características principales de las plantas flotantes son actuar como depuradores del humedal y proporcionar sombreo para dificultar el crecimiento de algas[18].

### 2.2.2. Propiedades de absorción de la taruya (*Eichhornia Crassipes*).

En los procesos de biorremediación por lo general se realizan mezclas de microorganismos, algas y plantas genéticamente modificadas para eliminar o neutralizar los contaminantes del suelo o del agua. De acuerdo a lo anterior, existen tres métodos de biorremediación: la degradación enzimática, la remediación microbiana y la fitorremediación. Siendo este último el proceso que realiza el Jacinto de agua [19].

#### 2.2.2.1. Degradación enzimática

Consiste en agregar enzimas al sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Estas enzimas catalizan las reacciones bioquímicas y actúan

sobre sustratos como proteínas, grasas o hidratos de carbono, convirtiéndolos en moléculas no toxica [20].

#### 2.2.2.2. Remediación microbiana

En la remediación microbiana se usan microorganismos directamente en el foco de la contaminación. Los microorganismos utilizados en biorremediación pueden ser los ya existentes en el sitio contaminado o pueden provenir de otros ecosistemas. La descontaminación se produce debido a la capacidad natural que tienen ciertos organismos de transformar moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas, que resultan menos toxicas [21].

Existen metales pesados como uranio, cadmio y mercurio que no son biodegradables, pero este tipo de microorganismos (sean hongos o bacterias) pueden concentrarlos para su fácil eliminación. Mientras que existen otros elementos que si pueden degradar fácilmente; como lo son el benceno, el petróleo, acetona, pesticidas, herbicidas, alcoholes, entre otros[22].

#### 2.2.2.3. Fitorremediación

La fitorremediación comprende un conjunto de procesos de absorción y adsorción realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas, que tienen como objetivo disminuir in situ o ex situ la concentración de diversos compuestos. Este método de biorremediación utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes[3].

Gracias al constante estudio del tema, se ha identificado una amplia variedad de especies empleadas para este fin; como es el caso de la *Eichhornia Crassipes*. A este tipo de especies se les llama híper-acumuladoras, por su gran capacidad para acumular metales pesados. Las plantas vinculadas al proceso de fitorremediación son capaces de acumular al menos 100 µg/g (0.01 % peso seco) de Cd y As; 1000 µg/g (0.1 % peso seco) de Co, Cu, Cr, Ni y Pb; y 10 000 µg/g (1.0 % peso seco) de Mn [3].

Tabla 1. Métodos de biorremediación.

| Degradación enzimática | Remediación microbiana | Fitorremediación |
|---|---|---|
| Agregación de enzimas | Microorganismos (hongos o bacterias) | Plantas acuáticas |

Fuente: autores, (2016).

En comparación con los procesos intensivos de tratamiento de aguas residuales, la fitorremediación ofrece ventajas relacionadas con el bajo costo en tecnologías y con el control de recursos, además optimiza el tiempo de degradación de los contaminantes y le brinda un uso más positivo a las plantas catalogadas como especies invasoras [23].

Según el tipo de planta y el agente contaminante, la fitorremediación puede producirse por:

- Acumulación del contaminante (metales pesados) en las partes aéreas de la planta.

- Absorción, precipitación, y concentración del contaminante en las raíces.

- Desarrollo de bacterias y hongos que crecen en las raíces y degradan contaminantes (derivados del petróleo, benceno).

- Reducción de la movilidad del contaminante para impedir la contaminación de aguas subterráneas (lagunas de desechos de yacimientos mineros) o del aire.

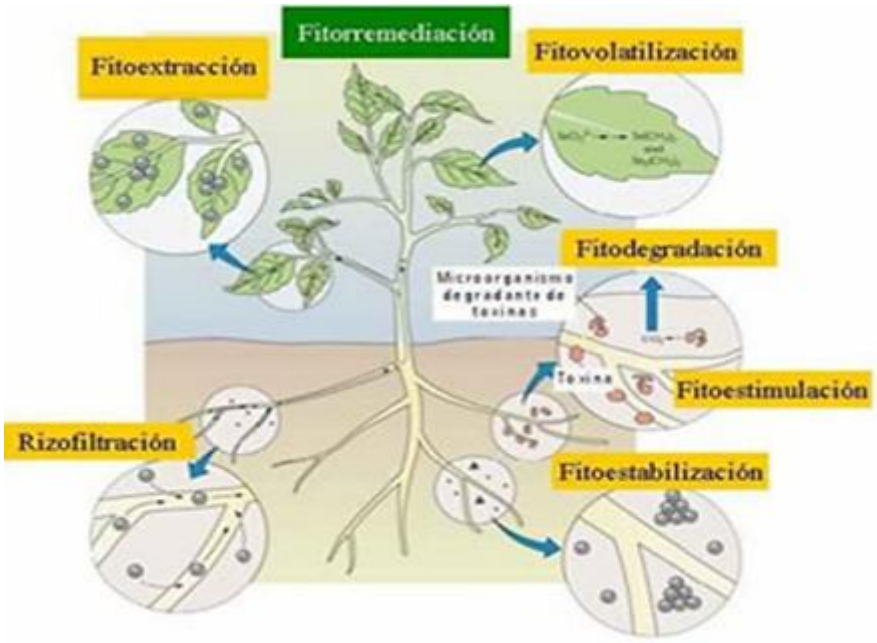
- Captación y modificación del contaminante (mercurio, selenio y metales colorados) para luego liberarlo a la atmosfera con la transpiración.

- Captación y degradación del contaminante para originar compuestos menos tóxicos (pesticidas, herbicidas).

### 2.2.3. Técnicas de fitorremediación

De acuerdo con el tipo de contaminante y las condiciones del área acuática, la fitorremediación puede utilizarse como medio de contención a través de la rizofiltración, la Fitoestabilización y Fitoinmovilización; o como medio de eliminación a través de la Fitodegradacion, la Fitoextracción y la Fitovolatilización, como se observa en la figura 1[22].

Figura 1 Técnicas de fitorremediación.




Fuente: http://www.porquebiotecnologia.com.ar/index.php?action=cuaderno&opt=5

#### 2.2.3.1. Fitoestabilización

Esta técnica ocurre cuando las plantas son capaces de inmovilizar los contaminantes en el suelo a través de absorción y acumulación en las raíces o por precipitación en la zona de la rizósfera. El proceso reduce la movilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas o al aire. La fitoestabilización es efectiva en suelos de textura fina con alto contenido de materia orgánica. Se aplica principalmente en terrenos extensos en donde existe contaminación superficial [3].

#### 2.2.3.2. Rizofiltración

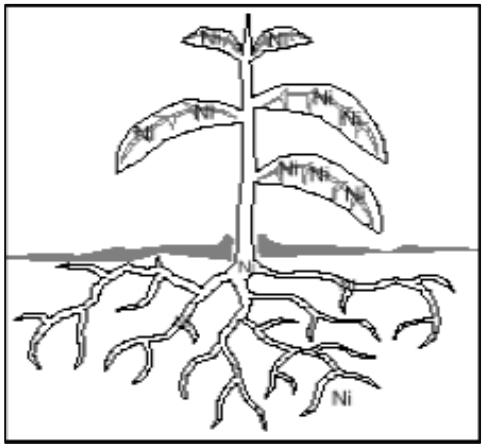
En la rizofiltración las plantas son cultivadas en invernaderos con la raíz dentro de agua. Las plantas utilizan la raíz para eliminar los contaminantes de la zona acuática donde se encuentran. Utilizan su sistema radicular para absorber y acumular los metales, cuando las raíces se saturan, las plantas se cosechan y se disponen para su uso final. Además de extraer metales del agua, esta técnica puede ser utilizada para eliminar residuos industriales, drenaje de ácidos, escorrentía de tierras y contaminantes radioactivos [21].

#### 2.2.3.3. Fitoextracción o Fitoacumulación

En este método, las plantas utilizan sus raíces para absorber los metales, posteriormente los acumulan en el tallo y en las hojas. Esta técnica requiere de la selección de las plantas más adecuadas, luego de que han absorbido los

contaminantes, estas son cortadas, incineradas y llevadas a un vertedero de seguridad [21].

Figura 2. Proceso de fitoacumulación.




Fuente: http://uniciencia.ambientalex.info/infoCT/Evadismetpesplaacugt.pdf

#### 2.2.3.4. Fitovolatilización

Se produce cuando la planta absorbe los contaminantes orgánicos o inorgánicos (comúnmente benceno, nitrobenceno, tolueno, mixileno y etilbenceno), los cuales llegan hasta las hojas y posteriormente se evaporan en la atmosfera [21].

#### 2.2.3.5. Fitodegradacion

En esta técnica, las plantas o mayormente los microorganismos que se encuentran en ellas, degradan los contaminantes orgánicos, convirtiéndolos en no tóxicos o mineralizándolos hasta Co2 Y H2O. En este proceso los contaminantes son metabolizados dentro de los tejidos vegetales y las plantas producen enzimas como la dehalogenasa y la oxigenasa, que ayudan a catalizar la degradación [3].

#### 2.2.3.6. Fitoinmovilización

Las plantas producen compuestos químicos en la interfaz suelo – raíz, así inactivan las sustancias toxicas, ya sea por procesos de absorción, adsorción o precipitación, provocando la sujeción y reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes [24].

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la fitorremediación

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| Es de bajo costo | No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras |
| Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos. | Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta. |

| | |
|---|---|
| Es una tecnología sustentable | En especies como los árboles o arbustos, la fitorremediación es un proceso lento. |
| No requiere consumo de energía | Se requieren áreas relativamente grandes |
| Permite el reciclaje de recursos | En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, como mosquitos. |
| Se puede emplear en agua, suelo, aire y sedimentos | |

Fuente: Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales *Lemna minor* (Lenteja de agua), y *Eichhornia Crassipes* (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera, (2017).

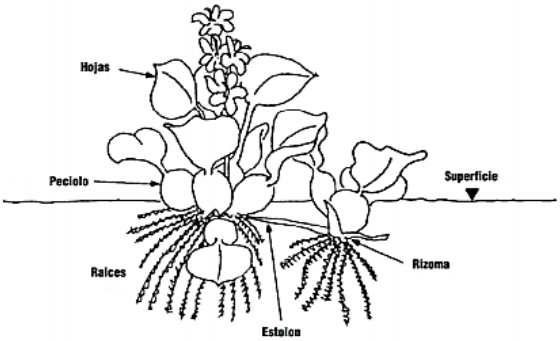
Para mejorar el efecto remediador de las plantas, éstas son modificadas genéticamente. Así, algunas pueden especializarse en el transporte de elementos contaminantes específicos, los cuales pueden ser orgánicos e inorgánicos[14].

### 2.2.4. Características de la taruya (*Eichhornia Crassipes)* como agente biorremediador

#### 2.2.4.1. *Eichhornia Crassipes*

La *Eichhornia Crassipes*, comúnmente llamada Taruya, Jacinto de agua, lirio de agua, camalote, buchón de agua, lampazo o lechuguín; perteneciente a la familia pontederiáceas, originaria de la cuenca del Amazonas, en América del Sur, es una especie macrófita flotante, de raíces sumergidas, dotada de un rizoma emergente, del cual se abre un rosetón de hojas casi circulares de 2,5 a 16 cm de largo y de 3 a 12 cm de ancho, con superficie esponjosa y notablemente inflada que le permite mantenerse sobre la superficie del agua[19].

Figura 3. *Eichhornia Crassipes*.




Fuente: http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/ojs/index.php/Natura/article/view/3371/5033

Las flores se presentan en una espiga de duración efímera entre 1 y 3 días, luego sufren el encorvamiento paulatino del pedúnculo, para sumergirse y fructificar bajo el agua. Pueden medir hasta 5 cm de largo, son de color lila, variando de azul a morado, con la base tubulosa y hacia el ápice dividida en 6 segmentos desiguales, 3 externos y 3 internos[25].

El número de flores por espiga es variable, encontrándose dispuestas aisladamente una por una, sobre el raquis velloso, en los dos tercios superiores, existiendo flores en la parte basal, cubierta por la espata [19].

Figura 4. Flor de *Eichhornia Crassipes*

Fuente: http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/ojs/index.php/Natura/article/view/3371/5033

Cuando son jóvenes sus raíces son fibrosas, tienen una longitud entre 10 y 30 cm, de color negro con extremidades blancas y cambian a negro violáceo cuando son adultas, momento en el cual se convierten en un excelente soporte para el desove de las especies ovíparas y en un refugio para los alevines, incluso en ellas se desarrolla una microfibra que sirve como alimento inicial para los mismos. Gracias al potente sistema radicular de la planta, las raíces pueden alcanzar más del 50% de su biomasa[25].

### 2.2.4.2. Clasificación de la *Eichhornia Crassipes*

Tabla 3. Clasificación científica de la *Eichhornia Crassipes*.

| | |
|---|---|
| Reino: | Plantae |
| División: | Magnoliophyta |
| Clase: | Liliopsida |
| Orden: | Commelinales |
| Familia: | Pontederiaceae |
| Género: | Eichhornia |
| Especie: | E. Crassipes |
| Sinonimia | Pontederia Crassipes |

Fuente: Adaptado de Plantas acuáticas del altiplano de Oriente Antioqueño, Colombia, (2017).

#### 2.2.4.3. Origen

Autores recientes [5, 24] afirman que el origen de la taruya proviene del continente sudamericano. Su propagación fue efecto de la alteración del régimen hidrológico por parte de las actividades del hombre que han incrementado el nivel de nutrientes en el agua. Además por tener característica ornamental, la planta se ha introducido por el hombre a muchos países en los trópicos y subtrópicos donde se ha propagado hasta convertirse en una maleza acuática extremadamente grave por su acción invasora.

#### 2.2.4.4. Composición química

La especie *Eichhornia Crassipes* está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y Lignina. Siendo la hemicelulosa el polímero mayoritario, como se muestra en la tabla 2[5].

Tabla 4. Composición química de la Taruya (*Eichhornia Crassipes*)

| Compuesto | Cantidad existente en la planta |
|---|---|
| Hemicelulosa | 28.0 ± 9.5% (base seca) |
| Celulosa | 25.0 ± 6.2% (bs) |
| Lignina | 11.5 ± 7.4% (bs). |

Fuente: Cambios en la composición del lirio acuático (*Eichhornia Crassipes*) debidos a su grado de madurez y a su transformación biotecnológica. (2017).

##### 2.2.4.4.1. Hemicelulosa

Está constituida por polímeros de unidades anhidroazucares, unidas por enlaces glucosídicos, formadas por más de un tipo de azúcar, además presentan ramificaciones y sustituciones. Su papel es suministrar la unión entre la lignina y la celulosa. Forma parte de las paredes de las células vegetales, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina[20].

##### 2.2.4.4.2. Celulosa

Es una fibra vegetal constituida por una larga cadena de carbohidratos polisacáridos, cuya longitud y espesor varía según el tipo de árbol o de planta. La celulosa constituye una fuente de glucosa prácticamente inagotable que se renueva de forma continua mediante la fotosíntesis [20].

#### 2.2.4.4.3. Lignina

Es uno de los biopolímeros más abundantes en la planta, construido a base de unidades de fenilpropanol, presentan la mayor parte de los grupos metoxilo contenidos en la madera. Se forma mediante la reacción de la fotosíntesis y junto con la celulosa y la hemicelulosa conforma una pared celular en una disposición regulada a nivel nano–estructural, dando como resultado redes de lignina–hidratos de carbono [26].

Los tallos de la *Eichhornia Crassipes* contienen una humedad mayor al 90%. Además cuenta con la presencia de grupos hidroxilo en su estructura, los cuales posibilitan la formación de enlaces de hidrogeno. Se espera que la composición química de la *Eichhornia Crassipes* varié de acuerdo con diferentes factores:

a) El uso de diferentes métodos de análisis,
b) la ubicación del cuerpo de agua y la época del muestreo,
c) la parte analizada de la planta, y
d) la edad de la planta (grado de madurez).

En particular, la edad de la planta es una característica escasamente reportada, no obstante, es determinante para la proporción de raíces, tallos y hojas en la planta, así como para la distribución de material lignocelulósico (lignina, hemicelulosa y celulosa) en cada una de ellas[25].

### 2.2.4.5. Reproducción y crecimiento

Su reproducción es sexual y asexual. Se reproducen por propagación vegetativa, a partir de fragmentos del tallo (brote) y por estolones. Las semillas suelen ser importantes fuentes de rebrote una vez que son eliminadas las plantas adultas. Pueden duplicar su tamaño en diez días, y durante ocho meses de normal crecimiento, una sola planta es capaz de reproducir 70.000 plantas hijas, que pueden llegar a medir de 0.5 a 1.5 metros desde la parte superior hasta la raíz. Durante la etapa de crecimiento, absorben e incorporan los nutrientes en su propia estructura y funcionan como sustrato para los microorganismos que promueven la asimilación de estos nutrientes a través de transformaciones químicas, incluyendo nitrificación y desnitrificación[27].

Las plantas crecen primero de forma horizontal, hasta que la superficie del cuerpo de agua está prácticamente cubierta y posteriormente comienza el crecimiento vertical, llegándose a encontrar plantas de hasta 1.2 metros desde la inflorescencia hasta la raíz. El tiempo de duplicación de la superficie cubierta por esta vía puede ser de 6 a 18 días en condiciones óptimas de temperatura y humedad, llegándose a alcanzar una tasa de crecimiento de hasta 60 cm/mes y una producción de 140 toneladas de materia seca por hectárea al año. En cuanto a la reproducción sexual,

sus semillas pueden permanecer viables de 15 a 20 años. La reproducción por semillas parece ser muy limitada debido a que éstas son sensibles a diversos factores de crecimiento tales como el estrés de oxígeno, luz y temperatura y periodos de inactividad [5].

El crecimiento de esta especie de plantas está altamente influido por los niveles de nutrientes en el agua, especialmente por los niveles de nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, hierro, manganeso, aluminio, boro, cobre, molibdeno, zinc, cadmio, cromo y potasio, que se han incrementado en las corrientes de agua por los fertilizantes agrícolas y por los efluentes industriales y urbanos[12].

Se han propagado en climas cálidos y fríos, por lo cual son consideradas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y Recursos Naturales (IUCN) como malas hierbas o especies invasoras, capaces de cubrir toda la superficie de ríos y lagos e impedir el libre paso del agua o la navegación[12].

#### 2.2.4.6. Condiciones de mantenimiento

Para crecer necesita superficies extensas y aguas neutras, que mantengan un pH entre 6,8 y 7,5, con una profundidad de al menos 20 cm y preferiblemente a una temperatura entre 20° y 30°C, aunque en el invierno pueden resistir temperaturas entre 15° y 28°C. Requiere iluminación intensa y aguas con poca corriente, muy bien provistas de principios nutritivos y abonos complejos como pueden ser ciertos elementos contaminantes [28].

#### 2.2.4.7. Impacto e importancia

Por ser una planta invasora, cubre extensas superficies en lagunas, canales y presas, afectando la supervivencia de las plantas y animales nativos. Limita el tránsito de los pescadores y favorece el desarrollo de los mosquitos que atentan contra la salud humana. Además de esto, la invasión de la taruya modifica la composición química del agua no solo por disminuir sus nutrientes (lo cual puede ser positivo o negativo) sino que también reduce el contenido de oxígeno y aumenta la evapotranspiración, reduciendo gradualmente la profundidad del agua, por lo que no llegaría la cantidad de agua necesaria a los cultivos. Incluso este tipo de plantas pueden bloquear los drenajes naturales y artificiales, elevándose el nivel del agua hasta inundar campos y carreteras[5].

También pueden crecer en humedales naturales; los cuales se caracterizan por ser terrenos que permanecieron inundados durante un tiempo prolongado y que en ellos se desarrolló un tipo de vegetación adaptativa. Se definen como sistemas de transición entre ambientes terrestres y acuáticos con características generales, como la presencia de una lámina de agua poco profunda o de una capa freática en

superficies sobre suelos hidromorfos y el crecimiento de hidrofitos, como lo es la taruya. Los humedales naturales son lugares propicios para el crecimiento de la taruya, sin embargo como su rápida reproducción depende de las cantidades de nutrientes que contenga el lugar, las plantas se ven atraídas por las aguas residuales[18].

Por otro lado, los humedales artificiales son los construidos por el hombre para el tratamiento de aguas residuales. También son llamados estanques o canales que tienen poca profundidad, en los que se implantan especies vegetales adaptadas a la vida acuática. En comparación con los humedales naturales, los artificiales pueden tener costos altos de energía y control de procedimientos[18].

A pesar de tener muchas desventajas propias de su característica invasora, la Taruya puede ser utilizada como planta ornamental e incluso comestible, como abono verde, forraje, papel de baja calidad y fertilizante. Sirve para elaborar artesanías y entre sus usos más importantes se encuentran: producir biogás y actuar como agente biorremediador de aguas residuales [5].

#### 2.2.4.8. La Taruya como agente Biorremediador.

La mayoría de las acciones humanas traen como consecuencia la generación de aguas residuales que deben ser sometidas a un tratamiento que garantice la continuidad del ciclo de consumo del recurso. De esta forma, las aguas contaminadas pueden tratarse con sistemas mecánicos – intensivos o naturales – extensivos [23].

### 2.2.5. Los sistemas intensivos

Se refieren a los que utilizan tecnología o remediación por algas en los cuales las micro algas o cianobacterias absorben nutrientes, producen oxigeno mediante la fotosíntesis y finalmente degradan materia orgánica o contaminantes que se encuentren en el medio acuático. Esta clase de procesos son llamados tanques de oxidación o de estabilización de desechos y son comúnmente utilizados en climas cálidos, donde presentan alta eficiencia en la destrucción de residuos. Sin embargo, estos procesos están desapareciendo gradualmente debido a los estrictos estándares que se imponen hoy en día al tratamiento de aguas residuales y al elevado costo relacionado con los sofisticados diseños de ingeniería y el consumo de energía [23].

### 2.2.6. Los sistemas extensivos

Implican el control de los vertidos domésticos y urbanos, mediante técnicas tan naturales y poco consumidoras de energía como sea posible. Este tipo de práctica incluye sistemas de fitorremediación compuestos por plantas (enraizadas o flotantes) que pueden absorber contaminantes, producir y transferir oxígeno, y por

tanto estimular el crecimiento de bacterias capaces de degradar materias orgánicas y nutrientes que contaminan el medio acuático. Además de que es el sistema más amigable con el medio ambiente, también se considera la tecnología más económica y efectiva en la reducción de contaminación ya que está basado en la actividad de descomposición de microorganismos naturales que mineralizan los contaminantes originales[27].

Las características de absorción y adsorción de nutrientes permiten que el Jacinto de agua sea una especie conveniente en el sistema extensivo de tratamiento del agua, convirtiéndola en un agente que agiliza el proceso de biodegradación. La biodegradación es un proceso natural, mediante el cual los microorganismos degradan ciertas moléculas, transformándolas en cantidades más pequeñas o simplemente eliminando su toxicidad. Sin embargo, este proceso requiere de mucho tiempo, así que cuando el objetivo es reparar zonas acuáticas, el tratamiento puede acelerarse introduciendo determinadas bacterias o plantas en el área contaminada; a lo que se le llama: Biorremediación [27].

### 2.2.7. Procesos de depuración de contaminantes por la taruya

Entre los principales procesos de depuración que realizan las plantas acuáticas como la taruya, se encuentra la eliminación de sólidos en suspensión, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, patógenos y metales pesados o traza [29].

### 2.2.8. Eliminación de sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión comprenden partículas que se mantienen sobre el agua, también son llamados materia en suspensión y pueden ser tomados como referencia para evaluar la calidad del agua. Los procesos que conducen a la remoción de estos contaminantes dependen del tipo de humedal y de la categoría de partículas que contenga el agua residual, sean solidos sedimentables, partículas supra coloidales, coloides y solidos solubles [29].

La Taruya elimina estos solidos a través de las raíces y rizomas, utilizando métodos como la sedimentación, floculación, filtración e intercepción. La sedimentación ocurre por efecto de la gravedad. La floculación ocurre naturalmente por la unión de partículas cargadas eléctricamente que colisionan entre sí. El proceso de filtración se lleva a cabo cuando las plantas forman con sus partes sumergidas un entramado denso, mientras que en el proceso de intercepción las partículas se agrupan en la superficie de las partes sumergidas de las plantas [29].

### 2.2.9. Eliminación de materia orgánica

La materia orgánica está compuesta por los residuos animales o vegetales que se encuentran en el suelo o en al agua. En el suelo puede ser llamada abono porque contribuye a la fertilización de tierras agrícolas, pero en el agua puede llegar a ser un agente potencialmente contaminador. La materia orgánica puede clasificarse en:

- Materia orgánica no transformada, representada por la biomasa vegetal, animal o microbiana en estado fresco.

- La materia orgánica semitransformada, o restos orgánicos en proceso de transformación.

- La materia orgánica transformada, en donde se encuentra el humus.

De este proceso se encargan los microorganismos que viven adheridos en el sistema radicular de la planta, los cuales reciben el oxígeno a través de un sistema de aireación especializado. Una parte de la aireación del agua también se realiza por difusión del oxígeno del aire a través de la superficie del agua. En este proceso también es utilizada la sedimentación y pueden darse procesos de adsorción y absorción en la materia orgánica disuelta[4].

La materia orgánica puede ser removida por las plantas de dos formas: física y biológicamente. Durante el proceso biológico, intervienen organismos micro y macroscópicos vivos, e influye totalmente la disponibilidad de oxígeno, pH y la temperatura de la zona acuática, en dicho caso, se dan reacciones de oxidación, reducción, hidrolisis y fotólisis que finalmente degradan la materia orgánica [29].

### 2.2.10. Eliminación de microorganismos patógenos

Los microorganismos patógenos son organismos vivos que no se disuelven en el agua si no que se coagulan o se anexan a sustancias coloides o sólidos en suspensión que se encuentran en la superficie. Estos patógenos pueden ser bacterias, helmitos, hongos, virus y protozoos parásitos. Pueden ser eliminados por adsorción y filtración en partículas de arcilla y por la toxicidad producida por antibióticos en las raíces de la planta [29].

### 2.2.11. Eliminación de metales pesados

Los metales pesados constituyen un grupo de elementos de la tabla periódica que tienen una densidad mayor o igual a 5 $g/cm^3$, entre ellos; el Na, K, Mg, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn y Mo. Aun cuando estos son esenciales para el crecimiento humano, también traen consecuencias toxicas sobre las células vivas,

principalmente por su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas, volviéndolas toxicas. En este sentido, los metales pesados en las cantidades y lugares no adecuados, como en los abastecimientos de aguas superficiales y subterráneas se convierten en principales contaminantes inorgánicos del ambiente [29].

Los elementos como Cu, Zn y $Cr^{3+}$, son requeridos en dosis moderadas por el organismo, mientras que los elementos As, Cd, Hg, $Cr^{+6}$ y Pb, son altamente tóxicos, puesto que no poseen un rol biológico conocido. Algunos de los elementos que más tienen presencia en las aguas residuales son: oxígeno disuelto, el nitrógeno (ya sea en forma orgánica e inorgánica, como el amoniaco, nitrito, nitratos) y el fósforo[29].

A pesar de que se tiene conocimiento de los efectos dañinos que tienen ciertos elementos químicos sobre el ser humano, todavía existen prácticas que los manejan; por ejemplo, el mercurio todavía se utiliza en las minas de oro en América latina, el arsénico, junto con el cobre y cromo es muy común en los conservantes de la madera, el plomo se usa cada día menos como aditivo para la gasolina, el uso del carbón genera cenizas, que contienen muchos metales tóxicos y pueden ser aspiradas hasta el interior de los pulmones, incluso disolverse en el agua[7].

Según varios autores [14], la Taruya tiene una acumulación máxima de 0,20 ppm en los brotes y 16,0 ppm en las raíces. Pueden adsorber de 110 a 1.217 g/kg peso seco en invierno y de 7,6 a 16,2 g/kg en verano; aunque la mayor parte del mercurio tiende a permanecer en la raíz. Para llevar a cabo la acumulación de metales pesados, la taruya presenta primeramente la absorción o vinculación a la superficie biológica (biosorción), seguida del transporte lento e irreversible, controlado por difusión al interior de la célula (bioacumulación), que puede ser por difusión del ion metálico a través de la membrana celular o por transporte activo por una proteína transportadora.

En la taruya, como en la mayoría de las plantas acuáticas, los efectos de los metales comienzan por la raíz hasta llegar al resto de la planta, de tal forma que las hojas pueden sufrir daños en los cloroplastos y las mitocondrias, afectando directamente el proceso de fotosíntesis[14].

La capacidad de adsorción se debe a la presencia de grupos hidroxilo en las moléculas de la celulosa, los cuales posibilitan la formación de puentes de hidrogeno. La estructura del tallo de la planta también favorece el proceso ya que tiene una superficie inflada, compuesta por celdas que dan lugar a un material macro poroso y bulboso, lo cual utiliza la planta para acumular agua y aire en su interior, haciéndola flotar. Los microorganismos que habitan en la rizósfera son los que permiten que la materia orgánica se degrade y los metabolitos generados de esta degradación son absorbidos por las plantas junto con nitrógeno, fósforo y otros minerales [30].

### 2.2.12. Eliminación de Nitrógeno

El nitrógeno es un gas no tóxico, incoloro, inodoro e insípido. Es un nutriente esencial para los seres vivos, ya que constituye uno de los principales compuestos vitales como aminoácidos, proteínas, enzimas y ácidos nucleicos, así como la clorofila en los vegetales. En las aguas residuales, el nitrógeno puede encontrarse en forma de nitrato, nitrito, amonio y nitrógeno orgánico; siendo estos dos últimos las formas predominantes en los efluentes[29].

Para remover este contaminante, se emplean procesos físicos-químicos y biológicos. En el proceso biológico actúan las plantas acuáticas como la taruya, a través de la amonificación, nitrificación, desnitrificación, fijación de nitrógeno y asimilación por las plantas[28].

En la amonificación o hidrólisis, las plantas mediante condiciones aerobias o anaerobias transforman el nitrógeno que se encuentra en la materia orgánica en nitrógeno amoniacal, el cual posteriormente seria inmovilizado por intercambio catiónico, por volatilización o absorción por organismos fotosintéticos. Este proceso está condicionado al pH y a la temperatura de la zona acuática. En la nitrificación, los microorganismos aerobios nitrificantes que se encuentran en las partes sumergidas de las plantas convierten el amonio en nitrato mediante su oxidación. Este proceso también depende del pH y de la temperatura del agua y se emplean bacterias del género Nitrosomona y nitrobacter. La desnitrificación se basa en la reducción del nitrógeno gaseoso, utilizando bacterias heterótrofas que eliminan el oxígeno y aumentan el carbono orgánico. En comparación con el amonio, el ion nitrato no se inmoviliza, este se mantiene en el agua hasta que las plantas lo absorben [29].

El Jacinto de agua puede eliminar el nitrógeno por absorción directa o por alguno de los procesos biológicos mencionados, principalmente por la nitrificación, la desnitrificación y la amonificación[28].

### 2.2.13. Eliminación de Fósforo

El fósforo es un nutriente estructural esencial en las plantas. A diferencia del nitrógeno y el azufre, el fosfato es un elemento poco móvil, por lo que no puede ser absorbido en forma anionica. Los fosfatos se clasifican en fosfato inorgánico y fosfato orgánico. El fosfato orgánico puede encontrarse en el agua residual como restos de alimentos u otros componentes orgánicos, mientras que el fosfato inorgánico del agua residual puede proceder de productos de limpieza o fertilizantes agrícolas[31].

El Jacinto de agua utiliza su capacidad de absorción y adsorción sobre las partículas de arcilla y precipitación de fosfatos insolubles para eliminar el fósforo, el cual puede

eliminarse por intervención de microorganismos que se hallan suspendidos y en biopeliculas sobre la superficie de la planta [29].

### 2.2.14. Contaminación por metales pesados.

Las actividades industriales generan una contaminación a gran escala con metales pesados (cobre, zinc, plomo, cadmio, cromo, níquel, mercurio, cobalto, plata y oro) en el medio ambiente. En los suelos, suelen afectar la fertilidad y su uso posterior, mientras que en el caso de los acuíferos y aguas superficiales, pueden comprometer seriamente el uso de este recurso como fuente de agua para el consumo humano[1].

El impacto ambiental de los contaminantes metálicos depende de su capacidad de acomplejamiento con componentes del medio ambiente y su respuesta a las condiciones físico-químicas y biológicas con el entorno. Los metales son especies químicas no degradables, una vez volcados al medio ambiente, sólo pueden distribuirse entre el aire, el agua y el suelo, a veces cambiando su estado de oxidación o bien incorporándose a los seres vivos [1].

Los metales pesados son elementos con altos pesos atómicos, superiores a 45 y una densidad superior a 5 g.cm-3, excluyendo a los grupos alcalino y alcalinotérreo. Aunque algunos son imprescindibles para el desarrollo de las funciones vitales de los organismos, los denominados esenciales como cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, vanadio y estroncio, en cantidades excesivas son perjudiciales e incluso letales para los seres vivos. Los metales pesados no esenciales comúnmente implicados en problemas de contaminación de las aguas subterráneas son: cromo, cadmio, mercurio, plomo, arsénico y antimonio [32].

### 2.2.15. Biorremediación de Metales Pesados:

En los procesos de biorremediación generalmente se emplean mezclas de ciertos microorganismos capaces de degradar o acumular sustancias contaminantes. Los microorganismos utilizados en biorremediación pueden ser los ya existentes (nativos) en el sitio contaminado. Los metales pesados no son biodegradables, pero las bacterias pueden concentrarlos de tal manera de aislarlos para que sean eliminados más fácilmente o cambiar sus estados de oxidación menos tóxicos para el medio ambiente[16].

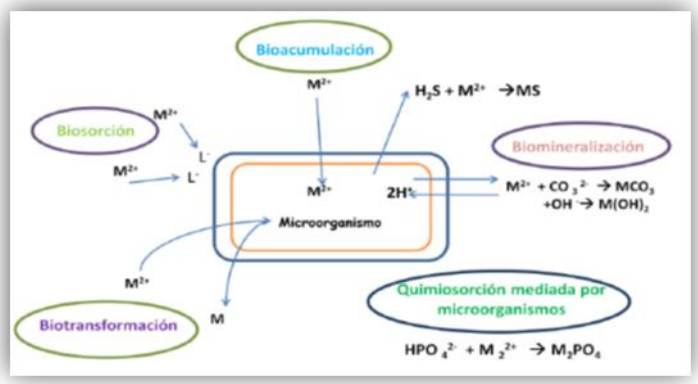
Uno de los mayores problemas ambientales es la acumulación de metales pesados en los ecosistemas, producto de desechos industriales mal tratados. A diferencia de otras tecnologías, la biorremediación es rentable cuando se aplica; además según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos(EPA), la biorremediación y la fitorremediación son las técnicas de control de contaminación más económicas disponibles [33].

En los últimos años el avance de la nanotecnología ha venido en aumento con múltiples iniciativas, en lo que concierne a sistemas de purificación de agua, se está diseñando membranas reactivas (membranas de ferrocene) que son capaces de tratar desechos orgánicos en el agua al imitar el funcionamiento de las membranas celulares. Asimismo, se están desarrollando catalizadores diseñados nanométricamente que permitan una mayor eficiencia en las reacciones químico-biológicas entre el catalizador y el contaminante a precipitar, estos catalizadores son añadidos al agua en un tanque-reactor especial en el que se lleva a cabo la reacción y se precipitan los contaminantes [34].

Se tiene conocimiento de la capacidad de algunas bacterias Gram positivas (incluyendo una cepa de Bacillus subtilis) para reducir cromato en condiciones aeróbicas, la mayoría de los estudios sobre la reducción de cromato se han llevado a cabo utilizando bacterias Gram negativas en su mayoría, cepas de Pseudomonas y Enterobacter [2], algunos microorganismos son capaces de reducir el Cr VI a Cr III que es menos tóxico para los sistemas biológicos [35].

La capacidad de reducir Cr VI aeróbicamente se ha detectado en especies del género Pseudomonas. Sin embargo, en condiciones anaeróbicas, la reducción de Cr VI a Cr III no es un proceso estrictamente específico y pueden ser llevadas a cabo por microorganismos Gram-positivos y Gram-negativos, como un ejemplo se tiene a Enterobacter cloacae HO1, una cepa aislada de lodos activados que utiliza cromato (CrO4 2- ) como aceptor de electrones en un modo de respiración anaeróbica [2]. Existen diferentes mecanismos que utilizan los microorganismos para lograr la inmovilización del metal, como la biosorción, bioacumulación, biomineralización, biotransformación y quimiosorción como muestra la Figura 5, [33].

Figura 5. Mecanismos de interacción entre los metales pesados y microorganismo.




Fuente: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86320303

### 2.2.16. Cromo

El cromo (Cr) es un metal de transición localizado en el grupo VI – B de la tabla periódica, cuyas especies más estables y abundantes son: la trivalente, Cr III estado de oxidación más estable y la hexavalente Cr VI, agente de oxidación fuerte [36].

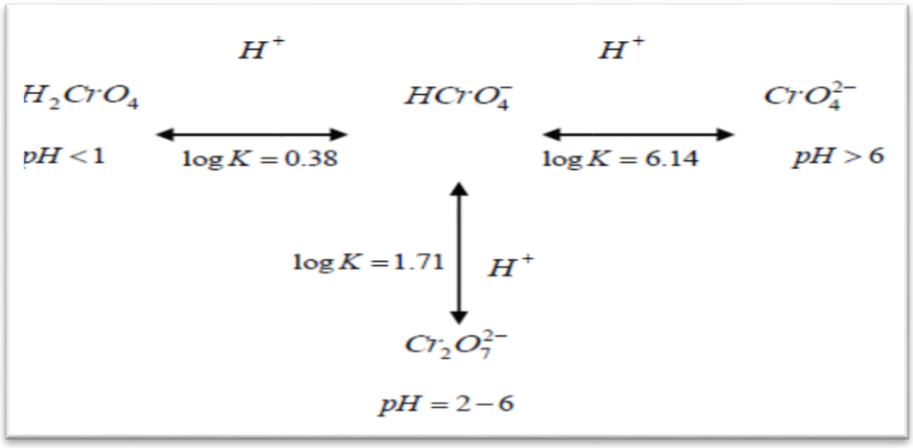
El Cr es de amplia importancia, ya que es utilizado en distintas actividades industriales y aunque puede existir en diferentes estados de oxidación, en el ambiente solo se encuentran en forma estable los estados +3 y +6 [1].

El Cr VI se encuentra comúnmente en forma de oxianiones hidrosolubles, cromatos ($CrO_4^{2-}$) y dicromatos ($Cr_2O_7^{2-}$), mientras que el Cr III en forma de óxidos, hidróxidos o sulfatos que son menos móviles y existe unido a materia orgánica en el suelo y en ambientes acuáticos. El Cr VI es un fuerte agente oxidante y en presencia de materia orgánica, es reducido a Cr III; esta transformación es más rápida en ambientes ácidos. Sin embargo, niveles elevados de Cr VI pueden sobrepasar la capacidad reductora del ambiente y puede así persistir como un contaminante. Diversos compuestos de cromo son contaminantes ambientales presentes en agua, suelos y efluentes de industrias, debido a que dicho metal es ampliamente utilizado en distintas actividades manufactureras, tales como cromado electrolítico, fabricación de explosivos, curtido de pieles, aleación de metales, fabricación de colorantes y pigmentos, entre otros [37].

Los compuestos de Cr VI son oxidantes fuertes y altamente solubles, con capacidad de atravesar fácilmente las membranas biológicas, mientras que los compuestos de Cr III tienden a formar precipitados relativamente inertes a pH cercanos a la neutralidad [1]. Las especies de cromo hexavalentes existen principalmente como ácido crómico ($HCrO_4$) y sus sales ión hidrógeno cromato $HCrO_4^-$, ión cromato $CrO_4^{2-}$, dependiendo del pH. Las especies predominantes, como función del pH, son ácido crómico ($H_2CrO_4$) a pHs menores que 1, ión hidrógeno cromato ($HCrO_4^-$) a pHs entre 1 y 6 y, ión cromato $CrO_4^{2-}$ a pHs sobre 6. El ión dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) es un dímero del ión hidrógeno cromato $HCrO_4^-$, el cual se forma cuando la concentración de cromo excede aproximadamente a 1 $gL^{-1}$[38].

Dependiendo de la concentración de cromo y el pH de la solución (Figura 6.), el Cr VI puede existir principalmente como ión dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$), ión hidrógeno cromato ($HCrO_4^-$) y ácido crómico ($H_2CrO_4$) de acuerdo a la siguiente ecuación [38].

Figura 6. Especies de cromo VI dependiendo del pH.




Fuente: https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10450-005-5613-4?LI=true

### 2.2.16.1. Cromo en la Industria.

El cromo y sus compuestos son muy importantes para diversos usos, por ejemplo: es utilizado en la limpieza de metales de procesamiento curtido de cuero, conservación de la madera, la cerámica, la pirotecnia, la electrónica, fabricación de aleaciones metálicas, en la industria química, colorantes, plaguicidas, el cromado electrolítico o galvanoplastia, el uso de compuestos de cromo mordientes en teñido de telas y otros usos menores como conservación de la madera, fotograbado, fabricación de cerillos, explosivos, linóleo, como colorantes, pigmentos, por lo que es el contaminante más común en una amplia variedad de desechos industriales, es por ello primordial considerar su toxicidad en el medio laboral y en el medio ambiente en general. En la tabla 5 se muestra algunos tipos de compuestos de cromo y los usos que tienen en diferentes industrias[39].

Tabla 5. Tipos de compuestos y usos.

| **Tipo de compuesto** | **Usos** |
|---|---|
| Acido Crómico | Galvanoplastia |
| Dicromato sódico | Curtido de pieles |
| Trifluoruro de cromo Cloruro crómico | Mordiente para teñidos |
| Sulfato crómico | Colorante de gemas sintéticas |
| Fluoruro de cromo Dicromato sódico | Tinción de telas |
| Dicromato de sodio | Mordiente |
| Acetato de cromo | Estampados de textiles |
| lón trivalente (Cr3+) lón hexavalente (Cr6+), (CrO42-) | Colorante de vidrio |

Fuente: Compuestos de cromo y sus usos en diferentes procesos de la industria, (2017).

Entre los efluentes que causan mayor preocupación están los desagües de galvanoplastia que pueden descargar Cr VI. El curtido de cueros y la industria textil, como también la manufactura de colorantes y pigmentos, pueden descargar Cr III y Cr VI a los cuerpos de agua[40].

#### 2.2.16.2. Toxicidad del Cromo.

Los efectos biológicos del cromo dependen de su estado de oxidación. El Cr VI es considerado la forma más tóxica del metal, debido a que atraviesa fácilmente las membranas biológicas y puede ser transportado activamente al interior de las células por medio del transportador de sulfato; por su analogía química con el sulfato, el cromato es un inhibidor competitivo del transporte de aquel ión esencial. El Cr VI es altamente tóxico para todas las formas de vida, siendo mutagénico y carcinogénico en el hombre y mutagénico en bacterias. Se ha propuesto que la toxicidad del Cr VI se debe a que, al igual que otros metales, produce estrés oxidativo. En este proceso dentro de las células se generan intermediarios reducidos de cromo que, en presencia de H2O2, funcionan como catalizadores de una reacción tipo Fenton, llevando a la formación de Especies Reactivas de Oxígeno (ERO). Conduce el consecuente daño oxidativo, produciendo peroxidación de lípidos, oxidación de proteínas y daños a los ácidos nucléicos [37].

Por otra parte, el Cr III es relativamente inocuo debido a su insolubilidad e incapacidad para atravesar las membranas biológicas; dicha especie constituye un oligoelemento indispensable para procesos bioquímicos y fisiológicos en células superiores, en cantidades muy pequeñas. El Cr III específicamente tiene acciones en el metabolismo de la glucosa, el colesterol y los ácidos grasos, además de desempeñar un papel importante en diferentes reacciones enzimáticas [37]. En pequeñas cantidades, el cromo se considera un nutriente esencial para numerosos organismos, pero en niveles elevados, es tóxico y mutagénico [41].

La toxicidad de los metales pesados es muy amplia. Su acción directa sobre los seres vivos ocurre a través del bloqueo de las actividades biológicas, es decir, la inactivación enzimática por la formación de enlaces entre el metal y los grupos sulfhidrilos (–SH) de las proteínas, causando daños irreversibles en los diferentes organismos [33].

## 2.3. MARCO LEGAL

Ley 23 De 1973: Código Nacional De Los Recursos Naturales Renovables Y De Protección Del Medio Ambiente. Es objeto de la presente ley prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del Territorio Nacional.

Decreto 2811 De 1974: Reglamentación Del Código Nacional De Los Recursos Naturales Renovables Y De Protección Del Medio Ambiente. En este decreto se dice que los encargados de mantener bien el medio ambiente son los particulares y el Estado. En la parte III del título II, en los artículos 13 al 17, se encuentran las acciones educativas, uso de medios de comunicación social y servicio nacional ambiental, el cual trata sobre Incluir cursos sobre ecología, preservación ambiental y recursos naturales renovables;

Ley 99 de 1993 Ministerio del Medio Ambiente: Por medio de esta ley se creó el Ministerio del Medio Ambiente, se reordenó el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organizó el Sistema Nacional Ambiental (SINA), y se dictaron otras disposiciones.

Ley 299 de 1006 Ministerio del Medio Ambiente: Por la cual se protege la flora colombiana, se reglamentan los jardines botánicos y se dictan otras disposiciones. La conservación, la protección, la propagación, la investigación, el conocimiento y el uso sostenible de los recursos de la flora colombiana son estratégicos para el país y constituyen prioridad dentro de la política ambiental. Son de interés público y beneficio social y tendrá prelación en la asignación de recursos en los planes y programas de desarrollo y en el Presupuesto General de la Nación y en los presupuestos de las entidades territoriales y de las corporaciones autónomas regionales.

Decreto 4741 De 2005: Reglamentación Del Código Nacional De Los Recursos Naturales Renovables Y De Protección Del Medio Ambiente. El presente decreto tiene por objeto prevenir la generación de residuos o desechos peligrosos, así como regular el manejo de los residuos o desechos generados, con el fin de proteger la salud humana y el ambiente.

Decreto 3930 De 2010: Reglamentación Del Código Nacional De Los Recursos Naturales Renovables Y De Protección Del Medio Ambiente. El presente decreto establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

Decreto 4728 De 2010: Reglamentación Del Código Nacional De Los Recursos Naturales Renovables Y De Protección Del Medio Ambiente. El presente decreto se establece con el objetivo de modificar parcialmente el decreto 3930 de 2010.

## 2.4. MARCO CONCEPTUAL

**TARUYA (*EICHHORNIA CRASSIPES*)**: Es una planta acuática flotante de la familia de las Pontederiáceas, comúnmente encontrada como esteras densas en hábitats de agua dulce y regiones cálidas. Es usada como planta medicinal, fertilizante de suelos y decorativa; por fuera de su nicho original se la considera especie invasora. Varias características de esta hacen que sea fácil de reconocer, incluyendo rosetas de hojas verdes redondeadas unidas a peciolos gruesos, esponjosos (a menudo bulbosos o inflados para flotar), raíces de plumaje oscuro que típicamente cuelgan suspendidas en el agua debajo de la planta.

**BIORREMEDIACIÓN:** Tiene su origen en el vocablo inglés *bioremediation*. El concepto permite hacer referencia a la utilización de organismos vivos para tratar una sustancia o para recuperar las condiciones medioambientales. Las bacterias, los hongos y hasta ciertas plantas pueden absorber y degradar elementos contaminantes, limpiando así el suelo, el agua o el entorno en general. La biorremediación ayuda a la naturaleza a superar un desequilibrio y así recuperar un ecosistema que experimentó alguna clase de daño por acción de la contaminación.

**FITORREMEDIACIÓN**: La etimología proviene del griego *phyton* = planta y del latín *remedium* = restablecer el equilibrio, la remediación. La fitorremediación no es un concepto nuevo, pues desde hace 3000 años los hombres han utilizado la capacidad natural de purificación de las plantas para el tratamiento del agua. Desde la década de 1970 esta práctica ha encontrado un renovado interés, en particular para el tratamiento de los plaguicidas y de los metales.

**ABSORCIÓN**: Es un término que se vincula a absorber. Este verbo puede hacer referencia a distintas cuestiones: al amortiguamiento ejercido por un cuerpo ante una radiación que lo traspasa; a la atracción desarrollada por un sólido sobre un líquido con la intención de que las moléculas de éste logren penetrar en su sustancia; a la capacidad de un tejido o de una célula para recibir una materia que procede de su exterior. La noción de absorción (del latín *absorptio*) también tiene usos más amplios. Puede tratarse de algo que se consume o se gasta en su totalidad. Por ejemplo: “La empresa ya absorbió todo su capital”, “Este caso absorbe todas mis fuerzas”.

**ADSORCIÓN**: Es un concepto que se utiliza en el terreno de la física con referencia al proceso y el resultado de adsorber. Este verbo alude a la atracción y retención que realiza un cuerpo en su superficie de iones, átomos o moléculas que pertenecen a un cuerpo diferente. A través de la adsorción, un cuerpo logra capturar las moléculas de otro y mantenerlas en su propia superficie. De este modo, la adsorción se diferencia de la absorción, donde las moléculas penetran en su superficie.

**AGUA:** Del latín *aqua*, el agua es una sustancia cuyas moléculas están compuestas por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno. Se trata de un líquido inodoro (sin olor), insípido (sin sabor) e incoloro (sin color), aunque también puede hallarse en estado sólido (cuando se conoce como hielo) o en estado gaseoso (vapor). El agua es el componente que aparece con mayor abundancia en la superficie terrestre (cubre cerca del 71% de la corteza de la Tierra). Forma los océanos, los ríos y las lluvias, además de ser parte constituyente de todos los organismos vivos. La circulación del agua en los ecosistemas se produce a través de un ciclo que consiste en la evaporación o transpiración, la precipitación y el desplazamiento hacia el mar.

**CONTAMINACIÓN:** Se considera como la introducción de una sustancia nociva o contaminante o alguna forma energética, que cambia el medio en el que se introduce, desequilibrándolo. Estos contaminantes tienden a dispersarse, incluso transfiriéndose fuera de su medio, invadiendo otros, y elevar su grado de contaminación, al mezclarse con otros contaminantes. La contaminación ambiental es la presencia de sustancias nocivas para los seres vivos que irrumpen en la composición de los elementos naturales, como el agua, el suelo y el aire. Tenemos varias clases de contaminación: atmosférica, hídrica, del suelo, sonora, visual, entre otras.

**METALES PESADOS:** Son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Tienen aplicación directa en numerosos procesos de producción de bienes y servicios. Los más importantes son: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Cinc (Zn). Algunos metales son indispensables en bajas concentraciones, ya que forman parte de sistemas enzimáticos, como el cobalto, zinc, molibdeno, o como el hierro que forma parte de la hemoglobina. Su ausencia causa enfermedades, su exceso intoxicaciones.

**CROMO:** Es un metal de escasa presencia en la corteza de la Tierra. Se trata de un elemento brillante, de tonalidad blanca o plateada, que suele encontrarse como óxido y que, gracias a su capacidad para resistir la corrosión, se utiliza para proteger otros metales. El proceso que consiste en la aplicación de una capa de cromo sobre otro metal se denomina cromado. De símbolo Cr, el cromo es duro aunque se quiebra con facilidad. Sus sales pueden emplearse como mordientes (para la fijación de colores), mientras que sus óxidos y cromatos se utilizan en pinturas.

# 3. DISEÑO METODOLÓGICO

Este capítulo “refleja de forma precisa el tipo de datos que se requiere indagar para el logro de los objetivos de la investigación, así como la descripción de los distintos métodos y las técnicas que posibilitarán obtener la información necesaria ya que es una serie de pasos, que permiten responder con lo que se quiere estudiar, los alcances y el porqué de la investigación” [42].

## 3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para realizar una evaluación in vitro de la taruya (*Eichhornia Crassipes*) como agente biorremediador en aguas contaminadas con cromo, se desarrolla una metodología de investigación tipo exploratoria, según Hernández Sampieri la investigación exploratoria es aquella que se realiza cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes. Es decir, cuando la revisión de la literatura revelo que tan solo hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el problema de estudio, o bien, si deseamos indagar sobre temas y áreas desde nuevas perspectivas[43].

Tal sería el caso de investigadores que pretendieran analizar fenómenos desconocidos o novedosos: una enfermedad de reciente aparición, una catástrofe ocurrida en un lugar donde nunca había sucedido algún desastre, inquietudes planteadas a partir del desciframiento del código genético humano y la clonación de seres vivos, una nueva propiedad observada en los hoyos negros del Universo, el surgimiento de un medio de comunicación completamente innovador, o la visión de un hecho histórico transformada por el descubrimiento de evidencia que antes estaba oculta[43].

## 3.2. ENFOQUE ADOPTADO

El enfoque adoptado es cuantitativo, según Hernández Sampieri el Enfoque cuantitativo es aquel que usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías[43].

## 3.3. DISEÑO ADOPTADO

El proyecto presenta un diseño experimental, según Hernández Sampieri se habla de "experimentar" cuando mezclamos sustancias químicas y vemos la reacción provocada, o cuando nos cambiamos de peinado y observamos el efecto que suscita en nuestras amistades dicha transformación. La esencia de esta concepción de experimento es que requiere la manipulación intencional de una acción para

analizar sus posibles resultados. Es decir, los diseños experimentales se utilizan cuando el investigador pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula[43].

## 3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población representa la Planta de Taruya que se reproduce libremente en la región del Canal del Dique, del corregimiento de pasacaballos, coordenadas (latitud 10.28106, longitud -75.51188). La muestra representativa tomada fue de 20 unidades completas de plántulas conformadas por: bulbo, raíz, hojas y tallo, de tamaño homogéneo aproximadamente (15 cm).

## 3.5. TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.

### 3.5.1. Fuentes primaria

Observación de los investigadores, el relato de los pobladores del corregimiento de Pasacaballo (Cartagena-Bolívar) con respecto a la planta, guías de tutores, docentes y especialistas en el tema.

### 3.5.2. Fuentes secundarias

Libros, Base de datos científicas, Redalyc, Scopus, Science Direct.

## 3.6. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Ho: La taruya (*Eichhornia Crassipes*) absorbe cromo disuelto en aguas contaminadas con este metal.

Ha: La taruya (*Eichhornia Crassipes*) no absorbe cromo disuelto en aguas contaminadas con este metal.

## 3.7. VARIABLES

### 3.7.1. Dependientes

- pH.
- Conductividad.
- Madurez de la taruya (*Eichhornia Crassipes*).

### 3.7.2. Independientes

- Temperatura.
- Presión.
- Concentración inicial de cromo.

## 3.8. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 6. Operacionalización de variable.

| VARIABLE | DEFINICION NOMINAL | DIMENSION | INDICADORES |
|---|---|---|---|
| pH | Logaritmo, con signo negativo, de la concentración de iones hidrógeno, en moles por litro. | Adimensional | Indicador de acidez o basicidad de una solución. |
| Conductividad | Habilidad o poder de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido. | Siemens por metro [S/m] | Calidad de aguas dulces. |
| Madurez de la taruya (*Eichhornia Crassipes*) | Concepto que se usa para referirse a un estado avanzado de desarrollo. | Adimensional | Tiempo de vida del espécimen vegetal. |
| Temperatura | Magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica. | °C, K | Cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente. |
| Presión | Magnitud que relaciona la fuerza aplicada a una superficie y el área de la misma. | Atm, mmHg | El peso por unidad de superficie ejercida por la atmósfera. |
| Concentración inicial de cromo | Asociación o proporción que se puede establecer al comparar la cantidad de soluto y el nivel de disolvente presentes en una disolución. | ppm | Relación el soluto y la cantidad de disolvente. |

Fuente: autores

## 3.9. PROCESAMIENTO O MODELO PARA EL ANÁLISIS DE DATOS.

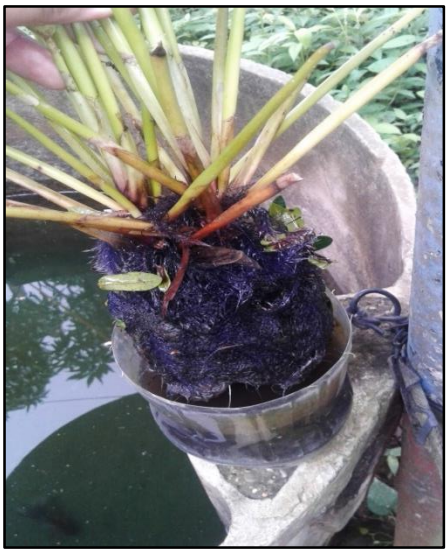
### 3.9.1. Toma de muestras

Para llevar a cabo el experimento, se utilizaron 20 plantas de la especie acuática *Eichhornia Crassipes,* recolectada en el corregimiento de Pasacaballos (Cartagena-Bolívar).

Durante el proceso de selección, se escogieron las plantas más pequeñas por su facilidad de transporte y siembra, además se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

- Que tuvieran una buena pigmentación.
- Que no presentaran anomalías en cualquiera de sus partes.
- Que tuvieran el color azulado en las raíces, lo cual indicaba que eran jóvenes.
- Se le retiraron las hojas que presentaban necrosis
- Se verificó que tuvieran un buen espesor radicular (raíces, tubérculos, bulbos y rizomas), como se muestra en la figura 5.

Figura 7. Planta experimental.



Fuente: Autores

Para llevar a cabo el experimento que se plantea en esta investigación, las plantas seleccionadas fueron transportadas al parque tecnológico de la Universidad de San Buenaventura, el cual cuenta con techo, ventilación adecuada y entrada de rayos solares a condiciones ambientales de la ciudad de Cartagena:

- Temperatura media de 30°C.
- Humedad relativa promedio de 85%.
- Presión de 1 atm.

### 3.9.2. Materiales y métodos

Para el proceso investigativo, se utilizaron 10 recipientes de vidrio de 30 cm de alto, 30 cm de ancho y 20 cm de profundidad, con un volumen de agua potable de 7 litros cada uno, más un litro con la disolución de Cromo. Para analizar el comportamiento de las plantas bajo diferentes escenarios, los diez recipientes de vidrio fueron divididos en 4 grupos:

El grupo 1 estuvo conformado por 3 recipientes de vidrio con dos plantas Taruya en cada uno de ellos, y se le agregó una concentración de 1,2 ppm de cromo.

El grupo 2 estuvo conformado por 3 recipientes de vidrio con dos plantas Taruya en cada uno de ellos, más una concentración de 1,5 ppm de cromo.

El grupo 3 estuvo conformado por 3 recipientes de vidrio con dos plantas Taruya en cada uno de ellos, más una concentración de 1,8 ppm de cromo.

El grupo 4 estuvo conformado por 1 recipiente de vidrio que no contenía plantas en su interior, con 7 litros de agua potable, más una concentración de 1,5 ppm de cromo.
Este último grupo se designa como medida de control en condiciones ambientes, para saber si hay pérdida de la sustancia contaminante, en este caso de Cromo.

Con base a estudios recientes de Biorremediación con plantas [9] se decidió llevar a cabo el experimento en 17 días, comprendidos en 3 fases: adaptación, nutrición e intoxicación.

Tabla 7. Cuadro de labor.

| Grupos | Muestra | Vol. $H_2O$ | Disolución Cr. | No. Plantas |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 7 litros | 1,2 | 2 Taruyas |
| | 2 | 7 litros | 1,2 | 2 Taruyas |
| | 3 | 7 litros | 1,2 | 2 Taruyas |
| 2 | 4 | 7 litros | 1,5 | 2 Taruyas |
| | 5 | 7 litros | 1,5 | 2 Taruyas |
| | 6 | 7 litros | 1,5 | 2 Taruyas |
| 3 | 7 | 7 litros | 1,8 | 2 Taruyas |
| | 8 | 7 litros | 1,8 | 2 Taruyas |
| | 9 | 7 litros | 1,8 | 2 Taruyas |
| 4 | 10 | 7 litros | 1,5 | 0 Taruyas |

Fuente: autores, (2016).

### 3.9.3. Fase de adaptación

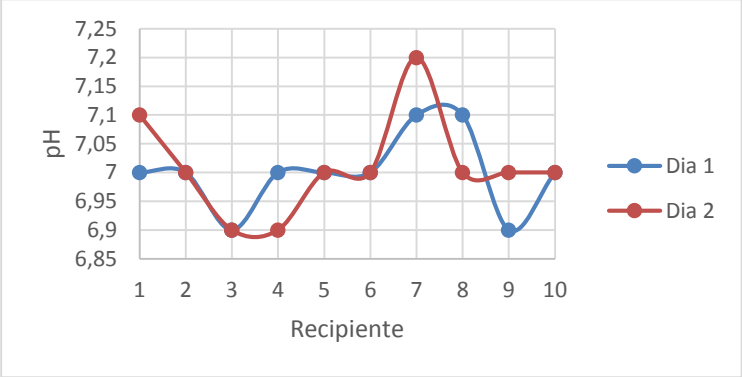
Esta fase tuvo una duración de 2 días, debido a la rápida capacidad que tienen las especies acuáticas Taruya de adaptarse al medio. Después de seleccionar las plantas e introducir dos de ellas por cada recipiente (figura 7), se llevó a cabo un proceso de monitoreo y control del pH y la conductividad electrolítica del agua (medida con un conductivimetro).

Figura 8. Especies en fase de adaptación.

Fuente: autores

El pH como medida de acidez o alcalinidad del medio acuático, controla las reacciones químicas que determinan si los nutrientes van a estar o no disponibles para la absorción de las plantas, por tal motivo, se sugiere un rango óptimo de pH para cada especie de plantas que mantenga a los nutrientes en su máximo nivel de solubilidad [44]. Como se observa en el grafico 1, el pH se mantuvo en un rango de 6.9 a 7.2, siendo un rango óptimo para las plantas, ya que un pH más ácido las marchitaría.

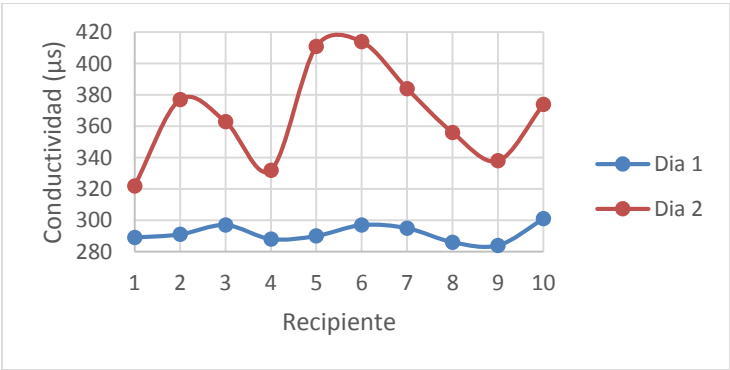
Grafico 1. pH.




Fuente: autores, (2016).

Por otro lado, la conductividad como medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica y la concentración de sales solubles, debe mantenerse en un rango optimo que facilite el manejo de la fertilización y evite problemas de fitotoxicidad en las plantas [44]. En el grafico 2 se observa que la conductividad se mantuvo entre 284 y 414 µs durante el experimento, presentando un rango óptimo, ya que el Jacinto de agua no soportaría altos valores de conductividad, puesto que se vería enfrentado a una alta concentración de sales que no podría tolerar y que afectarían su crecimiento debido al estrés salino que inhibe la división celular y la expansión de la planta.

Grafico 2. Conductividad.




Fuente: autores, (2016).

### 3.9.4. Fase de nutrición

Esta fase tuvo una duración de 5 días, contados después de la fase de adaptación. Durante los 5 días, a las plantas se les agregó un fertilizante líquido llamado Flourish Excel para estimular su crecimiento ya que según sus fabricantes Seachem este no modifica ni el pH ni la conductividad. (Ver anexo 1) El fertilizante contiene los siguientes nutrientes:

Tabla 8. Nutrientes del fertilizante Flourish Excel.

| **Nutriente** | **Cantidad** |
|---|---|
| Total nitrógeno | 0,07% |
| Fosfato disponible (P205) | 0,01% |
| Potasio soluble | 0,37% |
| Calcio (Ca) | 0,14% |
| Magnesio (Mg) | 0,11% |
| Azufre (S) | 0,2773% |
| Cloro (Cl) | 1,15% |
| Cobalto (Co) | 0,0004% |
| Cobre (Cu) | 0,0001% |
| Hierro (Fe) | 0,32% |
| Manganeso (Mn) | 0,0118% |
| Molibdeno (Mo) | 0,0009% |
| Sodio (Na) | 0,13% |
| Zinc (Zn) | 0,0007% |

Fuente: Fichas internacionales de seguridad química, (2016).

### 3.9.5. Fase de intoxicación

Después de los 7 días distribuidos entre adaptación y nutrición, comienza el proceso de intoxicación y contaminación de los 10 recipientes, a los cuales se les agregó diferentes concentraciones de Cromo como se muestra en la tabla 5.

### 3.9.6. Reactivo

El reactivo utilizado durante la etapa de intoxicación fue el trióxido de Cromo $CrO_3$, un compuesto inorgánico de aspecto cristalino, rojo oscuro/naranja que se disuelve en el agua y que puede ser perjudicial para la salud. Suele ser altamente dañino para los organismos acuáticos, su masa molecular es de $99{,}99\ ^{g}/_{mol}$ y está compuesto en un 48% por Oxigeno y un 52% por Cromo.

Tabla 9. Peso atómico del trióxido de cromo.

| Elemento | Peso atómico | total |
|---|---|---|
| Cr | 51,99 | 51,99 |
| O | 16 | 48 |

Fuente: Fichas internacionales de seguridad química, (2016).

### 3.9.7. Cálculos

Para obtener la masa total de cromo que se agregó en cada recipiente se utilizó la fórmula de partes por millón (ppm):

$$\boldsymbol{ppm = \frac{masa\ sustancia(mg)}{volumen\ total(L)}}$$

Despejando masa sustancia.

$$\boldsymbol{masa\ sustancia(mg) = ppm * volumen\ total(L)}$$

Para los primeros 3 recipientes donde se desea una concentración de 1,2 ppm se halla la masa de cromo necesaria para los 8 litros de solución de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{(1) masa\ cromo = ppm * volumen\ total}$$

$$\boldsymbol{(1) masa\ cromo = 1,2\ ppm * 8\ l}$$

$$\boldsymbol{(1) masaCromo =}\textbf{9,6mg}$$

Estos serían los gramos del compuesto Cr$O_3$ en donde el Cr solo se encuentra a 52%.
Para obtener solo los gramos del Cr realizamos la respectiva conversión.

$$9{,}6\ mg * \frac{100\%}{52\%}$$

**18,5 mg de Cr**

Para el siguiente grupo de recipientes se realiza el mismo procedimiento, con una concentración de 1,5 ppm

$$(\mathbf{2})\boldsymbol{masa\ cromo} = \boldsymbol{ppm} * \boldsymbol{volumen\ total}$$

$$(\mathbf{2})\boldsymbol{masa\ cromo} = \mathbf{1,5}\ \boldsymbol{ppm} * \mathbf{8}\ \boldsymbol{l}$$

$$(\mathbf{2})\boldsymbol{masaCromo} = \mathbf{12,0\ mg}$$

Para hallar solo los gramos del Cr realizamos la conversión

$$1{,}2\ mg * \frac{100\%}{52\%}$$

**23,0 mg de Cr**

Para el último grupo de recientes se realizaron los cálculos con una concentración de 1,8ppm.

$$(\mathbf{3})\boldsymbol{masa\ cromo} = \boldsymbol{ppm} * \boldsymbol{volumen\ total}$$

$$(\mathbf{3})\boldsymbol{masa\ cromo} = \mathbf{1,8}\ \boldsymbol{ppm} * \mathbf{8}\ \boldsymbol{l}$$

$$(\mathbf{3})\boldsymbol{masaCromo} = \mathbf{14,4\ mg}$$

Luego de la conversión:

$$14{,}4\ mg * \frac{100\%}{52\%}$$

**27,7 mg de Cr**

Finalmente, para el recipiente de control se realiza una adición de cromo a una concentración de 1,5 dando como resultado:

$$(4)\boldsymbol{masa\ cromo = ppm * volumen\ total}$$

$$(4)\boldsymbol{masa\ cromo = 1,5\ ppm * 8\ l}$$

$$(4)\boldsymbol{masaCromo =}\textbf{12,0 mg}$$

Luego de la conversión:

$$12{,}0\ mg * \frac{100\%}{52\%}$$

**23,0 mg de Cr**

En caso de que hubiese pérdida de cromo por algún factor externo, se supondría que ocurre en todos los recipientes en la misma medida.

### 3.9.8. Método de control

Inicialmente se recogieron 4 muestras de 280cm$^3$ para verificar si tenían las mismas condiciones que al inicio del experimento. Después de 10 días se recolectó del recipiente de control una muestra de 280 cm$^3$, tratando de no revolver el contenido, la cual mostraría el porcentaje de perdida de cromo por factores externos, como la humedad, la temperatura o la presión atmosférica. Al instante se recogen muestras de 280cm$^3$ de los 9 recipientes para observar la variación en sus concentraciones de cromo y, para no alterar los resultados del experimento, el mismo día se extraen 3 litros de agua de cada recipiente para realizar el análisis de DQO y $DBO_5$.

# 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 4.1. RESULTADOS

A partir del tercer día de la fase de intoxicación se observó necrosis en las hojas de algunas plantas, evidenciando la muerte prematura de las células de sus tejidos; lo que se supone es causado por la exposición al cromo. Durante los 17 días que tomó el experimento, se observó la evaporación del agua contenida en los recipientes, de tal forma que se percibieron pérdidas cercanas a los 500 ml en los diferentes recipientes.

En cuanto al recipiente de control, se observaron variaciones en la concentración de cromo, puesto que al iniciar el proceso de intoxicación se le agregó una concentración de 1,5 ppm de cromo y al finalizar el décimo día de intoxicación, se encontró una disminución del 21% en términos de sedimentación en las paredes del recipiente, quedando con una concentración de 1,18 ppm de la sustancia; demostrando que durante el experimento hubo factores externos que participaron en la eliminación o depuración del contaminante.

Con el análisis de las recolecciones de agua se obtuvo el total de las concentraciones finales de cromo en cada recipiente en mg/L, como se muestra en la tabla 8.

Tabla 10. Concentración final de cromo en mg/l.

| Recipiente | Taruya (concentración 1,2 mg/L inicial) | Taruya (concentración 1,5 mg/L inicial) | Taruya (concentración 1,8 mg/L inicial) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,2085 | 0,1102 | 0,2815 |
| 2 | 0,1583 | 0,1836 | 0,2133 |
| 3 | 0,1232 | 0,1303 | 0,2417 |

Fuente: Autores, (2016).

Se encuentra una pérdida de cromo del 21%, lo que indica que el cromo que puede ser absorbido es del 79%.

**Porcentaje de absorción con relación a la concentración inicial.**

Tabla 11. Porcentaje de absorción con relación a la concentración inicial.

| Recipiente | Taruya(concentración 1,2 mg/L inicial) | Taruya(concentración 1,5 mg/L inicial) | Taruya(concentración 1,8 mg/L inicial) |
|---|---|---|---|
| 1 | 61,62 | 71,65 | 63,36 |
| 2 | 65,80 | 66,76 | 67,15 |
| 3 | 68,73 | 70,31 | 65,57 |

Fuente: Autores, (2017).

## 4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se escogió el diseño estadístico (DCA) con un solo, factor tres niveles y una variable de respuesta, como se observa en la tabla 12.

Tabla 12. DCA.

| Variable de entrada | Unidad | Niveles | Respuesta de variables |
|---|---|---|---|
| Concentración inicial de cromo | Concentración | ▪ Tratamiento a 1,2 ppm<br>▪ Tratamiento a 1,5 ppm<br>▪ Tratamiento a 1,8 ppm | Concentración final de cromo |

Fuente: Autores, (2017).

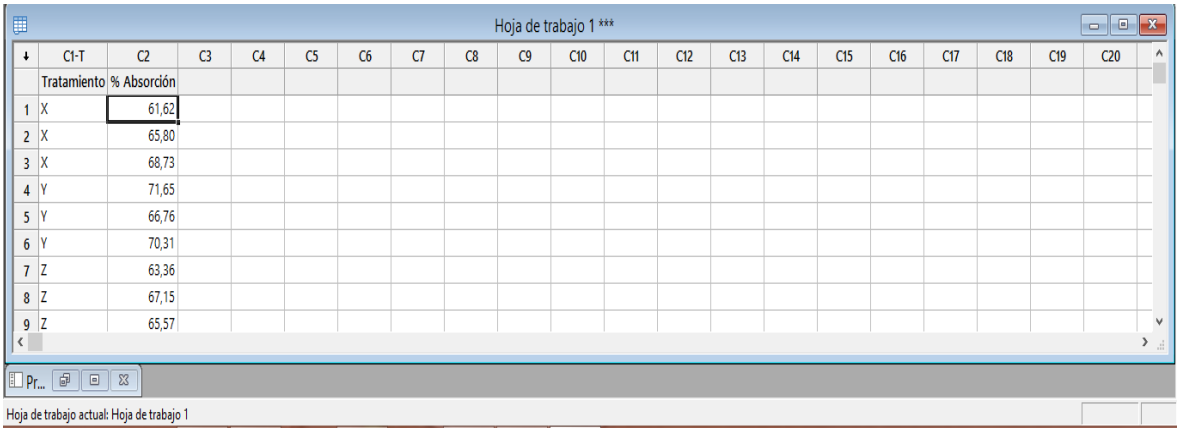
Se utiliza el programa Minitab 17 para validar las hipótesis, utilizando la función ANOVA de variancia de un solo factor, en donde la primera columna representan los tratamientos a diferentes concentraciones iniciales (C1-T) y en la segunda el porcentaje de absorción del cromo de cada uno de los tratamientos (C2), como se muestra en la figura 9, donde:

- X: Tratamiento a concentración de cromo inicial de 1,2 ppm.
- Y: Tratamiento a concentración de cromo inicial de 1,5 ppm.
- Z: Tratamiento a concentración de cromo inicial de 1,8 ppm.

Hipótesis:

- Ho: Todas las medidas son iguales
- Ha: Por lo menos una medida es diferente

Figura 9.




| | C1-T | C2 |
|---|---|---|
| | Tratamiento | % Absorción |
| 1 | X | 61,62 |
| 2 | X | 65,80 |
| 3 | X | 68,73 |
| 4 | Y | 71,65 |
| 5 | Y | 66,76 |
| 6 | Y | 70,31 |
| 7 | Z | 63,36 |
| 8 | Z | 67,15 |
| 9 | Z | 65,57 |

Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|---|---|---|---|---|---|
| C1 | 2 | 35,31 | 17,654 | 2,33 | 0,179 |
| Error | 6 | 45,55 | 7,592 | | |
| Total | 8 | 80,86 | | | |

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|---|---|---|---|
| 2,75544 | 43,66% | 24,89% | 0,00% |

Medias

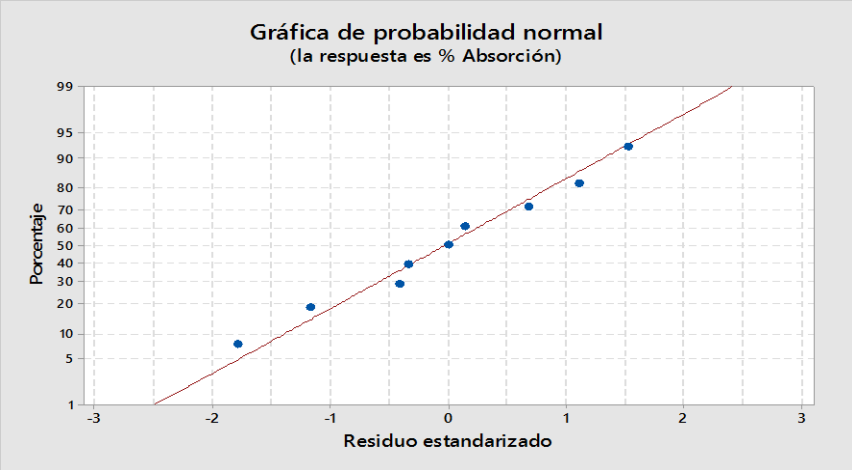
| C1 | N | Media | Desv.Est. | IC de 95% |
|---|---|---|---|---|
| X | 3 | 65,38 | 3,57 | (61,49. 69,28) |
| Y | 3 | 69,57 | 2,53 | (65,68. 73,47) |
| Z | 3 | 65,36 | 1,90 | (61,47. 69,25) |

Desv.Est. agrupada = 2,75544

Según los resultados de esta investigación los tratamientos son altamentes significativos, y nos muestran que los datos no están tan dispersos por lo que se acepta la hipótesis nula (Ho), es decir, que existe una diferencia entre los tratamientos y por consiguiente si hay absorción de cromo.

Con los siguientes gráficos podemos comprobar la aceptación de la hipótesis nula (Ho).

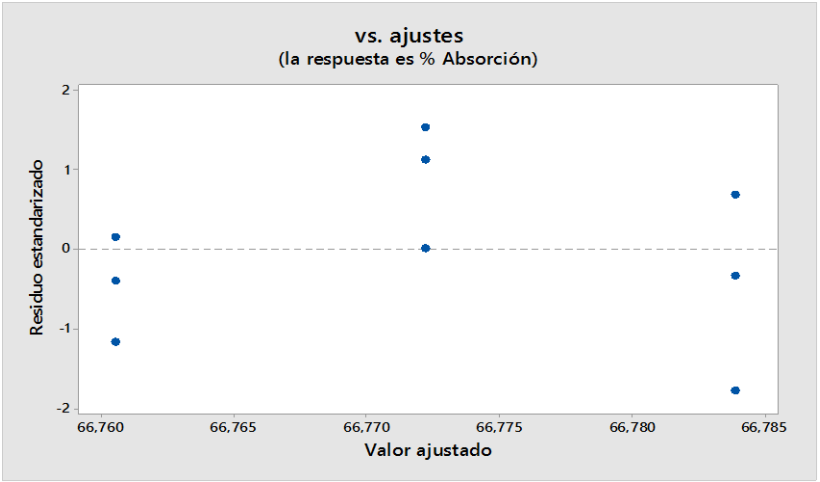
Grafico 3. Probabilidad de concentración final de cromo.




Fuente: autores.

En la gráfica 3 observamos un modelo de representación lineal que nos muestra la correlación directa entre la variable concentración a diferentes condiciones con respecto al residuo estandarizado (concentraciones iniciales de cromo), es decir, los valores de residuo estandarizados se vinculan con los valores de porcentaje de absorción. Esto nos permite predecir el valor porcentaje de absorción que tendrá la taruya al variar la concentración de cromo inicial en el recipiente.

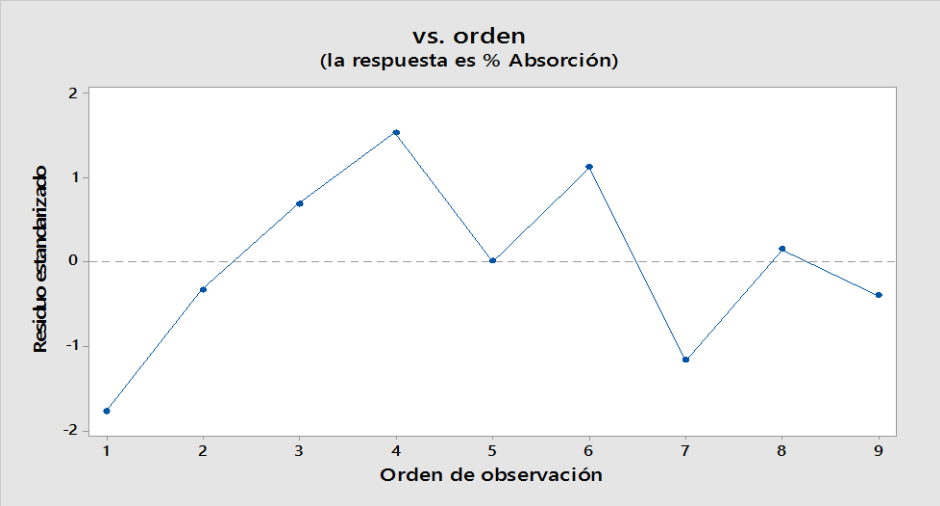
Grafico 4. Valores de ajustes.




Fuente: autores.

En el grafico 4 los valores de la concentración alejados de su media tienden a acercar la recta hacia ellos (efecto palanca), provocando que los residuos tengan una tendencia a ser menores para valores de x extremos, es decir, que si los valores de concentración están lejos de su promedio la varianza de los residuos será pequeña y el valor ajustado estará cerca del valor observado por efecto palanca.

Grafico 5. Valores de orden.




Fuente: autores

En la gráfica 5 de residuos Vs orden de observaciones se aprecia que los residuos no presentan un patrón, están distribuidos de manera aleatoria lo que implica que son independientes (no correlacionados), es decir, que el orden de la toma de muestra no altera el error de predicción del análisis de regresión.

# 5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los anteriores resultados y su posterior análisis se pudo inferir que:

- La Taruya (*Eichhornia Crassipes)* presenta características propias de la clase macrófitas, que permite su uso como agente de biorremediación en aguas contaminadas por Cromo (VI). Hecho que se evidencia por la reducción de concentración de cromo en el agua al final del tratamiento, mostrando una reducción promedio de 65,38%, 69,57% y 65,36 para las concentraciones iniciales de 1,2 ppm, 1,5 ppm y 1,8 ppm respectivamente

- La capacidad de absorción de metales en la Taruya se favorece debido al alto porcentaje de Celulosa en las raíces y tallos y por la presencia de grupos hidroxilos que posibilitan la formación de puentes de hidrogeno con sustancias externas. Llevándose a cabo la acumulación de metales pesados por biosorción al interior de la célula para su difusión como ion metálico por la membrana celular.

- Los ensayos fueron dirigidos específicamente a corroborar el grado de contaminación en el agua después de utilizar la técnica de fitorremediación, sin embargo también debe ser considerado el grado de contaminación de la especie vegetal, lo cual dará la eficiencia de absorción.

# 6. RECOMENDACIONES

Prolongar el tiempo de intoxicación ya que la *Eichhornia crassipes* tiene una gran capacidad de resistir la concentración de cromo, y así poner a prueba los límites de esta.

Diseñar un sistema de recirculación del agua después de ser sometida a la fitorremediación con la Taruya *(Eichhornia Crassipes)* evitando la sedimentación y facilitando la absorción.

Buscar alternativa para el manejo de la especie vegetal contaminada una vez se finalice el proceso de fitorremediación.

Las industrias que produzcan agua con cromo pueden implementar la fitorremediación mediante el uso de la *Eichhornia Crassipes,* como mitigación del impacto ambiental por contaminantes a los cuerpos de agua.

Realizar análisis más exhaustivos a la especie vegetal para determinar su capacidad real de absorción.

## REFERENCIAS


[1] R. Á. Núñez, “Técnicas in vitro para biorremediación de cromo y plomo”, Tesis de Pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago-Costa Rica, 2007.

[2] D. S. Guevara Zumárraga, “Biorremoción de cromo (cromo total y cromo VI) en agua sintética por dos inóculos bacterianos nativos compuestos, a escala de laboratorio”, Tesis de Pregrado, ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO, SANGOLQUÍ-ECUADOR, 2010.

[3] A. E. Delgadillo-López, C. A. González-Ramírez, F. Prieto-García, y J. R. Villagómez-Ibarra, “Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación”, *2011*, vol. 14, núm. 1, pp. 597–612, ene. 2011.

[4] J. Martelo, “Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte”, *bianual*, vol. 8, núm. 15, pp. 221–243, jun. 2012.

[5] G. N. J. Luna, “Cambios en la composición del lirio acuático (Eichhornia crassipes) debidos a su grado de madurez y a su transformación biotecnológica”, Tesis de Pregrado, Instituto politécnico nacional, México D.F., 2011.

[6] A. Franek, E. Koncagul, R. Connor, y D. Hunziker, “Agua para un mundo sostenible Datos y Cifras”, WWDR-UNESCO, Corombella-Perusa-Italia, informe de desarrollo, 2015.

[7] “metales pesados | Facsa Ciclo Integral del Agua”, *Metales pesados*, 06-nov-2017. [En línea]. Disponible en: http://www.facsa.com/el-agua/calidad/Metales%20pesados#.WT3mFes1_IU. [Consultado: 12-jun-2017].

[8] H. G. Ortiz-Cano, R. Trejo-Calzada, R. D. Valdez-Cepeda, J. G. Arreola-Ávila, A. Flores-Hernández, y B. López-Ariza, “Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando Quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas”, *Revista Chapingo Serie Horticultura*, vol. 15, núm. 2, pp. 161–168, 2009.

[9] O. Arrieta, A. Rivera, L. Arias, B. Rojano, O. Ruiz, y S. Cardona, “Biorremediación de un suelo con diésel mediante el uso de microorganismos autóctonos”, *Mayo 2012*, vol. 15, núm. 1, pp. 27–40, may 2012.

[10] A. J. Idrovo, “Diagnostico de salud Ambiental”, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, Colombia, 2012.

[11] D. J. Bentivegna, G. Tucat, y J. F. Fabián Daddario, “Plantas Invasoras”, *Boletín Electrónico Cerzos*, 05-abr-2017. [En línea]. Disponible en: http://www.boletin.cerzos-conicet.gob.ar/index.php/articulos/plantas-invasoras. [Consultado: 05-abr-2017].

[12] “Catálogo español de especies exóticas invasoras”, Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, España, 2014.

[13] U. San-Buenaventura, *PROYECTO EDUCATIVO BONAVENTURIANO*, Segunda. Bogotá-Colombia: Bonaventuriana, 2010.

[14] M. Jumbo y E. Campoverde, “Fitorremediación Mediante el uso de dos Especies Vegetales lemna minor (lenteja de agua) y Eichhornia crassipes (Jacinto de agua) en Aguas Residuales Producto de la Actividad Minera”, Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador, 2012.

[15] N. I. S. Asprilla, “Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver (vetiveria zizainodes)”, Tesis de Magister, UNIVERSIDAD DE MANIZALES, Manizales-Colombia, 2013.

[16] M. C. R. Lizcano, “Estudio de la biorremediación como una alternativa en la mitigación de la contaminación ambiental”, Tesis de Especialización, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-Colombia, 2004.

[17] D. C. Ñ. Cuartas, “Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible”, Tesis de Magister, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira-Colombia, 2012.

[18] E. de M. Beascoechea, J. de M. Muñoz, y M. D. Curt, *Manual de fitodepuración, filtros de macrófitas en flotación*, 1a ed., vol. 1, 1 vols. Madrid-España: Ayuntamiento de Lorca, 2014.

[19] V. Lallana y M. María, “Biología florar de Eichhornia Crassipes (Mart.) Solms. en el rio Parana Medio”, *1980*, vol. 1, núm. 11, pp. 73–81, 1980.

[20] J. M. Oliva Domínguez, “Efectos de los productos de degradación originados en la explosión por vapor de biomasa de chopo sobre *Kluyveromyces Marxianus*”, Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid, Madrid-España, 2003.

[21] I. L. B. Pacheco, “Evaluación de la distribución de metales pesados en las platas acuáticas Jacinto de agua (Eichhornia Crassipes) y Tul (Thypa Spp) utilizadas en la planta de tratamiento de aguas residuales La Cerra, Villa Canales por medio de fluorescencia de rayos x”, Tesis de Maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2008.

[22] ArgenBio, “El cuaderno”, *El Cuaderno de Por qué Biotecnología*, 11-jun-2017.
.
[23] B. Asher, “Tratamiento de aguas residuales: procesos Extensivos (naturales) e intensivos (mechanicos)”. 2016.

[24] R. O. Carpena y M. P. Bernal, “Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos”, *2007*, vol. 16, núm. 2, pp. 1–3, may 2007.

[25] J. A. Posada García y M. T. López Muñoz, “Plantas Acuáticas del Altiplano del Oriente Antioqueño”. Universidad Católica de oriente, 2011.

[26] M. Chávez-Sifontes y M. E. Domine, “Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial”, *Av. cien. Ing*, vol. 4, núm. 4, pp. 15–46, dic. 2013.

[27] M. K. M. Romero, D. A. M. Igua, y Y. H. S. Boyacá, “Evaluación de un sistema de biorremediación de aguas residuales porcicolas en la finca El Porvenir, vereda Suncunchoque, sector la Laja, Ubate-Cundinamarca, y su reutilización con fines agroambientales”, Tesis de Pregrado, Corporación Universitaria minuto de Dios, Cundinamarca-Colombia, 2015.

[28] D. N. López Jerves, “Aprovechamiento del lechuguín (‘Eichhornia Crassipes’) para la generación de abono orgánico mediante la utilización de tres diseños diferentes de biodigestores”, Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador, 2012.

[29] C. G. J. Castro y C. M. P. Jiménez, “Remoción de contaminantes inorgánicos de aguas residuales industriales con Eichhornia Crassipes o Jacinto de agua”, Universidad de Guayaquil, Guayaquil-Ecuador, 2010.

[30] T. F. Daniel y S. A. Castellanos, “Flora del bajío y de regiones adyacentes”. Instituto de Ecología, nov-2003.

[31] R. Hernández, “Nutrición mineral de las plantas”, *Nutrición mineral de las plantas*, 11-jun-2017. [En línea]. Disponible en: http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral/. [Consultado: 12-jun-2017].

[32] J. López, O. García, J. Grima, B. J. Ballesteros, y M. Pérez, “Técnicas de biorremediación in situ en acuíferos contaminados por metales pesados”. Instituto Geológico y Minero de España.

[33] D. L. Vullo, “Microrganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente”, *Química Viva*, vol. 3, núm. 2, pp. 93–104, 2003.

[34] G. C. Delgado, “Nanotecnología y la disponibilidad de energía y agua en los países del Sur”. .

[35] R. ul H. A.R.-Shakoori, “Microbiological treatment of industrial wastes containing toxic chromium involving successive use of bacteria, yeast and algae”,

*World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 14, núm. 4, pp. 583–585, 1998.

[36] H. J. Soto, “Potencial contaminación por cromo en el proceso de refinación del petróleo”, Tesis de Pregrado, Universidad nacional mayor de San Marcos, Lima-Perú, 2006.

[37] J. F. Gutiérrez y C. Cervantes, “Interacciones microbianas con el cromo: mecanismos y potencial biotecnológico”, *concyteg*, vol. 37, núm. 3, 2008.

[38] M. A. Hossain, M. Kumit, Y. Michigami, y S. Mori, “Optimization of Parameters for Cr (VI) Adsorption on Used Black Tea Leaves”, *Adsorption*, vol. 11, núm. 5, pp. 561–568, 2005.

[39] L. Morales-Barrera, F. de M. Guillén-Jiménez, A. Ortiz-Moreno, y T. L. Villegas-Garrido, “Isolation, identification and characterization of a Hypocrea tawa strain with high Cr (VI) reduction potential”, *Biochemical Engineering Journal*, vol. 40, núm. 2, pp. 284–292, jun. 2008.

[40] L. Figueroa, M. J. Amoroso, P. M. Fernández, y L. B. Villegas, “Chromate removal by yeasts isolated from sediments of a tanning factory and a mine site in Argentina”, *Biometals*, vol. 21, núm. 5, pp. 591–600, jun. 2008.

[41] T. Srinath, T. Verma, y P. W. Ramteke, “Chromium (VI) biosorption and bioaccumulation by chromate resistant bacteria”, *Chemosphere*, vol. 48, núm. 4, pp. 427–435, jul. 2002.

[42] Tamayo y M. Tamayo, *El Proceso De La Investigacion Cientifica*, Cuarta. México: Limusa, 2005.

[43] R. H. Sampieri, C. Fernández-Collado, y P. B. Lucio, *Metodología de la investigación*, Cuarta. Iztapalapa, México D.F.: Mc. Graw Hill, 2006.

[44] L. A. Barbaro, M. Karlanian, y D. A. Mata, “Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas”. Ministerio de agricultura, ganadería y pesca, 21-oct-2014.

# ANEXOS

Anexo 1. Fertilizante Flourish Excel.

Fuente: autores, (2017).

Anexo 2. Información del trióxido de cromo.

## Trióxido de Cromo

Trióxido de Cromo o Chromium trioxide esta en stock. Exportamos el Trióxido de Cromo a nivel mundial.
Por favor haga clic aquí para su oferta

### Descripción del producto Trióxido de Cromo

El trióxido de Cromo es un compuesto inorgánico de formula $CrO_3$. Es el anhídrido acido del acido cromico, y algunas veces es comercializado con ese nombre.

### Información del producto

El trióxido de Cromo(VI) ó Acido crómico anhidro es un sólido escamoso naranja-rojizo oscuro con matices marrones. Se producen anualmente millones de kilogramos, principalmente para la metalización por hidrólisis

### Detalles del producto

| Cromo(VI)trioxido | Número CAS : 1333-82-0 | Número EC: 215-607-8 |

### Información de seguridad

Nota! El Trióxido de cromo es una substancia peligrosa y puede dañar tu salud y el medio ambiente si se utilize erroneamente. Siempre examinar los símbolos de aplicación y las Fichas de Datos de Seguridad. Sólo para uso proffesional!

### Símbolos de peligro

### MSDS Sumario

| | |
|---|---|
| Palabra Clave | Peligro |
| Indicadores de peligro | H271, H301, H310, H314, H317, H330, H334,H340, H350,H361,H372, H410 |
| Indicadores de precaución | P202, P280, P308+P313, 501, P302+P352, P301+330+331, P304+P340, P305+P351+P338 |
| ADR / IMO / IATA | 5.1 + 6.1 + 8 UN1463 |

## Calidad

Nuestro Chrmium trioxide tiene un mínimo de 99,7 % $CrO_3$, con muy pocas impurezas. El material está en forma de escamas

## Regulación REACH EC 1907/2006

Gentrochema BV tiene el registro total REACH para el Trioxido de cromo. Están a disposición de los todos clientes una Ficha de Datos de Seguridad más amplia (e-SDS) ó una Valoración Química de la Seguridad. (Website ECHA)

Fuente: Gentrochema, (2017).

Anexo 3. Foto trióxido de cromo.

Fuente: Gentrochema, 2017