

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE *Eichhornia Crassipes* EN LA
REMOCIÓN DE HIERRO TOTAL DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL
LABORATORIO DE AGROBIOTECNOLOGIA DEL CBC, SENA VIA A LA PAZ -
CESAR**



Estudiantes que elaboran este proyecto:

GINA PAOLA MEZA SOTO

IVAN DAVID PEÑA MEJIA

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR**

2019

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE *Eichhornia Crassipes* EN LA
REMOCIÓN DE HIERRO TOTAL DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL
LABORATORIO DE AGROBIOTECNOLOGIA DEL CBC, SENA VIA A LA PAZ -
CESAR**



Estudiantes que elaboran esta proyecto:

GINA PAOLA MEZA SOTO

IVAN DAVID PEÑA MEJIA

Director:

WALNER ENRIQUE LOPEZ MENA

Asesor:

ALEXANDER VERA VELASQUEZ

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR**

2019

Dedicatoria

Iván David Peña

Esta tesis está dedicada a mis padres Pedro Peña y Norelys Mejía, quienes con su amor, apoyo y esfuerzo, me han permitido culminar esta etapa de mi vida y cumplir con mi propósito de ser un ingeniero ambiental y sanitario. Gracias por estar siempre para mí cuando más lo necesitaba.

A mi tía Roció Mejía por su cariño y apoyo incondicional durante todo este proceso. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Gina Meza Soto

Esta tesis la dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres Fabián Meza y Rudys Soto, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

Así mismo a toda mi familia, con especial cariño a mis tías Rocío Martínez, Celina Martínez y María Beatriz Meza, por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

Agradecimientos

Queremos agradecer primeramente a Dios por todas las bendiciones derramadas sobre nosotros. Al Ing. Walner López por sus enseñanzas y por podernos guiar durante todo el desarrollo de nuestra tesis. Agradecemos también al Ing. Alexander Vera por su compromiso y apoyo incondicional en el asesoramiento de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	11
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2 JUSTIFICACION	16
3 OBJETIVOS	18
3.1 OBJETIVO GENERAL	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4 MARCO REFERENCIAL	19
4.1 ANTECEDENTES	19
4.2 MARCO TEORICO	21
4.2.1 Tratamiento de aguas residuales	21
4.2.2 Tipos de tratamiento de aguas residuales	21
4.2.3 Macrofitas acuáticas	24
4.2.4 Eichhornia crassipes	25
4.2.5 Fitorremediacion	28
4.2.6 Mecanismo de acumulación de metales en las plantas	30
4.3 MARCO CONTEXTUAL	31
4.4 MARCO CONCEPTUAL	32
4.5 MARCO INSTITUCIONAL	33
4.5.1 Misión	34
4.5.2 Visión	34
4.6 MARCO LEGAL	34
5 HIPÓTESIS	37
6 METODOLOGÍA	38
6.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	38
Línea de Investigación.	38
6.2 POBLACIÓN Y MUESTRA.	38
6.3 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA	38
6.3.1 Programa De Monitoreo.	39
6.3.2 Caracterización del agua residual	39
6.4 DETERMINACIÓN DE HIERRO EN LA MUESTRA DE AGUA	40
6.4.1 Preservación de la Muestra.	40

6.4.2	Preparación de la curva de calibración	41
6.5	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
6.5.1	Diseño de humedal artificial a escala piloto.....	42
6.5.2	Descripción del experimento.....	43
6.5.3	Programa de selección y adaptación de las especies vegetales.....	44
6.6	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN.....	44
6.6.1	Determinación de hierro en la planta.....	44
6.6.2	Concentración de Hierro Precipitado	45
6.6.3	Porcentaje De Remoción	45
6.6.4	Método de Análisis estadístico.	46
7	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	47
7.1	RESULTADOS AFLUENTE	47
7.2	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	47
7.2.1	Diseño del humedal artificial	47
7.2.2	Construcción del humedal artificial	50
7.3	SELECCIÓN Y ADAPTACIÓN DE ESPECIES VEGETALES.....	52
7.4	DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	53
7.4.1	TRATAMIENTO M1: Humedal artificial sin individuos (control).....	53
7.4.2	TRATAMIENTO M2: 100% Eichhornia crassipes adultas.	55
7.4.3	TRATAMIENTO M3: 50% Eichhornia crassipes adultas + 50% Eichhornia crassipes juveniles.....	57
7.4.4	TRATAMIENTO M4: 100% Eichhornia crassipes juveniles.....	58
7.5	DETERMINACIÓN DE HIERRO EN LA PLANTA	61
7.6	DETERMINACION DE HIERRO TOTAL PRECIPITADO.....	62
7.7	PORCENTAJE DE REMOCIÓN	63
7.8	ANALISIS ESTADISTICO	63
7.8.1	Análisis estadístico hierro total.....	63
7.8.2	ANALISIS ESTADISTICO DQO.....	66
CONCLUSIONES		69
RECOMENDACIONES		70
BIBLIOGRAFÍA		71
ANEXOS		76
A.	CARACTERIZACION DEL AGUA RESIDUAL	76

Preparación curva de calibración HIERRO TOTAL (mg/L).....	76
Preparacion curva de calibracion DQO (mg/L)	77
B. Registro fotográfico, procedimientos en el laboratorio.	78
Registro Fotográfico, Evolución de las plantas.	80

INDICE FIGURAS

Figura 1. Formas de las plantas acuáticas.....	24
Figura 2. Morfología de <i>Eichhornia crassipes</i>	26
Figura 3. Tallos de <i>Eichhornia crassipes</i>	27
Figura 4. Tipos de Fitorremediación.....	29
Figura 5. Ubicación Espacial zona de estudio.....	31
Figura 6. Estructura del humedal artificial.	43
Figura 7. Construcción del humedal.....	50
Figura 8. pH en función del tiempo.....	51
Figura 9. Temperatura del agua en función del tiempo	51
Figura 10. <i>Eichhornia</i> en adaptación, estanque piscícola.	53
Figura 11. Humedal artificial sin individuos.	53
Figura 12. Humedal artificial con <i>Eichhornia</i> adulta.	55
Figura 13. <i>Eichhornia crassipes</i> adulta vs <i>Eichhornia crassipes</i> joven.	57
Figura 14. Humedal con tratamiento M3.	57
Figura 15. Concentración de hierro total en función del tiempo	60
Figura 16. Concentración de DQO en función del tiempo	60
Figura 17. Curva de calibración hierro total.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Plantas hiperacumuladoras	30
Tabla 2. Concentraciones de reactivos para curva patrón	41
Tabla 3. Criterios EPA.....	42
Tabla 4. Dimensiones del humedal artificial.	43
Tabla 5. Caracterización en el afluente.	47
Tabla 6. Valores Operacionales.	52
Tabla 7. Selección de individuos	52
Tabla 8. Porcentaje de remoción tratamiento M1.....	54
Tabla 9. Porcentaje de remoción tratamiento M2.....	56
Tabla 10. Porcentaje de remoción tratamiento M3.....	58
Tabla 11. Porcentaje de remoción tratamiento M4.....	59
Tabla 12. Determinación de hierro en la planta.....	61
Tabla 13. Acumulación de hierro en la planta	62
Tabla 14. Determinación de hierro total precipitado	62
Tabla 15. Porcentaje de remoción por tratamiento.....	63
Tabla 16. Análisis de varianza, hierro total.....	64
Tabla 17. Análisis de los tratamientos por Tukey	64
Tabla 18. Análisis de los tratamientos por Fisher.....	65
Tabla 19. Análisis de los tratamientos por Duncan	65
Tabla 20. Análisis estadístico DQO.....	66
Tabla 21. Análisis de los tratamientos por Tukey.	67
Tabla 22. Análisis de los tratamientos por Fisher.....	67
Tabla 23. Análisis de los tratamientos por Duncan.	68
Tabla 24. Curva de calibración Hierro total.	76
Tabla 25. Curva de calibración DQO.....	77

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Balance de masa	45
Ecuación 2. Concentracion de hierro precipitado	45
Ecuación 3. Porcentaje de remocion del sistema.....	45
Ecuación 4. Area superficial	48
Ecuación 5. Volumen del sistema	48
Ecuación 6. Reaccion de primer orden	48
Ecuación 7. Reaccion flujo piston.....	49
Ecuación 8. Caudal de diseño	49
Ecuación 9. Tiempo de retencion hidraulico	50

INTRODUCCION

En la actualidad, la contaminación de las fuentes de agua es una de las mayores problemáticas a nivel mundial, ejemplos de estos son los vertimientos de las aguas residuales con presencia de metales provenientes principalmente de los procesos industriales. Los metales pesados son elementos químicos metálicos con un alto peso atómico y densidad mucho mayor (al menos cinco veces) que el agua, son altamente tóxicos y causan efectos nocivos a niveles muy bajos, estos se añaden al sistema acuático, ya sea naturalmente por lixiviación lenta de suelo / roca al agua o a través de fuentes antropogénicas (Martín-Lara, 2008) . Por tal motivo, la búsqueda de nuevas alternativas para el tratamiento de las aguas residuales ha sido más intensa, encontrando en las macrofitas una solución efectiva, económica y amigable con el medio ambiente.

Los tratamientos de aguas residuales que involucran macrofitas flotantes han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con contenidos de nutrientes, materia orgánica y sustancias toxicas como arsénico, zinc, cadmio, etc, (Insuasty Manrique, 2017). Su importancia radica en su aptitud para ser empleados en núcleos rurales debido a su bajo consumo de energía convencional y la practicidad en el montaje y operación de los sistemas de tratamiento. (Martelo, 2012)

La efectividad de las macrofitas flotantes en la depuración de aguas residuales con contenidos de materia orgánica y nutrientes han sido estudiados por varios autores. Para el año 1973 en la Universidad de la Florida, Harvey y Fox ensayaron con *Lemna minor* en la remoción de nutrientes, obteniendo resultados de 89% y 67% para nitrógeno y fósforo respectivamente. Dos décadas después, Días, Guerra, y Hernández (C. Rodriguez, 1996) adelantaron en Cuba un estudio comparativo de la capacidad depuradora de cinco especies de macrofitas flotantes. Los resultados demostraron buenas eficiencias en la remoción de este tipo de contaminantes.

Eichhornia crassipes es una planta de rápido crecimiento, lo cual podría ser beneficioso en el proceso de Fitorremediación; esta planta obtiene del agua todos

los nutrientes que requiere para su metabolismo, siendo el nitrógeno y el fósforo, junto a los iones de potasio, calcio, magnesio, hierro, amonio, nitrito, sulfato, cloro, fosfato y carbonato, los más importantes.

Por tal motivo, se escogió *Eichhornia crassipes* para evaluar su eficiencia en la remoción de hierro total, tomando como base las aguas residuales producidas por el laboratorio de agrobiotecnología del CBC, a través del diseño, construcción e implementación de un humedal artificial a escala piloto.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Toda actividad humana tiene asociada una generación de aguas residuales que deben ser sometidas a un tratamiento que garantice la continuidad del ciclo de consumo del recurso; estas aguas residuales suelen contener una gran variedad de contaminantes, y demás residuos orgánicos con efectos nocivos y venenosos sobre los ecosistemas. La presencia de metales en el ambiente se da por vía natural y antropogénica; y estos se movilizan en matrices de agua, suelo y aire. Los metales son persistentes, es decir, no pueden ser creados o degradados, ni mediante procesos biológicos ni antropogénicamente. Una vez que han entrado los ecosistemas acuáticos, se transforman a través de procesos biogeoquímicos y se distribuyen entre varias especies (Martorell., 2010). Hoy en día los metales pesados tienen un gran significado como indicadores de la calidad ecológica de todo flujo de agua debido a su toxicidad y especialmente al comportamiento bioacumulativo (Purves, 1988).

El rasgo distintivo de la fisiología de los metales pesados, es que aun cuando muchos de ellos son esenciales para el crecimiento y desarrollo de diferentes especies; como es el sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), vanadio (V), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn) y molibdeno (Mo), se ha reportado que también tienen efectos tóxicos sobre las células, principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas (Branco-Murgel, 1984). El grado de toxicidad potencial de los metales pesados depende de diferentes factores, depende de la propia naturaleza del metal y también de su disponibilidad en el ambiente (Torres, 2005). Los metales tienen tres vías principales de entrada en el medio acuático:

- a) La vía atmosférica, se produce debido a la sedimentación de partículas emitidas a la atmósfera por procesos naturales o antropogénicos.
- b) La vía terrestre, producto de filtraciones de vertidos, de la escorrentía superficial de terrenos contaminados y otras causas naturales.

c) La vía directa, la entrada de metales es a consecuencia de los vertidos directos de aguas residuales industriales y urbanas a los cauces fluviales (Rosas, 2001).

Esta última vía, se está presentando en las instalaciones del CBC, y es dentro de las actividades desarrolladas por el laboratorio de agrobiotecnología, donde encontramos el uso de estos metales y su posterior vertimiento al sistema de alcantarillado; Al conocer que una de sus actividades es la preparación de soluciones madres a base de hierro (5570 mg/L cada solución); utilizadas en la nutrición de los diferentes cultivos sembrados en el laboratorio; estas soluciones se pueden preparar hasta siete veces en un periodo de cuatro semanas, dependiendo de la tasa de producción.

Al efectuar una caracterización en el agua residual del laboratorio de agrobiotecnología, los resultados obtenidos por el laboratorio Ambiental y de Alimentos Nancy Flórez García S.A.S, indican que la concentración de hierro en el agua residual es de 8,940 mg/L, y está siendo vertida de manera directa al sistema de alcantarillado.

Las principales problemáticas generadas por las altas concentraciones de hierro se debe a que estas, están asociadas con el grupo de bacterias llamadas “las bacterias del hierro” que obtienen su energía a partir de la oxidación del hierro ferroso en hierro férrico, provocando un revestimiento viscoso en las tuberías, generando un aumento en la rugosidad relativa de las paredes internas de la conducción y reduciendo la sección útil para conducir el agua, ocasionando un aumento en la frecuencia e intensidad de las labores de mantenimiento para la eliminación y/o prevención de posibles obturaciones con un mayor coste de energía y mano de obra.

Sin embargo, la mayor problemática que genera este contaminante es que la flora de los cuerpos de agua se ve seriamente afectada, debido a que su capacidad de sintetizar nutrientes disminuye, ya que, al absorber demasiado hierro, la fluorescencia de la clorofila empieza a cambiar, produciendo una inhibición de la

capacidad de la planta para absorber adecuadamente la energía de la luz solar. (Kampfenkel, 1995). En el caso de la fauna (Sandoval, 2005) señala la peligrosidad de las aguas ricas en hierro. El hierro se puede presentar en diferentes estados como hierro ferroso (Fe^{2+}) y hierro férrico (Fe^{3+}). Cuando el hierro ferroso entra en contacto con el aire se produce su oxidación y se transforma en hierro férrico, que rápidamente precipita a hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), adhiriéndose a las branquias del pez, sofocándolo (conocida como sofocación ocre) y produciendo la muerte; como ocurrió en 2014, en el río Moche, Lima, Perú, donde aparecieron muertos decenas de peces debido a que se vertían 13,66 miligramos por litro (mg/L) de hierro.

¿Será *Eichhornia crassipes* una alternativa eficiente en la remoción de hierro total en las aguas residuales del laboratorio de agro-biotecnología del CBC?

II. JUSTIFICACION

Debido a la problemática que acarrea la presencia de metales en el agua y los altos costos de los tratamientos convencionales (Gil, 2013), tales como la microfiltración, la ultrafiltración y la ósmosis inversa (Hernández, 1990), se hace necesario encontrar alternativas que no solo sean económicas si no también eficientes, para mejorar la efectividad de los procesos a un bajo costo de operación y mantenimiento. Por tal motivo, se propone el uso de alternativas que aprovechen y apliquen los procesos naturales que ocurren en los ecosistemas para la depuración de aguas contaminadas. El tratamiento de aguas residuales por medio de especies de plantas acuáticas llamado fitorremediación ha despertado gran interés por su potencial para la depuración de estas aguas contaminadas.

Según la Resolución 0631 del 2015 el agua residual no domestica debe cumplir con los límites máximos permisibles antes de ser vertida al alcantarillado, en el caso del hierro la concentración máxima en la que debe ser vertida es de 1 mg/L, basados en esta información queda en evidencia el poco compromiso por parte del Centro Biotecnológico del Caribe, en el cumplimiento de la norma vigente de aguas residuales, al no implementar un tratamiento preliminar que remueva los contaminantes.

Al observar el plan estratégico presentado por emdubar para el periodo 2016 – 2019; podemos constatar el estado actual del departamento frente a los servicios fundamentales para la vida, y en general, para el desarrollo económico y social de toda comunidad; estos servicios presentan una cobertura del 83,8%, una continuidad del 59,75% frente al porcentaje nacional que es de 91,3%. Donde en la zona rural, la cobertura del servicio de alcantarillado sanitario alcanza un 20% y en tratamiento de las aguas residuales solo se tiene un 5%. La infraestructura para el tratamiento de aguas residuales es otra gran deficiencia en los municipios del Cesar. El 46,58% de los sistemas de tratamiento ubicados en las cabeceras municipales que hacen parte del Plan Departamental de Agua PDA; afrontan

carencias en cuanto a la remoción de cargas orgánicas, sólidos suspendidos y microorganismos patógenos. De los 25 municipios, tres (3) no cuentan con este tipo de instalaciones y los ocho (8) municipios restantes, son ineficientes; por lo que se busca “Fomentar y estimular el uso de sistemas de tratamiento de aguas residuales bio-naturales” (Emdupar, 2016).

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de *Eichhornia crassipes* en la remoción de Hierro Total en las aguas residuales del laboratorio agrobiotecnología del CBC, Sena, departamento del Cesar.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el agua residual del laboratorio de agrobiotecnología del CBC, Sena.
- Diseñar, construir y operar un humedal artificial a escala piloto para la remoción de Hierro Total en las aguas residuales del laboratorio de agrobiotecnología del CBC, Sena.
- Determinar el porcentaje de remoción de Hierro Total de las aguas residuales del laboratorio de agrobiotecnología del CBC, mediante un humedal artificial a escala piloto.

4 MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES

Las primeras exploraciones con macrofitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales, según (Tchobanoglous, 2000), citado por Bolaños, Casas y Aguirre (J. Casas, 2008), se llevaron a cabo en la década de los 70's en el centro espacial de la National and Space Administration -NASA-, como potencial sistema de tratamiento de aguas residuales en viajes espaciales.

Los metales pesados también han sido objeto de numerosos estudios. Por ejemplo, la *Salvinia rotundifolia* demostró una gran eficiencia en el tratamiento de plomo (Sarker., 1997); *S. herzogii* de la Sota (Salviniaceae) y *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) resultaron excelentes bioabsorbedores de cadmio, níquel, cobre, zinc, cromo y plomo (M. Delgado, 1993); y *Pistia stratiotes* L. (Araceae) presentó una alta capacidad en el tratamiento de efluentes industriales con varios metales (Jamil., 1997)

Macrófitas como Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) o lenteja de agua, lechuga de agua (*Pistia stratiotes* L.), agua Lemna, Bulrush (*Typha*), *Potamogeton pectinatus*, *Salvinia*, *Myriophyllum spicatum*, *Vallisneria spirallis*, *Hydrilla*, *Azolla* y *Phragmites Australis*, etc. son una característica común de un ecosistema acuático y Posee la capacidad de absorber nutrientes en grandes cantidades que pueden utilizarse para el tratamiento de aguas residuales (Maine, 2001). Tienen capacidad para mejorar la calidad del agua acumulando metales pesados con su sistema radicular efectivo (C. Rodriguez, 1996). Su habilidad para hiperacumular metales pesados los convierten en interesantes candidatos a la investigación, especialmente para el tratamiento de efluentes industriales y aguas residuales (Mkandawire, 2004). La acumulación de metales pesados es mucho mayor en las raíces de estas plantas.

En el año 2009, se realizó la comparación del potencial de fitorremediación de tres macrófitas acuáticas y concluyeron que *Eichhornia crassipes* fue más eficiente en

la remoción de metales pesados (Fe, Zn, Cu, Cr y Cd) seguida de *Pistia stratiotes* y *Spirodela polyrrhiza* (Mishra, 2009). El estudio investigó la utilidad y la eficiencia del Jacinto de agua natural (*E. crassipes*) (bio-filtros) en la reducción del contenido de metales pesados del agua, es decir, para reducir el nivel de contaminación existente en las masas de aguas residuales ocasionado debido a las aguas residuales domésticas e industriales En las regiones cercanas de Allahabad (India) (Singh, 2015).

El análisis de metales pesados en efluentes de aguas residuales se lleva a cabo calibrando el gráfico entre concentración de analito y absorbancia usando AAS. Los resultados muestran que las aguas residuales domésticas y los efluentes industriales en el área estudiada tenían mayor contenido de metales pesados (Pb, Cd, Zn, Cr, Ni, Fe) que son capaces de contaminar el medio ambiente. Estos hallazgos implican que la presencia de *E. crassipes*. Solo en los cuerpos de aguas residuales altera el contenido de metales pesados en gran medida y tiene la capacidad de eliminar los metales pesados a través de la rizofiltración.

El desarrollo de tratamientos con macrofitas ha sido extenso a lo largo del tiempo, pero, solo hasta 1996 se encuentra el primer antecedente con macrofitas en Colombia; en este se determinó la efectividad de *Eichhornia crassipes* en la depuración de aguas residuales del valle Sinuano del departamento de Córdoba. Los resultados obtenidos reflejan una remoción altamente significativa en términos de las variables analizadas. Luego, para el 2002, en la Universidad del Valle (Cali, Colombia), a escala laboratorio se evaluó la remoción de hierro en diferentes concentraciones por medio de la *Lemna* spp., arrojando resultados no muy convenientes, ya que a mayores concentraciones la remoción de hierro disminuye, debido, posiblemente a procesos de saturación (Barba., 2002).

En la Universidad popular del cesar, se evaluó la remoción de nutrientes y materia orgánica en reactores tipo Batch operados con *lemna* sp tratando efluentes de lagunas anaerobias en el cual concluyeron, que *lemna* sp obtiene porcentajes de remoción de nitrógeno total del 95,79% alcanzando una eficacia neta en casi su totalidad, en cuanto a la remoción neta de fósforo total, encontraron que *lemna* sp,

es ineficiente en la remoción de este, ya que solo alcanzo un porcentaje de remoción que no supera el 7% del material contenido en el medio de cultivo. (Suarez, 2007).

En el Sistar “el salguero” de Valledupar (Mendoza, 2010), evaluó la utilización del Duckweed la remoción de nutrientes y materia orgánica de efluentes de las lagunas anaerobias, obteniendo como resultado que el Duckweed es una buena alternativa para la depuración de aguas residuales, pudiendo eliminar grandes cargas de materia orgánica (expresadas en DBO_5 y DQO) y de nutrientes (nitrógeno y fósforo).

La empresa Dairy partner americas (DPA), utilizó la fitorremediación como alternativa de tratamiento terciario de agua residual láctea de, concluyendo que el agua residual láctea no es un ambiente adecuado para la *Eichhornia crassipes* y la *lemna* minor, debido a que no contiene los suficientes nutrientes para mantener su adaptación, lo que a su vez nos conlleva a que las grasas y aceites son parámetros que dificultan su crecimiento. (Mendoza., 2016)

4.2 MARCO TEORICO

4.2.1 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua proveniente de las actividades humanas. El objetivo del tratamiento es producir un efluente tratado o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango conveniente para la disposición o rehúso.

4.2.2 Tipos de tratamiento de aguas residuales

4.2.2.1 UASB

El Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB) es un proceso de tanque simple. Las aguas residuales entran en el reactor por el fondo, y fluyen hacia arriba. Una capa de lodo suspendida filtra las aguas residuales, tratándolas al ir atravesándola. La capa de lodos está formada por gránulos

(pequeñas agrupaciones) de microbios (0.5 a 2 mm de diámetro), microorganismos que por su propio peso se resisten a ser arrastrados por el flujo ascendente. Los microorganismos en la capa de lodos degradan los compuestos orgánicos. Como resultado se liberan gases (metano y bióxido de carbono). Las burbujas ascendentes mezclan los lodos sin necesidad de piezas mecánicas. Las paredes inclinadas vuelcan el material que alcanza la superficie del tanque. El efluente clarificado es extraído de la parte superior del tanque en un área por encima de las paredes inclinadas.

4.2.2.2 Lodos activados

El proceso de lodos activados es un proceso biológico conocido también como bioproceso, el cual permite desarrollar una depuración de origen natural donde los microorganismos presentes en el mismo, permiten depurar el agua contaminada a su estado natural por medio de procesos anaerobios mediante la aireación prolongada y la recirculación de fangos activos que eliminan las sustancias biodegradables disueltas en las aguas residuales.

4.2.2.3 Lagunas de estabilización

Una laguna de estabilización es una estructura simple para embalsar aguas residuales con el objeto de mejorar sus características sanitarias. Las lagunas de estabilización se construyen de poca profundidad (2 a 4 m) y con períodos de retención relativamente grandes (por lo general, de varios días). Cuando las aguas residuales son descargadas en lagunas de estabilización se realiza en las mismas, en forma espontánea, un proceso conocido como autodepuración o estabilización natural, en el que ocurren fenómenos de tipo físico, químico, bioquímico y biológico. Este proceso se lleva a cabo en casi todas las aguas estancadas con alto contenido de materia orgánica biodegradable.

4.2.2.4 Humedales artificiales

Los humedales artificiales son zonas construidas por el hombre en las que se reproducen, de manera controlada, los procesos físicos, químicos y biológicos de eliminación de contaminantes que ocurren normalmente en los humedales naturales. La principal ventaja que ofrecen estos sistemas es la gran superficie de

contacto que tienen las raíces de las macrofitas con el agua residual, ya que esta les baña por completo, lo que permite una gran actividad depuradora de la materia orgánica por medio de los microorganismos adheridos a dicha superficie o por las propias raíces directamente (M. Condori, 2010). No obstante, la acumulación de bacterias en las raíces de las macrofitas, puede convertir la biomasa en una fuente de contaminación, en cuyo caso se requiere un manejo cuidadoso de la cosecha (Sandoval M. Celis J., 2005.)

Principalmente están compuestos por:

Un sustrato o material granular: sirve de soporte a la vegetación y permite la fijación de la biopelícula bacteriana que interviene en la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes presentes en las aguas a tratar.

- La vegetación: principalmente compuesta por macrófitas emergentes que contribuyen a la oxigenación del sustrato a nivel de la rizosfera, a la eliminación de nutrientes por absorción/extracción y al desarrollo de la biopelícula bacteriana.
- El agua por tratar o influente: circula a través del sustrato y la vegetación.

4.2.2.4.1 Tipos de humedales artificiales

Existen diferentes tipos de humedales artificiales en función del sentido de circulación del flujo de agua:

- Humedales artificiales de flujo libre o superficial: el agua circula por encima del sustrato continuamente. Se favorecen las condiciones aerobias al estar el agua directamente expuesta a la atmósfera. Se emplean para tratar efluentes procedentes de tratamientos secundarios y para crear y restaurar ecosistemas acuáticos.
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial: el agua circula a través del sustrato. En la mayoría de los casos se usan para el tratamiento de aguas residuales generadas en núcleos de población de menos de 2000 habitantes. En función del sentido del flujo, pueden ser horizontales o verticales.

- Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical: el agua circula verticalmente a través del sustrato de manera intermitente. Se suelen incluir chimeneas de aireación para favorecer las condiciones aerobias. Se suelen desarrollar procesos de nitrificación, entre otros.
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal: el agua circula horizontalmente a través del sustrato de manera continua. Se favorecen las condiciones anaerobias al mantenerse el nivel del agua por debajo del sustrato. Se suelen desarrollar procesos de desnitrificación, entre otros.

4.2.3 Macrofitas acuáticas

El termino macrófita acuática, se refiere a las formas macroscópicas de vegetación acuática y comprende las macro algas, las escasas especies de pteridofitos y las verdaderas angiospermas (Grace, 1981). De acuerdo a la forma y fisiología que se demuestran en la figura 1, se tiene una clasificación simple y clara de las macrofitas acuáticas:

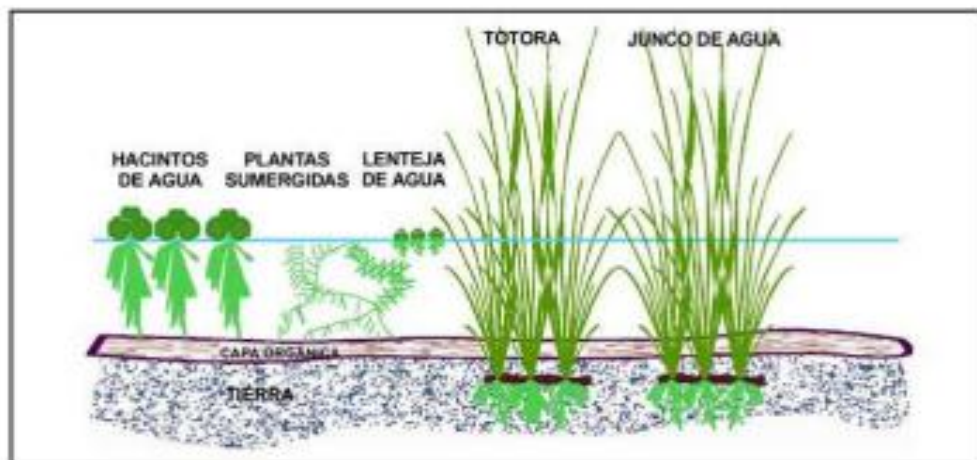


Figura 1. Formas de las plantas acuáticas

Fuente: Tchobanoglous, G. (Aquatic plant system for wastewater treatment).

- **Plantas flotantes:** se distinguen por la habilidad de derivar dióxido de carbono y las necesidades de oxígeno de la atmósfera directamente, las plantas reciben sus nutrientes y minerales desde el agua, ejemplo el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*).

- **Plantas sumergidas:** se distinguen por la habilidad para absorber oxígeno, dióxido de carbono, y minerales de la columna de agua. Las plantas sumergidas se inhiben fácilmente por la turbiedad alta en el agua porque sus partes fotosintéticas están bajo el agua.
- **Plantas emergentes:** son plantas que viven en aguas poco profundas, arraigadas en el suelo, cuyos tallos y hojas emergen fuera del agua, no sufren limitaciones de agua y tiene un mayor acceso a la luz.

4.2.4 *Eichhornia crassipes*

Eichhornia crassipes es una planta macrófita de la familia de las monocotiledóneas. Es conocida como Lirio Acuático, Jacinto de Agua o Buchón de Agua. Está constituida por un tejido de polisacáridos estructurales como celulosa y hemicelulosa, además de lignina, un polímero aromático, heterogéneo e insoluble en ácidos (Agunbiade, 2009). *E. crassipes* es considerada una maleza acuática que aparece en lagunas, ríos y embalses en todo el mundo. Su capacidad de invasión afecta los ecosistemas acuáticos debido a su alto ritmo de multiplicación (Arteaga, 2010).

Sin embargo, debido a su capacidad para eliminar metales por su actividad metabólica (bioacumulación), ha sido empleada en sistemas de purificación biológica o Fitorremediación para mejorar la calidad del agua (Malik., 2007). Es por ello que la planta debe ser aprovechada cuando se hace presente en los embalses y debe ser controlada con el fin de aprovechar su acción benéfica como descontaminante del agua. Se ha encontrado que estas plantas han sido aplicadas como filtros biológicos para remover impurezas en aguas contaminadas basándose en el proceso de biosorción, el cual nos permite la eliminación de metales por la unión pasiva a biomasa no viva a partir de soluciones acuosas. Se utilizan especialmente para remover metales pesados, sólidos suspendidos y

colorantes, convirtiéndolas en una buena alternativa desde el punto de vista ecológico y económico para la descontaminación de aguas residuales (Tripathi, 2011).

Eichhornia crassipes es una planta de agua dulce que no desarrolla tallos leñosos permanente y de crecimiento continuo, con desarrollo ascendente, de tallo vegetativo sumamente corto, hojas de color verde brillante y espigas de flores de lavanda y azulados. Los peciolo de las plantas son elongados y abultados de aire que contribuye a la flotabilidad de la planta (Torres., 2009) . La figura 2 ilustra las anteriores características.

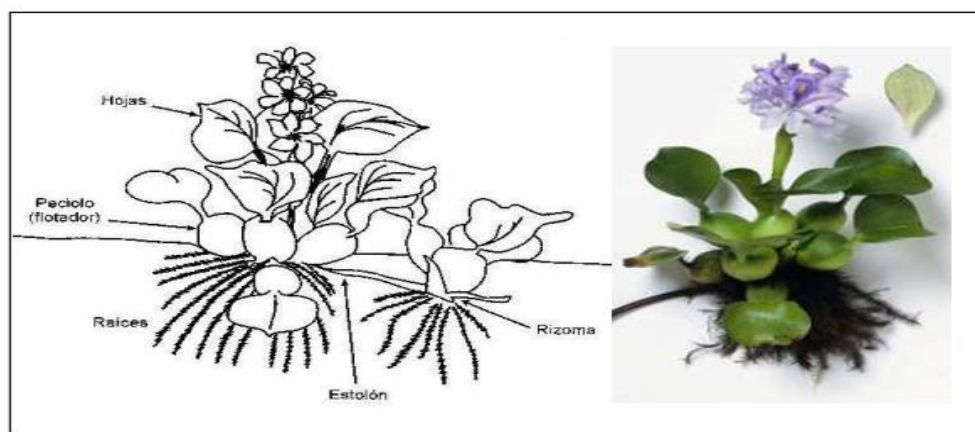


Figura 2. Morfología de *Eichhornia crassipes*.

Fuente: Menachii (Nova genera et species plantarum).

Sus raíces sumergibles son fibrosas y comúnmente coloreadas, es la octava planta con crecimiento más rápido en el mundo por lo que le permite extenderse y sobrevivir en muchos sitios. Puede duplicar su tamaño en diez días, y durante ocho meses de normal crecimiento una sola planta es capaz de reproducir setenta mil plantas hijas (Romero., 2003); que pueden llegar a medir entre 0,5 a 1,5 metros desde la parte superior hasta la raíz.

En la fotosíntesis, las macrofitas flotantes emplean el oxígeno y dióxido de carbono disponible en la atmósfera. Los nutrientes son tomados de la columna de agua a través de las raíces, las cuales constituyen también un excelente medio

para la filtración/adsorción de sólidos suspendidos. El desarrollo de raíces es función de la disponibilidad de nutrientes en el agua y de la demanda de nutrientes por parte de la planta. Por consiguiente, la densidad y profundidad del medio filtrante (raíces), depende en gran medida de factores como la calidad del agua. Puede vivir en aguas dulces tranquilas o de ligero movimiento, como zanjas, canales, presas, arroyos, ríos y pantanos; en la actualidad se distribuye en todas partes del mundo (Miranda-Arce, 2018).



Figura 3. Tallos de *Eichhornia crassipes*.

Fuente: Revista Colombiana de materiales N° 4, 2013

En Los tallos de la *Eichhornia crassipes* se observa su estructura esponjosa y bulbosa, lo cual es una característica que le permite flotar a la planta, la superficie inflada está conformada por cámaras o celdas dando lugar a una estructura porosa, la cual le sirve a la planta para acumular agua y aire en su interior como se muestra en la figura 3.

El crecimiento de *Eichhornia crassipes* va a depender del medio donde se desarrolle. En abundancia de nutrientes la planta se desarrolla a su máximo límite, adquiriendo un intenso color azul-verdoso.

Para un óptimo crecimiento se necesitan los siguientes parámetros de crecimiento:

1. Requieren iluminación intensa o estar en semi-sombra.
2. La temperatura debe estar entre 25 a 30 °C, cesando a los 10 °C y produciendo la muerte.
3. Necesita un pH que se sitúe entre 6,5 – 7,5.

4. El crecimiento de la *Eichhornia crassipes* es favorecido por el agua rica en nutrientes, además toma elementos como el calcio, el magnesio, el hierro, el boro y el zinc.

4.2.5 Fitorremediación

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

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

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

4.2.5.1 Tipos de Fitorremediación

Las plantas pueden incorporar las sustancias mediante distintos procesos que se representan en la figura 4. De los diferentes tipos de Fitorremediación solo cuatro son relevantes para la asimilación de metales pesados: fitoextracción, fitoestabilización, rizofiltración y fitovolatilización (Jumbo, 2012).

Fitoextracción: las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces).

Rizofiltración: Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.

Fitoestabilización: Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de estos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire.

Fitovolatilización: Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.

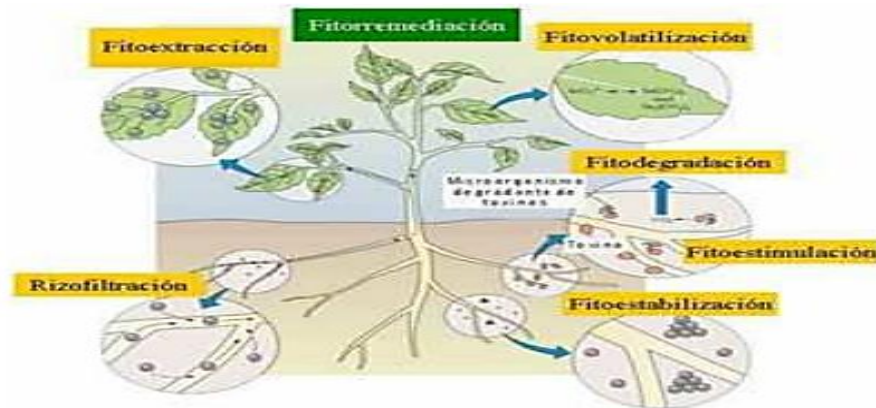


Figura 4. Tipos de Fitorremediación

Fuente: Buchanan et al., biochemistry and molecular biology of plants, 2000.

4.2.5.2 Criterios para la selección de plantas para la Fitorremediación

La eficiencia de remoción de contaminantes durante el proceso de Fitorremediación dependerá principalmente de la especie de planta utilizada, el estado de crecimiento de las plantas y el tipo de metal a remover, por lo mismo, para lograr buenos resultados, las plantas a utilizar deben tener las siguientes características (Nuñez, 2004).

- Ser tolerantes a altas concentraciones de metales,
- Ser acumuladoras de metales,
- Tasa de crecimiento, la cual hace alusión al aumento o disminución promedio de la población en un determinado período de tiempo, y una alta productividad, siendo esta, la relación entre el aumento o disminución de la población, con respecto a las condiciones y características que brinda el medio acuoso.

En la tabla 1 se muestra algunos ejemplos de plantas acuáticas que acumulan cuatro o más metales (hiperacumuladoras) (Taylor, 2001).

Tabla 1. Plantas hiperacumuladoras

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

Fuente: McIntyre, 2003

4.2.6 Mecanismo de acumulación de metales en las plantas

De acuerdo con (Wang, 1990), la acumulación de metales por los organismos acuáticos se presenta en un proceso que consiste en dos pasos:

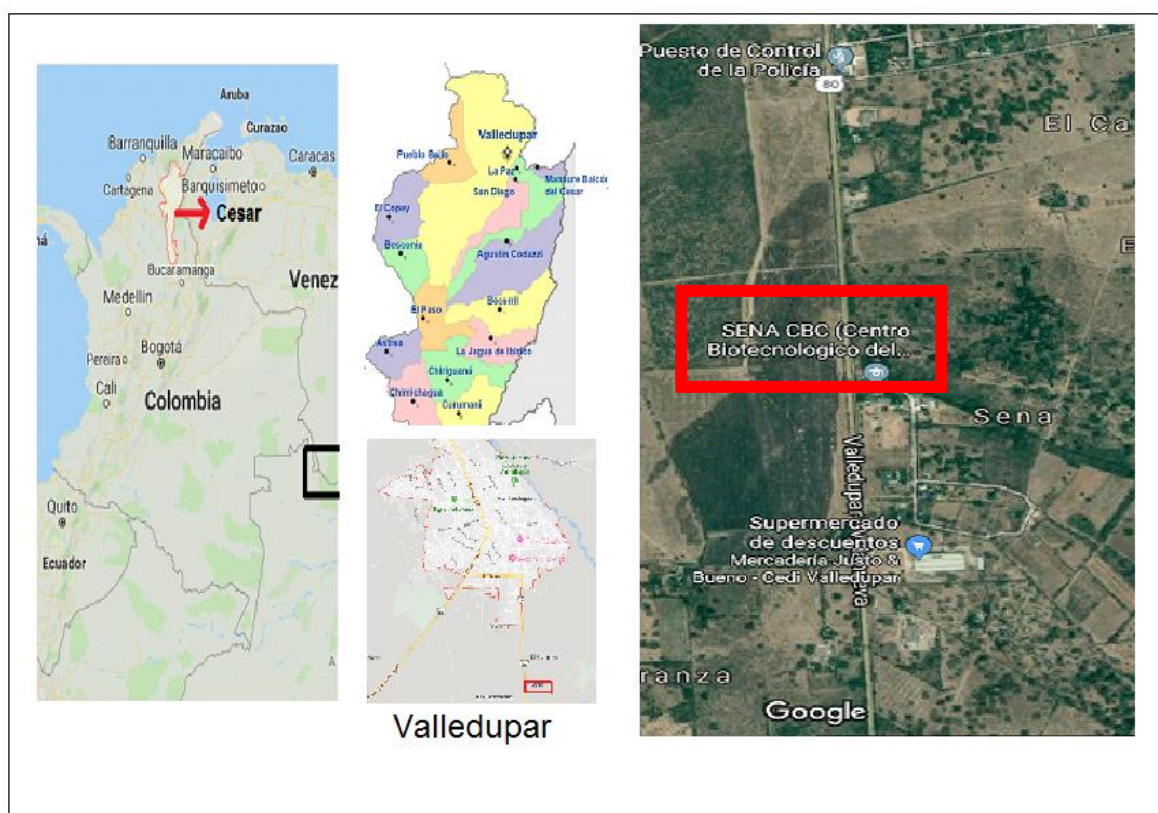
1. Absorción rápida o vinculación a la superficie biológica (biosorción).
2. Transporte lento e irreversible, controlado por difusión del ion metálico a través de la membrana celular o por transporte activo por una proteína transportadora.

En las plantas, los efectos empiezan por la raíz, ya que este es el órgano responsable de asimilar los nutrientes del medio, y afectan sucesivamente el resto de la planta.

En las hojas se producen graves daños en los cloroplastos y las mitocondrias, lo que altera los procesos de fotosíntesis y de respiración, en una fase más avanzada de alteración se producen intensos cambios metabólicos y de regulación celular, y ocurre finalmente el estímulo de la senescencia por acumulación crónica del metal pesado, lo que puede resultar en la muerte de la planta.

4.3 MARCO CONTEXTUAL

El Centro Biotecnológico del Caribe se encuentra ubicado a las afueras de la ciudad de Valledupar en el kilómetro 7 vía La Paz. La ubicación espacial del Centro Biotecnológico del Caribe se ilustra en la figura 5.



Fuente: Google Mapas

La institución cuenta con más de 500 aprendices entre las jornadas mañana y tarde, las titulaciones de Control ambiental, Agua y Saneamiento, Agrobiotecnología, Recursos naturales, entre otras, hacen uso constante de los laboratorios ambientales para realizar análisis físico-químicos y microbiológicos de suelo y agua.

Los laboratorios cuentan con numerosos reactivos para la ejecución de este tipo de pruebas, entre los que destacan: Ácido sulfúrico, Ácido acético, Sulfato de aluminio, Sulfato de hierro, Permanganato de potasio, Aftalato de potasio.

Debido a las actividades académicas que se realizan allí, se pueden encontrar una variedad de fauna como lo son los bovinos, las especies menores (pollos, gallinas, conejos, cerdos, chivos, peces). Dentro de la flora predominan los bosques secos tropicales y los cultivos de plantas leguminosas.

4.4 MARCO CONCEPTUAL

Agua residual: Es cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por influencia antropogénica. Las aguas residuales incluyen las aguas usadas domésticas y urbanas, y los residuos líquidos industriales o mineros eliminados, o las aguas que se mezclaron con las anteriores (aguas pluviales o naturales).

Biosorción: Se refiere a la captación de metales que lleva a cabo una biomasa completa (viva o muerta), a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico.

Bioacumulación: Es el proceso de acumulación de sustancias químicas en organismos vivos de forma que estos alcanzan concentraciones más elevadas que las concentraciones en su medio o en los alimentos.

Contaminación: Desde el punto de vista ambiental se refiere a todo agente físico, químico o biológico que pueda alterar la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas modificando por tanto las condiciones del medio ambiente.

Humedales artificiales: Consisten normalmente en un monocultivo o un policultivo de plantas superiores (macrofitas) dispuestas en lagunas, taques o canales poco profundos.

Macrofitas: Se refiere a las plantas acuáticas visibles a simple vista, entre las que se encuentran plantas vasculares (cormofitos), macro algas (algas caráceas y de otros grupos) y cianobacterias (Ebro, 2010).

Nutrientes: Son sustancias solubles en agua que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidad excesiva inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros microorganismos, provocando la eutrofización de las aguas. Los principales nutrientes que se pueden encontrar en aguas residuales domesticas son el nitrógeno y el fosforo (Ramírez, 2010).

Remoción: Se define como la eliminación o traslado de una sustancia de un lugar a otro; en especial cuando esta sustancia es contaminante y acarrea consecuencias graves al medioambiente como aquellas que puedan poner en riesgo la salud y el bienestar de las especies vegetales y animales y al ser humano ya que estos tienen contacto directo con dicho (Ambientum., 2017).

Toxicidad: Grado de efecto tóxico de una sustancia para organismos vivos. Es una medida que permite identificar lo nocivo que puede ser una sustancia al tener contacto con el medio ambiente entre ellos cuerpos vegetales, animales y el ser humano. La toxicidad de un elemento depende de factores como el tiempo de exposición, la cantidad de exposiciones y la vía de administración; y esto causa riesgo para el bienestar de las especies y los ecosistemas (Ambientum., 2017)

4.5 MARCO INSTITUCIONAL

El Centro Biotecnológico del Caribe SENA, es un establecimiento público del orden nacional, con personería jurídica, patrimonio propio e independiente, y autonomía administrativa; adscrito al Ministerio del Trabajo, de Colombia.

Este encargado de cumplir los siguientes requerimientos:

1. Impulsar la promoción social del trabajador, a través de su formación profesional integral, para hacer de él un ciudadano útil y responsable, poseedor de valores morales éticos, culturales y ecológicos.
2. Organizar, desarrollar, administrar y ejecutar programas de formación profesional integral, en coordinación y en función de las necesidades sociales y del sector productivo.
3. Velar porque en los contenidos de los programas de formación profesional se mantenga la unidad técnica.

4.5.1 Misión

El SENA está encargado de cumplir la función que le corresponde al Estado de invertir en el desarrollo social y técnico de los trabajadores colombianos, ofreciendo y ejecutando la formación profesional integral, para la incorporación y el desarrollo de las personas en actividades productivas que contribuyan al desarrollo social, económico y tecnológico del país.

4.5.2 Visión

En el 2018 el SENA será reconocido por la efectividad de su gestión, sus aportes al empleo decente y a la generación de ingresos, impactando la productividad de las personas y de las empresas; que incidirán positivamente en el desarrollo de las regiones como contribución a una Colombia educada, equitativa y en paz.

4.6 MARCO LEGAL

Constitución Política de Colombia (1991): Presenta 17 artículos específicos, relacionados con la protección, conservación, control y mejoramiento de los recursos naturales: 49, 67, 79, 80, 81, 82, 88, 95, 277, 313, 317, 330, 331 y 334.

Ley 23 de 1973: Tiene como prioridad la prevención y control de la contaminación del medio ambiente, mejoramiento, conservación y restauración de los recursos

naturales; determinando también como bienes contaminables el aire, el agua y el suelo.

Ley 09 de 1979: Por la cual se aprueba en código sanitario nacional y se toman medidas para preservar, restaurar y mejorar las condiciones sanitarias en lo que se relaciona a la salud humana y para regular, legalizar y controlar las descargas de residuos y materiales que afecten o puedan afectar las condiciones sanitarias del ambiente.

Ley 99 de 1993: Por la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el sistema nacional ambiental SINA, y se dictan otras disposiciones.

Decreto 2811 de 1974: Por el cual se aprueba el código nacional de los recursos naturales renovable y de protección del medio ambiente.

Decreto 1594 de 1984: Derogado por el art. 79, Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21. Los cuales establecen las sustancias de interés sanitario.

Decreto 3100 de 2003: Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.

Decreto 3440 de 2004: Por el cual se modifica el Decreto 3100 de 2003 y se adoptan otras disposiciones.

Decreto 3930 de 2010: Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

Resolución 0631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales y cuerpos de aguas

superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Resolución 0330 de 2017: expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”.

5 HIPÓTESIS

La presencia de la especie vegetal *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en aguas residuales influye en la disminución de la concentración de metales disueltos como el hierro.

6 METODOLOGÍA

6.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Según (Tamayo, 2001). El proceso de la investigación científica. El tipo de investigación a seguir será cuantitativo y experimental ya que permite llegar a conocer las distintas situaciones, procesos ambientales a lo largo de la investigación y así obtener resultados in situ y en laboratorio para su posterior aplicación.

Línea de Investigación.

La investigación pertenece a la línea de **Sostenibilidad y Gestión Ambiental**.

6.2 POBLACIÓN Y MUESTRA.

La población con la cual se trabajó en esta investigación pertenece al agua residual del laboratorio de agrobiotecnología del CBC, Sena.

Para evaluar correctamente la eficiencia del Humedal artificial utilizando Eichhornia Crassipes, fue necesario realizar un muestreo compuesto, se tomó una (1) muestra de 2 litros del líquido tratante en la entrada y en la salida del humedal artificial. El caudal con el que se trabajó equivale a 0,1 litro por minuto, teniendo en cuenta la capacidad del humedal artificial y el tiempo de retención.

El caudal necesario para realizar esta investigación fue transportado por tuberías de 2" en PVC directamente desde el laboratorio de agrobiotecnología hasta el humedal artificial.

6.3 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA

La metodología con la que se trabajó fue diseñada con base en los objetivos propuestos de la siguiente manera:

6.3.1 Programa De Monitoreo.

Las muestras recolectadas fueron analizadas por los autores de esta investigación, en el laboratorio ambiental del centro biotecnológico del caribe, el cual está avalado por el IDEAM; Además se tomaron muestras cada 5 días en el proceso de tratamiento para el análisis de Hierro total, Temperatura, pH y DQO.

Se tomaron porciones individuales del líquido tratante cada hora en botellas de vidrio y se mezclaron al final del periodo de muestreo.

6.3.2 Caracterización del agua residual

Para la caracterización de esta agua residual, se tendrán en cuenta los protocolos establecidos por el IDEAM para la toma de las muestras. El tipo de muestreo fue compuesto, Las muestras fueron tomadas bajo condiciones normales de producción durante toda la jornada de producción; cada 30 min. Los parámetros analizados fueron:

- pH (pHmetro digital) y Temperatura, medidos directamente en campo.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO), mediante el método colorimétrico.
- Determinación de Hierro Total, Mediante el método 1-10 Fenantrolina, utilizando espectrofotometría absorción atómica.

6.3.2.1 Determinación de la DQO, mediante el método colorimétrico.

Medir un volumen de muestra de 2,5 ml, adicionar el reactivo de digestión (1,5 ml), adicionar el reactivo de ácido sulfúrico (3,5 ml); el digestor se calienta por 20 minutos a 150°C, antes de colocar los tubos o celdas de digestión; y luego se colocan los tubos en digestión por dos horas, se deja enfriar las muestras, se calibra el equipo con el blanco (espectrofotómetro) a $\lambda = 610\text{nm}$ y se lee la absorbancia y luego se halla la concentración en mg/L de DQO de la muestra con la curva de calibración.

6.3.2.2 DETERMINACIÓN DE HIERRO EN LA MUESTRA DE AGUA

6.3.2.2.1 Preservación de la Muestra

- Limpiar cuidadosamente los recipientes para muestra con solución jabonosa no iónica, libre de metales, enjuagar con agua de grifo y luego con agua destilada acidulada.
- La muestra de Agua debe ser almacenada en envases de Vidrio o Plástico.
- Tomada la muestra, Acidular con HNO_3 hasta un pH menor a 2.
- Conservar la muestra después de acidulada a 4 °C.
- La preservación de las muestras para análisis de metales pesados dura 6 meses, analizar lo antes posible.

6.3.2.2.2 Tratamiento de Muestra

- Prepárese un volumen de muestra aproximadamente entre 50 a 100 ml y servir en Erlenmeyer.
- Añadir 5 ml de HNO_3 .
- Llevar a digestión lenta y evaporar hasta 1/5 del volumen (10 o 20 ml).
- Si es necesario continúe agregando HNO_3 para completar la digestión.
- Dejar que la muestra se seque durante la digestión.
- Terminada la digestión, dejar enfriar hasta temperatura ambiente.
- Con agua destilada lavar las paredes del Erlenmeyer y filtrar si es necesario.
- Pasar la solución ya con digestión a un balón aforado del volumen inicial de la muestra (50 o 100 ml).
- Aforar y mezclar cuidadosamente.
- Analizar por espectrofotometría de absorción atómica.

6.3.3 Preparación de la curva de calibración

En matraces aforados de 100ml adicionar las cantidades correspondientes de los reactivos a utilizar según la tabla No 2, después completar con agua destilada hasta el volumen correspondiente, homogenizar y dejar reposar por 5 minutos para el desarrollo del color

Lavar muy bien las celdas de medición y para calibrar el equipo al 100% de transmitancia coloque la longitud de onda en a la cual se va a medir la absorbancia (510nm) y se usa como referencia el blanco de la reacción.

Cuide que sobre las paredes de la celda no queden huellas digitales, manchas, rayones muy fuertes, u otros que impidan el paso adecuado de la luz. Mida la absorbancia de las soluciones patrón de hierro a 510 nm, entre cada medida lave la celda con suficiente agua destilada y limpie cuidadosamente las paredes externas.

Tabla 2. Concentraciones de reactivos para curva patrón

Tubo	PPM (Fe)	ml solución de sulfato ferroso amoniacal 6- hidrato (Fe)	ml Hidroxilamina	ml Acetato de sodio. pH 3,5	ml 1-10 fenantrolina
Blanco	0	0,0	1	10	10
1	0,6	1,5	1	10	10
2	1	2,5	1	10	10
3	2	5,0	1	10	10
4	4	10,0	1	10	10
5	6	15,0	1	10	10
6	8	20,0	1	10	10
7	10	25,0	1	10	10
8	14	35,0	1	10	10
9	20	50,0	1	10	10

Fuente: Dean J, Merrit L, Settle F, Willar H, 1991.

6.4 DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL

La investigación se desarrolló en un humedal artificial a escala piloto sin aireación suplementada con flujo continuo y se diseñó de la manera descrita a continuación.

6.4.1 Diseño de humedal artificial a escala piloto

Para el diseño del humedal artificial a escala piloto se tomó como base las recomendaciones de La US Environmental Protection Agency -EPA- la cual desarrolló un procedimiento para el diseño de sistemas con especies flotantes para el caso específico de *Eichhornia crassipes*, dado que esta macrófita representa la mayoría de los sistemas con especies flotantes que han sido construidos, debido a su alta capacidad de asimilación y su alta proliferación.

Tabla 3. Criterios EPA

Parámetro	Valor	Unidades
Profundidad del sistema	(0,5 – 1,2)	Metros (m)
Relación longitud / ancho	3:1	Metros (m)
Tiempo de retención hidráulico	(10 - 36)	Días. (d)

Fuente: EPA design manual, 1988.

El tiempo de retención hidráulico es el tiempo necesario para que las plantas asimilen el hierro, este tiempo es la relación entre el volumen efectivo y el caudal. El tiempo de retención hidráulico seleccionado para la asimilación de hierro por parte de *Eichhornia crassipes* fue de 20 días, y las dimensiones del humedal artificial se encuentran en la tabla 4.

Tabla 4. Dimensiones del humedal artificial.

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud	3	Metros
Ancho	1	Metro
Profundidad	1	Metro

Fuente: Autores, 2019.

6.4.2 Descripción del experimento

El proyecto de investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Centro Biotecnológico del Caribe, (kilómetro 7, vía la Paz). En este lugar se construyó un humedal artificial a escala piloto con flujo continuo y se adaptaron 16 individuos de *Eichhornia crassipes* con una separación de 10 cm entre cada una.

La estructura de entrada del afluente consistió en un sistema conformado por una cajilla de inspección con capacidad de almacenamiento de $0,1 \text{ m}^3$, tenía adaptado una llave que permitía regular manualmente el caudal del afluente del humedal artificial, conduciendo el agua a través de una tubería de 2" hacia el humedal donde se lleva a cabo el proceso. Después del proceso de remoción por acción de las plantas el agua residual sale como efluente por el otro costado del humedal por medio de una tubería de 2".

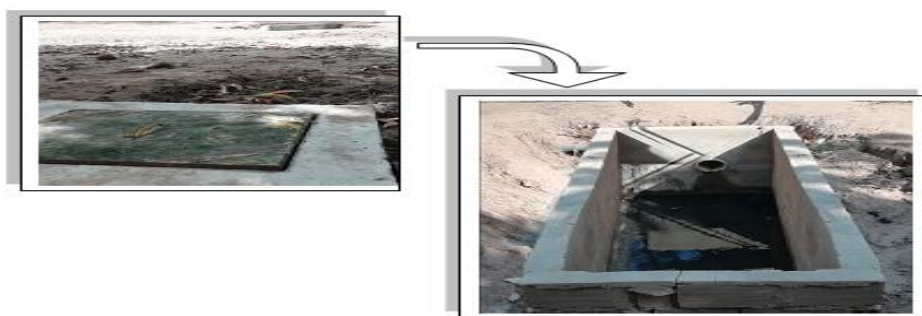


Figura 6. Estructura del humedal artificial.

Fuente: Autores, 2019.

6.4.3 Programa de selección y adaptación de las especies vegetales

La selección del grupo de plantas se realizó en los estanques piscícolas del Sena teniendo en cuenta las siguientes características: altura de la planta, tamaño de la raíz, de los tallos y hojas.

Luego se realizó el lavado de cada planta para su posterior adaptación en un estanque piscícola en el cual las plantas fueron expuestas a agua potable y luego a una dilución del agua residual del laboratorio de agrobiotecnología durante 1 semana.

6.5 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN

Para determinar el porcentaje de remoción de todo el sistema es necesario cuantificar la concertación de hierro en el afluente, el efluente y el que se precipita en función del hierro absorbido por *Eichhornia Crassipes*, a través de los siguientes métodos.

6.5.1 Determinación de hierro en la planta

Este análisis consistió en dos etapas:

En la primera etapa se realizó en 10 plantas anterior al experimento, 5 individuos adultos y 5 individuos juveniles, con el fin de determinar la concentración de hierro promedio de *Eichhornia crassipes*.

En la segunda etapa, el análisis se realizó en todas las plantas utilizadas en el humedal artificial, y de este modo se pudo determinar la concentración de hierro absorbido por *Eichhornia crassipes* al final del ensayo, esto se hizo de la siguiente manera:

1. Las plantas son lavadas con agua destilada, se separan las hojas y las raíces.
2. Luego son secadas a 120 °C por 12 horas, pesadas y calcinadas a 550 °C por 2 horas.

3. Los residuos son acidificados con 10 ml de una mezcla 1:1:2 de HNO_3 - H_2SO_4 - H_2O .
4. Finalmente, analizadas por Espectrofotometría de Absorción Atómica para la determinación de la concentración de hierro total.

6.5.2 Concentración de Hierro Precipitado

Dado el tiempo de retención empleado para la remoción de hierro, es normal que un porcentaje de este contaminante se aloje en el fondo del humedal artificial, debido a que este reacciona con el oxígeno del aire; estas formas reducidas de hierro son oxidados por bacterias y luego precipitan (STOTTMEISTER, 2003). Es importante determinar el valor aproximado de este precipitado ya que tiene gran relación en el porcentaje de remoción del sistema; para hacerlo nos basamos en una ecuación de balance de masa:

$$Afluente \left(\frac{mg}{L} \right) = Efluente \left(\frac{mg}{L} \right) + Concentracion\ en\ plantas \left(\frac{mg}{L} \right) + Precipitado \left(\frac{mg}{L} \right)$$

Ecuación 1.

$$Precipitado = Afluente - Efluente - Concentracion\ en\ plantas$$

Ecuación 2.

6.5.3 Porcentaje De Remoción

Luego de cuantificar la concentración de hierro total en el afluente y el efluente del humedal artificial y de determinar el porcentaje de hierro total precipitado, el porcentaje de remoción del sistema se determina a través de la siguiente formula:

$$\% REMOCION = \left[1 - \left(\frac{Fe_{Final}}{Fe_{Inicial}} + \frac{P}{Fe_{Inicial}} \right) \right] * 100$$

Ecuación 3.

Donde:

Fe_{Final} : Concentración de hierro en el efluente

$Fe_{inicial}$: Concentración de hierro en el afluente

P: Concentración de hierro precipitado

6.6 Método de Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados medidos durante la investigación, se estimó la variabilidad de los datos tomados de los efluentes se aplicó un coeficiente de variación que fue utilizado en la determinación del desempeño del sistema a través de un diseño experimental factorial con un factor.

Se utilizó un diseño experimental de un factor (plantas) con 4 niveles que representan 3 tratamientos con coberturas de plantas y un control (sin plantas). así: (M1) control, sin plantas, (M2) 100% *Eichhornia crassipes* adultas; (M3) 100% combinando 50% de *Eichhornia Crassipes* adultas + 50% de *Eichhornia crassipes* juveniles; (M4) 100% con *Eichhornia Crassipes* juveniles; Esto con el fin de determinar cuál de los casos expuestos es el más eficiente en la remoción de hierro total, y así valorar si existen diferencias significativas o no entre los tratamientos bajo estudio de acuerdo al análisis de la eficiencia total y parcial, calculados en términos de la carga.

El análisis individual de varianza (ANOVA) se realizó mediante el empleo del software estadístico XLSTAT versión 2019.02.

Para el contraste de las pruebas de las hipótesis se utilizó una significancia del 5%, con un nivel de confianza del 95%, y se realizó comparaciones entre factores, donde se aplicaron las pruebas de comparación de Tukey, Fisher y Duncan que permite determinar cuáles de las variables analizadas presentan diferencias significativas entre los arreglos estudiados.

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN AFLUENTE

En el tabla 5, descrita a continuacion, se presentan los valores obtenidos en la caracterizacion realizada en el afluente del humedal artificial, en el cual se evaluaron cuatro parametros.

Tabla 5. Caracterizacion en el afluente.

PARAMETRO	RESULTADO	UNIDADES	Resolución 0631 del 2015
HIERRO TOTAL	6229,45	mg/L	1 mg/L
DQO	355	mg/L O ₂	155 mg/L O ₂
pH	6	h+	6 - 9 h+
TEMPERATURA	27	°C	reporte

Fuente. Autores, 2019.

Los resultados demuestran un elevado contenido de hierro total, y un valor de DQO acorde a las características típicas de las aguas residuales de mediana concentracion de contaminantes. Así mismo, estos resultados revelan el incumplimiento del laboratorio de agrobiotecnología con respecto a las concentraciones limites exigidas en la Resolución 0631 del 2015.

7.2 UNIDAD DE OBSERVACIÓN

7.2.1 Diseño del humedal artificial

Basados en los valores escogidos en la tabla 4, se procede al cálculo del área, volumen, caudal y tiempo de retención hidráulico del humedal artificial.

7.2.1.1 Calculo del área superficial.

El área superficial del humedal se determina así:

$$A_s = L * W$$

Ecuación 4

$$A_s = 3 \text{ m} * 1 \text{ m}$$

$$A_s = 3 \text{ m}^2$$

Donde:

L= Largo de humedal (m)

W= Ancho del humedal (m)

7.2.1.2 Calculo del volumen

El volumen del humedal artificial se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = A_s * H$$

Ecuación 5

$$V = 3 \text{ m}^2 * 1 \text{ m}$$

$$V = 3 \text{ m}^3$$

Donde:

H= Profundidad del humedal

7.2.1.3 Calculo de la constante de reacción de primer orden.

$$K_T = K_{20} * (1,06)^{T_a - 20^\circ C}$$

Ecuación 6

$$Kt = 1.104 \text{ d}^{-1} * (1,06)^{27^\circ C - 20^\circ C}$$

$$Kt = 1,656 \text{ d}^{-1}$$

Dónde:

$$K_{20} = 1,104 \text{ d}^{-1}$$

T_a = Temperatura del medio [°C]

Se consideró que los humedales construidos actuaron como reactores biológicos, por lo que su rendimiento puede estimarse por medio de una cinética de primer orden. (Reed, 1990).

La ecuación básica de los reactores de flujo a pistón es:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_T t}$$

Ecuación 7

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-(1,656 * 20 \text{ d}^{-1})}$$

$$\frac{C_e}{C_o} = 4,13 \times 10^{-15}$$

Asumiendo que para este caso el flujo es en pistón.

Dónde:

C_e = Concentración del contaminante en el efluente [mg/L]

C_o = Concentración del contaminante en el afluente [mg/L].

K_T = Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura [s⁻¹].

t = Tiempo de retención hidráulica en el humedal.

7.2.1.4 Calculo del caudal de diseño.

El caudal se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q = \frac{V * K t}{\ln \frac{C_o}{C_e}}$$

Ecuación 8

$$Q = \frac{3\text{m}^3 * 1,65}{\ln(\frac{1}{4,13 \times 10^{-15}})}$$

$$Q = 0,15m^3/d$$

$$Q = 0,1 L/min$$

7.2.1.5 Calculo del tiempo de retención hidráulico.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Ecuación 9

$$TRH = \frac{3m^3}{0,15 m^3/d}$$

$$TRH = 20 d$$

7.2.2 Construcción del humedal artificial

Luego de establecer en la tabla 4 las dimensiones del humedal artificial, se procedió a su construcción, utilizando ladrillos H-10, arena, grava, una llave de regulación de caudal y la separación de una tubería PVC de 2" de diámetro, la cual conectaba por un extremo directamente a la cajilla de inspección en la que es descargada el agua residual del laboratorio de agrobiotecnología, y por el otro extremo ahora se evacúa el efluente del humedal artificial.



Figura 7. Construcción del humedal.

Fuente: Autores, 2019.

7.2.2.1 Operación del humedal artificial

Para el estudio de sistemas de tratamiento de cualquier tipo de agua es muy importante conocer las condiciones de operación, ya que estas definen qué cambios o transformaciones pueden presentarse y, por ende, su óptimo funcionamiento (García, 2018).

El humedal artificial operaba bajo condiciones de flujo superficial semi-continuo, con rangos de temperatura estables y un ligero aumento del pH a medida que transcurría el tiempo de tratamiento del agua residual, como se puede observar en las figuras 8 y 9.

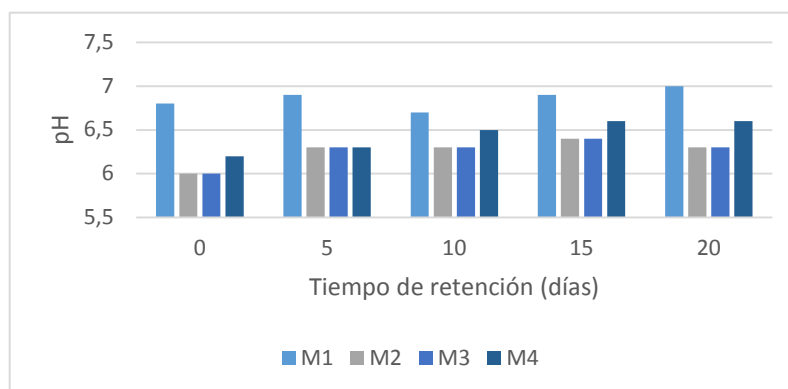


Figura 8. pH en función del tiempo

Fuente: Autores, 2019.

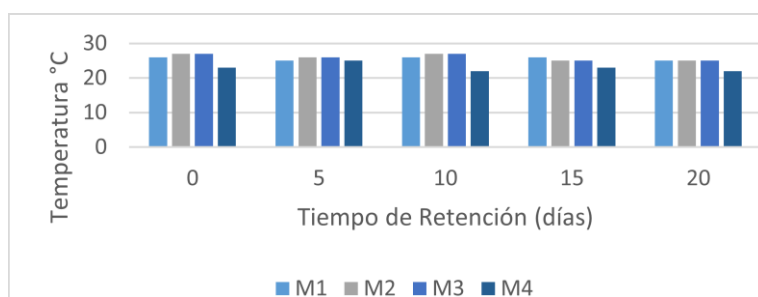


Figura 9. Temperatura del agua en función del tiempo

Fuente: Autores, 2019.

Las variables de operación del sistema son presentadas en la tabla 6.

Tabla 6 Valores Operacionales.

PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
CAUDAL	0,1	L/min
VOLUMEN DEL SISTEMA	3	m ³
TIEMPO DE RETENCION	20	días

Fuente: Autores, 2019.

7.3 SELECCIÓN Y ADAPTACIÓN DE ESPECIES VEGETALES

De acuerdo con la metodología planteada, el número total de individuos seleccionados y adaptados para esta investigación fueron 171, entre adultas y juveniles, tal y como se describe en la tabla 7.

Tabla 7. Selección de individuos.

TRATAMIENTO	# DE INDIVIDIOS	# DE REPETICIONES	# TOTAL DE INDIVIDUOS
M1: HUMEDAL ARTIFICIAL SIN INDIVIDUOS	0	3	0
M2: 100% EICHHORNIA CRASSIPES ADULTAS	16	3	48
M3: 50% EICHHORNIA CRASSIPES ADULTAS + 50% EICHHORNIA CRASSIPES JUVENILES	16	3	48
M4: 100% EICHHORNIA CRASSIPES JUVENILES	25	3	75
TOTAL			171

Fuente: Autores, 2019.

7.4 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Todas las plantas fueron sometidas al lavado de sus hojas y raíces y posterior adaptación durante una (1) semana en un estanque piscícola. Luego de la adaptación de las especies vegetales, se procedió a la implementación del humedal artificial, teniendo en cuenta el diseño experimental planteado en la metodología.



Figura 10 Eichhornia en adaptación, estanque piscícola.

Fuente: Autores, 2019.

Los resultados expresados en las tablas 8, 9, 10 y 11 corresponden al promedio de los valores obtenidos en las 3 repeticiones de cada tratamiento:

7.4.1 Tratamiento M1: Humedal artificial sin individuos (control)



Figura 11. Humedal artificial sin individuos.

Fuente: Autores, 2019.

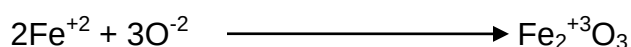
Los resultados que se muestran en la tabla 8, no descartan la presencia de hierro total en el efluente, esto es debido a que, en la lámina superior de agua del humedal artificial, el contacto con el oxígeno es mayor, lo que provoca que la biodisponibilidad de los metales se reduzca debido a su precipitación como óxidos, (Silveira, 2003).

Tabla 8. Porcentaje de remoción tratamiento M1.

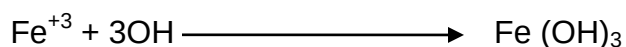
HUMEDAL ARTIFICIAL SIN INDIVIDUOS	PARAMETROS	TIEMPO DE RETENCION				
		AFLUENTE	DÍA 5	DÍA 10	DÍA 15	EFLUENTE (día 20)
	HIERRO TOTAL (mg/L)	6229,4	5890,32	5320,5	4450,76	3740,66
	% REMOCION DEL SISTEMA	0%	5%	15%	29%	40%
	pH	6,8	6,9	6,7	6,9	7
	TEMPERATURA (°C)	26	25	26	26	25
	DQO (mg/L)	355	298	244	205	123
	% REMOCION	0,00%	16,06%	31,27%	42,25%	65,35%

Fuente: Autores, 2019.

En el caso del hierro, esta son algunas de las reacciones que producen compuestos insolubles:



Óxido de Hierro (III)



Hidróxido de Hierro (III)

En el caso de la remoción de la DQO, la materia orgánica sedimentable es rápidamente eliminada en los sistemas por condiciones de reposo, mientras que la eliminación de la DBO soluble puede ser eliminada por microorganismos presente en el agua residual (Mumtaz, 2014).

Esto pudo ocurrir en el control de este estudio, debido a que la falta de plantas da lugar a la aireación por parte de la atmósfera, lo que conduce a la oxidación de la carga orgánica por organismos presentes, (Vymazal, 2009) especialmente en condiciones de altas temperaturas que favorecen la reacción como es el caso de la ciudad de Valledupar.

7.4.2 Tratamiento M2: 100% Eichhornia crassipes adultas.



Figura 12. Humedal artificial con Eichhornia adulta.

Fuente: Autores, 2019.

Los resultados que se observan en la tabla 9, evidencian que la remoción de hierro total en este tratamiento es del 95%. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por la Universidad centro occidental (2014), quienes evaluaron la absorción de hierro total en plantas acuáticas como fitorremediadores en aguas residuales industriales obteniendo remociones para *Eichhornia crassipes* de 28,82% para el día 5 y 98,04% para el día 30, y un 97,47 % por parte de la *Lemna minor*. Dentro de su investigación además se concluyó que en comparación con *Lemna minor*, la *Eichhornia crassipes* remueve en menor tiempo el hierro en el agua residual industrial usada en la investigación, debido a que el proceso de absorción fue más rápido favoreciendo la vinculación a la superficie biológica (biosorción).

Tabla 9. Porcentaje de remoción tratamiento M2.

HUMEDAL ARTIFICIAL + INDIVIDUOS ADULTOS	PARAMETROS	TIEMPO DE RETENCION				
		AFLUENTE	DÍA 5	DÍA 10	DÍA 15	EFLUENTE (día 20)
	HIERRO TOTAL (mg/l)	6229	3665,9	1629,29	451,716	280,3935
	% REMOCION DEL SISTEMA	0%	41%	74%	93%	95%
	pH	6	6,3	6,3	6,4	6,3
	TEMPERATURA (°C)	27	26	27	25	25
	DQO (mg/l)	355	250	175	120	88
	% REMOCION	0,00%	29,58%	50,70%	66,20%	75,21%

Fuente: Autores, 2019.

Para la remoción de la DQO, es el sistema radicular de la planta quien juega un papel fundamental, pues es allí donde se realiza la absorción de nutrientes y contaminantes presentes en el agua residual, y al mismo tiempo se puede considerar que son los microorganismos que viven adheridos a ellas los que se encargan de la eliminación de los contaminantes que no son aprovechados por las plantas (Sánchez, 2011).

Lo anterior se evidencia en este tratamiento, donde encontramos el mayor porcentaje de remoción, lo que ofrece este tratamiento es la gran superficie de contacto que tienen las raíces de mayor tamaño con el agua residual en comparación a los otros tratamientos donde se usó *Eichhornia crassipes* joven como lo observamos en la figura 13, ya que esta les baña por completo, lo que permite una gran actividad depuradora por medio de estas.

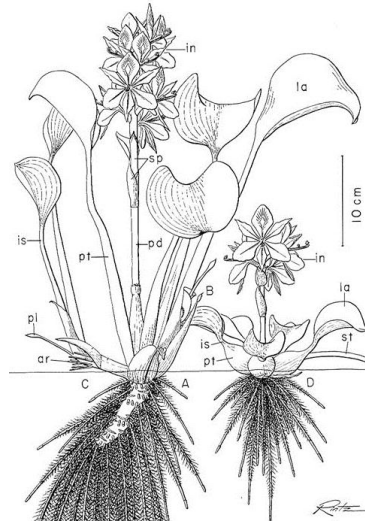


Figura 13. *Eichhornia crassipes* adulta vs *Eichhornia crassipes* joven.

Fuente: Bugwoodwiki, BCIPEUS/*Eichhornia crassipes*.

Se observó además un ligero cambio en el pH del sistema, lo que puede significar un bajo contenido de nutrientes (dando lugar a una relación C/N desfavorable que dificulta el crecimiento microbiano), alto contenido de compuestos biodegradables (que dan lugar a dificultades en el funcionamiento de los sistemas biológicos) (Petrucchioli, 2002) , fluctuaciones en carga y concentración (diaria y estacionalidad), y fitotoxicidad atribuida a tóxicos orgánico y compuestos inorgánicos (fenoles o taninos) (Arienzo, 2009).

7.4.3 Tratamiento M3: 50% *Eichhornia crassipes* adultas + 50% *Eichhornia crassipes* juveniles.

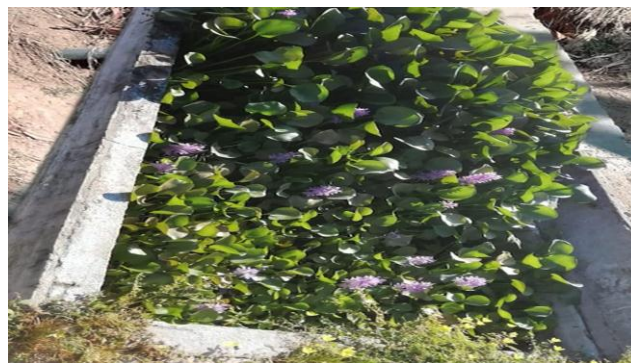


Figura 14. Humedal con tratamiento M3.

Fuente: Autores, 2019.

La remoción de Hierro total en este tratamiento disminuyó en un 15% con respecto al tratamiento M2, esto se debe a que, principalmente el 50% de los individuos utilizados en este ensayo presentaban un sistema radicular en desarrollo, lo cual se traduce en un menor contacto del contaminante con los individuos. Sin embargo, en los resultados obtenidos en la remoción de la DQO no hubo gran diferencia con respecto al tratamiento M2.

Tabla 10. Porcentaje de remoción tratamiento M3.

HUMEDAL ARTIFICIAL + INDIVIDUOS ADULTOS + INDIVIDUOS JUVENILES	PARAMETROS	TIEMPO DE RETENCION				
		AFLUENTE	DÍA 5	DÍA 10	DÍA 15	EFLUENTE (día 20)
	HIERRO TOTAL (mg/l)	6220	5201,345	3417,49	2645,93	1250,89
	% REMOCION DEL SISTEMA	0%	17%	45%	58%	80%
	PH	6	6,3	6,3	6,4	6,3
	TEMPERATURA (°C)	27	26	27	25	25
	DQO (mg/l)	355	275	192	122	95
	% REMOCION	0,00%	22,54%	45,92%	65,63%	73,24%

Fuente: Autores, 2019.

7.4.4 Tratamiento M4: 100% Eichhornia crassipes juveniles

La remoción de hierro total y DQO en este tratamiento fue del 57% Y 69,01%, respectivamente, resultados que se asemejan a los obtenidos por (N. Boniardi, 1999) quienes estudiaron la efectividad de la especie acuática Lemna gibba, en el tratamiento de riles con contenidos de metales pesados. Se encontró que

concentraciones relativamente altas de Fe^{3+} , fueron removidos en un 54,4% y de DQO en un 64,7%.

Tabla 11. Porcentaje de remoción tratamiento M4.

HUMEDAL ARTIFICIAL+ INDIVIDUOS JUVENILES	PARAMETROS	TIEMPO DE RETENCION				
		AFLUENTE	DÍA 5	DÍA 10	DÍA 15	EFLUENTE (día 20)
	HIERRO TOTAL (mg/l)	6240	5550,79	4349,7	3220,27	2657,38
	% REMOCION DEL SISTEMA	0%	11%	30%	48%	57%
	PH	6,2	6,3	6,5	6,6	6,6
	TEMPERATURA (°C)	23	25	22	23	22
	DQO	355	273	222	165	110
	% REMOCION	0%	23%	37%	54%	69,01%

Fuente: Autores, 2019.

La semejanza de los resultados de este tratamiento con la de *Lemna gibba* descrita anteriormente, se debe a que se requiere una gran cantidad de individuos para ocupar todo el espacio de la unidad experimental, y que ambos individuos poseen un sistema radicular reducido.

A continuación, podemos observar las gráficas comparativas de la remoción de hierro total en función del tiempo de cada tratamiento:

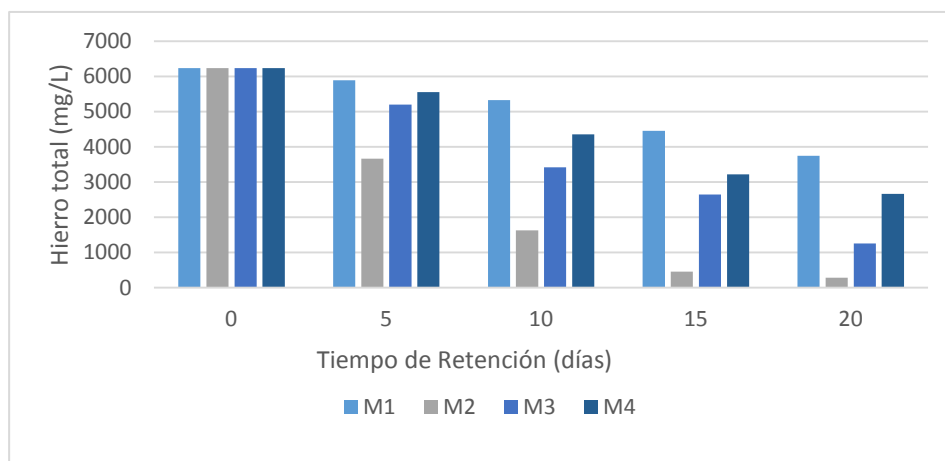


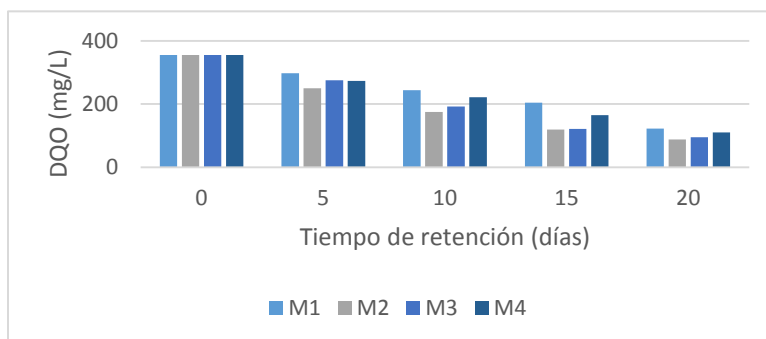
Figura 15. Concentración de hierro total en función del tiempo.

Fuente, Autores 2019.

Al analizar esta figura, podemos evidenciar que los 5 primeros días de tratamiento, es el tiempo que toma en adaptarse la planta al medio, y a los 10 días hay una remoción de hierro total entre 15% - 45% para los tratamientos M1, M3 y M4. Además se evidencia que a medida que transcurre el tiempo de remediación de las plantas en el agua residual, la concentración de hierro disminuye notablemente.

En esta gráfica queda demostrado que el tratamiento M2 presenta una gran significancia con respecto a los otros tratamientos, ya que a los 10 días de operación, ya presentaba una remoción de hierro total del 75%. Así mismo, podemos observar a continuación, la gráfica de remoción de DQO en función del tiempo:

Figura 16. Concentración de DQO en función del tiempo.



Fuente: Autores, 2019.

Como podemos observar, todos los tratamientos demostraron ser eficiente en la remoción de este tipo de contaminante, pues los porcentajes varían entre el 65% y 75% en los tratamientos evaluados.

7.5 DETERMINACIÓN DE HIERRO EN LA PLANTA

La determinación de hierro total en las plantas se realizó anterior a la puesta en marcha del humedal artificial, este procedimiento se realizó, con el objetivo de obtener datos más acercados a la realidad.

En este procedimiento se seleccionaron 5 individuos adultos y 5 individuos juveniles, con el fin de obtener el valor promedio de hierro total, siguiendo el procedimiento descrito en la metodología. Los valores obtenidos en la tabla 16, coinciden con lo dicho por Rodríguez (1997), el cual señala que la concentración de hierro en este tipo de planta oscila entre 1.500 a 2.800 mg Fe/kg.

Tabla 12. Determinación de hierro en la planta.

INDIVIDUOS	RESULTADO
Eichhornia crassipes adultas	2300 mg/L Fe
Eichhornia crassipes juveniles	1065 mg/L Fe

Fuente: Autores, 2019.

Así mismo, se realizó el análisis de acumulación de hierro total, a todas las especies utilizadas en el humedal artificial; los valores consignados en la tabla 13, son el resultado del promedio de las tres repeticiones realizadas en los tratamientos M2, M3 y M4.

De los resultados obtenidos, podemos inferir que no hay diferencia significativa con el porcentaje de remoción de todo el sistema, y que efectivamente, son las plantas quienes tienen la mayor influencia en la remoción del hierro total en el humedal artificial.

TRATAMIENTO	RESULTADO	VALOR PROMEDIO DE LAS ESPECIES	TOTAL	% ACUMULACION
M2: 100% Eichhornia crassipes adultas	42655,05	36800	5855,05	93,49
M3: 50% Eichhornia crassipes adultas + 50% Eichhornia crassipes juveniles	31770,29	26920	4850,29	78,08
M4: 100% Eichhornia crassipes juveniles	29797,07	26625	3172,07	50,61714636

Tabla 13. Acumulación de hierro en la planta

Fuente: Autores, 2019.

7.6 DETERMINACION DE HIERRO TOTAL PRECIPITADO

Para la determinación del hierro total precipitado se utilizaron los valores promedios de cada tratamiento con excepción del tratamiento M1 en el cual no se utilizó ningún individuo.

Tabla 14. Determinación de hierro total precipitado.

TRATAMIENTO	CONCENTRACION DE HIERRO TOTAL EN CADA TRATAMIENTO (mg/L)	HIERRO TOTAL PRECIPITADO (mg/L)
M2: 100% Eichhornia crassipes adultas	5855,05	93,55
M3: 50% Eichhornia crassipes adultas + 50% Eichhornia crassipes juveniles	4850,29	118, 82
M4: 100% Eichhornia crassipes juveniles	3172,07	410,55

Fuente: Autores, 2019.

7.7 PORCENTAJE DE REMOCIÓN

Para determinar el porcentaje de remoción hacemos uso de la ecuación 3. Los resultados presentados a continuación representan el promedio de los datos obtenidos en las 3 repeticiones.

Tabla 15. Porcentaje de remoción por tratamiento.

TRATAMIENTO	% REMOCION
100% Eichhornia crassipes adultas	93,45%
50% Eichhornia crassipes adultas + 50% Eichhornia crassipes juveniles	78%
100% Eichhornia crassipes juveniles	50%

Fuente: Autores, 2019.

Estos resultados demuestran que la utilización de *Eichhornia crassipes* en humedales artificiales, es una alternativa de tratamiento efectiva en la remoción de hierro total, además es amigable con el medio ambiente debido a que sustituye a los compuestos químicos y opera en condiciones de bajos consumos de energía.

7.8 ANALISIS ESTADISTICO

El análisis estadístico consistió de un análisis de varianza ANOVA, y de 3 pruebas (Tukey, Fisher, Duncan), para determinar, si existen diferencias significativas entre los tratamientos en la remoción de Hierro total y DQO, este análisis se realizó a través del software XLSTAT versión 21,1.

7.8.1 Análisis estadístico hierro total

Para el desarrollo del análisis de varianza, se establecen 2 hipótesis:

Hipótesis nula (H_0) = $M_1=M_2=M_3=M_4$

Hipótesis alternativa (H_a)= $M_1\neq M_2\neq M_3\neq M_4$

Tabla 16. Análisis de varianza, hierro total.

Análisis de varianza					
Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Modelo	3	19844754,448	6614918,149	43567,852	< 0,0001
Error	8	1214,642	151,830		
Total corregido	11	19845969,090			

Fuente: Autores, 2019.

Debido a que el valor obtenido de Pr en el análisis de varianza es menor al valor de significancia del 5%, se puede concluir que existen diferencias entre las medias de los tratamientos, y por tanto se rechaza la hipótesis nula, y se acepta la hipótesis alternativa. Para obtener información más específica sobre las diferencias entre medias, es necesario utilizar métodos de comparaciones múltiples como el de Tukey, Fisher y Duncan.

7.8.1.1 Tratamientos / TUKEY (HSD) / Análisis de las diferencias entre las categorías con un intervalo de confianza de 95%.

Tabla 17. Análisis de los tratamientos por Tukey.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Dif	Significativo
M1 vs M2	3446,837	342,600	3,202	< 0,0001	Sí
M1 vs M3	2226,667	221,321	3,202	< 0,0001	Sí
M1 vs M4	1070,000	106,353	3,202	< 0,0001	Sí
M4 vs M2	2376,837	236,247	3,202	< 0,0001	Sí
M4 vs M3	1156,667	114,967	3,202	< 0,0001	Sí
M3 vs M2	1220,170	121,279	3,202	< 0,0001	Sí
Valor crítico del d de Tukey:			4,529		

Fuente: Autores, 2019.

7.8.1.2 Tratamientos / FISHER (LSD) / Análisis de las diferencias entre las categorías con un intervalo de confianza de 95%.

8 Tabla 18. Análisis de los tratamientos por Fisher.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Dif	Significativo
M1 vs M2	3446,837	342,600	2,306	< 0,0001	Sí
M1 vs M3	2226,667	221,321	2,306	< 0,0001	Sí
M1 vs M4	1070,000	106,353	2,306	< 0,0001	Sí
M4 vs M2	2376,837	236,247	2,306	< 0,0001	Sí
M4 vs M3	1156,667	114,967	2,306	< 0,0001	Sí
M3 vs M2	1220,170	121,279	2,306	< 0,0001	Sí
LSD-valor:			23,2		

Fuente: Autores, 2019.

8.1.1.1 Tratamientos / DUNCAN / Análisis de las diferencias entre las categorías con un intervalo de confianza de 95%.

Tabla 19. Análisis de los tratamientos por Duncan.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Dif	alfa (Modificado)	Significativo
M1 vs M2	3446,837	342,600	2,457	< 0,0001	0,143	Sí
M1 vs M3	2226,667	221,321	2,403	< 0,0001	0,098	Sí
M1 vs M4	1070,000	106,353	2,306	< 0,0001	0,050	Sí
M4 vs M2	2376,837	236,247	2,403	< 0,0001	0,098	Sí
M4 vs M3	1156,667	114,967	2,306	< 0,0001	0,050	Sí
M3 vs M2	1220,170	121,279	2,306	< 0,0001	0,050	Sí

Fuente: Autores, 2019.

De los resultados obtenidos en los análisis de tratamientos de Tukey, Fisher y Duncan, se puede concluir que existen diferencias significativas entre todos los

tratamientos, lo que indica que hubo un aporte significativo por parte de Eichhornia Crassipes en la remoción de hierro total con respecto al tratamiento M1(control).

Los resultados también indican que utilizar una mayor cantidad de plantas no es proporcional a la eficiencia y por el contrario lo que genera una importancia significativa en la remoción de hierro total son el tamaño y desarrollo de las plantas.

8.1.2 Análisis Estadístico DQO

Al igual que en el análisis estadístico de hierro total, se establecen dos hipótesis para el desarrollo del análisis de varianza:

Hipótesis nula (H_0) = $M_1=M_2=M_3=M_4$

Hipótesis alternativa (H_a)= $M_1 \neq M_2 \neq M_3 \neq M_4$

Tabla 20. Análisis estadístico DQO.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Modelo	3	2004,917	668,306	1336,611	< 0,0001
Error	8	4,000	0,500		
Total corregido	11	2008,917			

Fuente: Autores, 2019.

Como el valor de Pr obtenido del análisis de varianza fue menor al 5% de significancia, se rechaza la hipótesis nula, y se acepta la hipótesis alternativa, la cual indica que al menos 2 de las medias de los tratamientos evaluados son diferentes, y por lo tanto es necesario realizar los análisis de comparaciones múltiples de Tukey, Fisher y Duncan.

8.1.2.1 Tratamiento / TUKEY (HSD) / Análisis de las diferencias entre las categorías con un intervalo de confianza de 95%.

Tabla 21. Análisis de los tratamientos por Tukey.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Dif	Significativo
M1 vs M2	33,333	57,735	3,202	< 0,0001	Sí
M1 vs M3	27,000	46,765	3,202	< 0,0001	Sí
M1 vs M4	12,667	21,939	3,202	< 0,0001	Sí
M4 vs M2	20,667	35,796	3,202	< 0,0001	Sí
M4 vs M3	14,333	24,826	3,202	< 0,0001	Sí
M3 vs M2	3,333	10,970	3,202	< 0,0001	Si
Valor crítico del d de Tukey:			4,529		

Fuente: Autores, 2019.

8.1.2.2 Tratamiento / FISHER (LSD) / Análisis de las diferencias entre las categorías con un intervalo de confianza de 95%.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Dif	Significativo
M1 vs M2	33,333	57,735	2,306	< 0,0001	Sí
M1 vs M3	27,000	46,765	2,306	< 0,0001	Sí
M1 vs M4	12,667	21,939	2,306	< 0,0001	Sí
M4 vs M2	20,667	35,796	2,306	< 0,0001	Sí
M4 vs M3	14,333	24,826	2,306	< 0,0001	Sí
M3 vs M2	3,133	10,970	2,306	< 0,0001	Si
LSD-valor:			1,331		

Tabla 22. Análisis de los tratamientos por Fisher.

Fuente: Autores, 2019.

8.1.2.3 Tratamiento / DUNCAN / Análisis de las diferencias entre las categorías con un intervalo de confianza de 95%.

Tabla 23. Análisis de los tratamientos por Duncan.

Contraste	Diferencia	Diferencia estandarizada	Valor crítico	Pr > Dif	alfa (Modificado)	Significativo
M1 vs M2	33,333	57,735	2,457	< 0,0001	0,143	Sí
M1 vs M3	27,000	46,765	2,403	< 0,0001	0,098	Sí
M1 vs M4	12,667	21,939	2,306	< 0,0001	0,050	Sí
M4 vs M2	20,667	35,796	2,403	< 0,0001	0,098	Sí
M4 vs M3	14,333	24,826	2,306	< 0,0001	0,050	Sí
M3 vs M2	6,333	10,970	2,306	< 0,0001	0,050	Sí

Fuente: Autores, 2019.

Aunque todos los tratamientos evaluados demostraron ser eficientes en la remoción de DQO, los resultados obtenidos en las pruebas anteriormente realizadas, indican que existen diferencias significativas entre ellas, lo cual indica que esas diferencias pueden ser determinantes en el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

Así mismo, se evidencia la influencia de las plantas en la remoción de este contaminante, pues existen diferencias significativas con respecto al control, en especial en los tratamientos M2 y M3 los cuales tenían un mayor desarrollo radicular.

CONCLUSIONES

El análisis físico-químico del agua residual del laboratorio de agrobiotecnología, permitió conocer las características de este tipo de agua residuales, en la que se evidenció una concentración de hierro total 100 veces mayor al límite exigido por la Resolución 0631 del 2015 y un valor de DQO acorde a las características típicas de las aguas residuales de mediana concentración de materia orgánica.

La implementación de humedales artificiales es una alternativa eficiente, económica, y amigable con el medio ambiente en la remediación de aguas residuales con alto contenido de hierro total, debido al bajo consumo de energía convencional y la practicidad en su diseño, construcción y operación.

Las eficiencias encontradas en los tratamientos M2 (100% *Eichhornia crassipes* adultas) y M3 (50% *Eichhornia crassipes* adultas + 50% *Eichhornia crassipes* juveniles) alcanzaron remociones de Hierro total del 93,5% y 78,89% respectivamente, ofreciendo una alternativa eficiente en la remoción de este contaminante. Además, se puede evidenciar que la variación en el tamaño de *Eichhornia Crassipes*, especialmente en su zona radicular, es la que determina valores diferentes en los porcentajes de remoción, esta relación es directa, ya que a mayor tamaño o cantidad de raíces es mayor el porcentaje de remoción del metal.

Los resultados demuestran que una alta cantidad de plantas utilizadas en la experimentación, no determina que los resultados sean óptimos, pues el tratamiento M4 contó con 9 plantas más con respecto a los otros tratamientos, pero los resultados de remoción que obtuvo este tratamiento fueron inferiores.

A pesar de que los porcentajes de remoción de DQO en todos los tratamientos fueron similares, según las pruebas realizadas en el análisis estadístico, si existen diferencias significativas, lo que quiere decir que estas diferencias en la remoción puede ser muy importantes para cumplir con los estándares ambientales exigidos.

RECOMENDACIONES

En la implementación de humedales artificiales, es recomendable que el sistema siempre esté expuesto a la luz solar, ya que es vital para los procesos fotosintéticos de las macrofitas.

Sería recomendable, extender el tiempo de retención del sistema a 30 días, con el objetivo de conocer si la planta continúa removiendo contaminantes, se satura o muere.

En esta investigación, se analizó la remoción de la DQO, como indicador de contaminación, para futuras investigaciones, se recomienda realizar el análisis de la remoción de la DBO_5 , para determinar la relación DBO_5/DQO ya que según Tchobanoglous, (2000) los valores de la relación DBO_5/DQO en aguas residuales no tratados oscilan entre 0.3 y 0.8. Generalmente, los procesos de descomposición biológica comienzan y ocurren de manera rápida con proporciones de DBO_5/DQO de 0.5 o mayor. Las proporciones entre 0.2 y 0.5 son susceptibles al tratamiento biológico.

Se debe tener en cuenta que al momento de trabajar con los tratamientos M2 (100% *Eichhornia crassipes* adultas) y M3 (50% *Eichhornia crassipes* adultas + 50% *Eichhornia crassipes* juveniles) siempre se debe procurar que se conserve el espaciamiento entre las plantas, ya que el momento de que las plantas crecen, estas tienden a unirse, formando una red.

Para las aguas residuales con altos contenidos de contaminantes, se recomienda la aplicación de un tratamiento preliminar o posterior, como por ejemplo los filtros de grava, con el objetivo de llevar las concentraciones a los límites exigidos por las normatividades.

BIBLIOGRAFÍA

Agunbiade, B. O.-O. (2009). "Phytoremediation potential of Eichhornia crassipes in metal-contaminated coastal water". *Bioresource Technol.* Vol. 100.

Ambientum. (16 de junio de 2017). *Ambientum*. . Obtenido de <https://www.ambientum.com/diccionario-de-terminos-medioambientales-letra/r>

Ambientum. (17 de Junio de 2017). *Ambientum*. . Obtenido de <https://www.ambientum.com/diccionario-de-terminos-medioambientales-letra/t>

Arienzo, M. C. (2009). Pruebas de fitotoxicidad de aguas residuales de bodega para el tratamiento de humedales construidos. . *Diario de materiales peligrosos*, 94-99.

Arteaga, W. C. (2010). "Manejo de plantas acuáticas invasoras en embalses de EPM. Caso: Buchón de agua (Eichhornia crassipes) en el embalse Porce II, Antioquia-Colombia.". *Revista EPM*. Nº. 3., 22-35.

Barba., L. (2002). *Fitoremediacion en el tratamiento de aguas residuales con metales pesados*. Cali, Colombia: Universidad del valle.

Branco-Murgel, S. (1984). *Limnologia sanitaria estudio de la polución de aguas continentales*. . Washintong, D.C.

C. Rodriguez, M. D. (1996). *Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales*.

Ebro, C. H. (2010). *Metodologia para el establecimiento del estado ecologico segun la directiva Marco del Agua*. . España.

Emdupar. (2016). "EMDUPAR AVANZA EN LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS PÚBLICOS". *PLAN ESTRATEGICO 2016 – 2019*. . valledupar, Cesar, Colombia.

García, J. G. (2018). *Construcción de un humedal artificial a nivel de laboratorio vivo, en el predio "Mi Ranchito", en la vereda Olarte, localidad Usme–Bogotá*. Bogota.

Gil, M. J. (2013). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. . *produccion + limpia*, 52-73.

Grace, J. y. (1981). Partición del hábitat y desplazamiento competitivo en totora (Typha): estudios de campo experimentales. . *El naturalista estadounidense* , 463-474.

Hernández, A. (1990). *Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa*. Editum.

Insuasty Manrique, M. J. (2017). *Estudio sobre captura eficiente de Metales Pesados empleando procesos de Biorremediación*.

J. Casas, N. A. (2008). Análisis comparativo de la remoción de un sustrato orgánico por las macrófitas pistia stratiotes y egeria densa en un sistema batch. *Gestión y Ambiente*, 295-300.

Jamil., G. S. (1997). Studies on the effect of heavy metal pollution on pistia stratiotes l. (water lettuce). *Indian Journal of Environmental Health*, 1–7.

Jumbo, J. D. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor (Lenteja de agua), y Eichornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera*. Ecuador.

Kampfenkel, K. V. (1995). Efectos del exceso de hierro en las plantas de Nicotiana plumbaginifolia (implicaciones para el estrés oxidativo). . *Fisiología vegetal*, 725-735.

M. Condori, L. D. (2010). Planta de tratamiento de aguas residuales con macrófitas para comunidades cercanas al lago Titicaca. *Journal Boliviano de Ciencias*, 63-66.

M. Delgado, M. B. (1993). Uptake of zn, cr and cd by water hyacinths. . *Water Research*, 269-272.

Maine, M. V. (2001). Cadmium uptake by floating macrophytes. *Water research*, 29-26.

Malik., A. (2007). "Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth." . *Environment International*. Vol. 33. , 122-138.

Martelo, L. B. (2012). Macrofitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería y ciencia.*, 221-243.

Martín-Lara, M. D. (2008). *Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados.*

Martorell. (2010). *Biodisponibilidad de metales pesados en dos ecosistemas acuáticos de la costa suratlántica andaluza afectados por contaminación difusa.* Cádiz.

Mendoza, O. y. (2010). *Utilización del Duckweed la remoción de nutrientes y materia orgánica de efluentes de las lagunas anaerobias del Sistar "el salguero" de Valledupar.* Valledupar.

Mendoza. (2016). *Fitorremediación como alternativa de tratamiento terciario de agua residual láctea de la empresa Dairy partner americas (DPA).* Valledupar.

Miranda-Arce, M. G.-F.-O. (2018). *Fitodepuración de ortofosfatos del agua del lago de los Reyes Aztecas, Tláhuac, Ciudad de México.* . 221-231: .

Mishra, V. B. (2009). Eliminación y acumulación de mercurio por macrófitos acuáticos de un efluente de una mina de carbón a cielo abierto. *Diario de materiales peligrosos.*, 749-754.

Mkandawire, M. B. (2004). Capacidad de Lemna gibba L. (Duckweed) para la fitorremediación de uranio y arsénico en aguas de relaves de minas. . *International Journal of Phytoremediation*, 347-362.

Mumtaz, S. H. (2014). Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 1-12.

Núñez, R. y. (2004). "Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones". *ciencia*, 70.

Petrucchioli, M. D. (2002). Aerobic treatment of winery. *Process Biochemistry.*, 821-829.

Purves, D. (1988). *Trace Element Contamination of the Enviroment*. . Amsterdam, Países Bajos.

Ramírez, L. &. (2010). *Evaluación de la utilización del duckweed como alternativa de pos-tratamiento de aguas residuales domesticas en efluentes de lagunas de oxidación*. Valledupar.

Reed, S. (1990). *Natural systems for Wastewater Treatment, Manual of Practice* . USA.

Romero., J. A. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Principios de diseño*. . Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rosas, H. (2001). *Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat*. Cataluña.

Sánchez, R. (2011). *Evaluación del humedal artificial de la hostería Cuicocha, utilizado para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. . Quito, Ecuador.

Sandoval M. Celis J., J. J. (2005.). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*., 17-25.

Sandoval, J. J. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 14, 17–25, 224, 227, 236, 237.

Sarker., G. B. (1997). The role of salvinia rotundifolia in scavenging aquatic pb (II) pollution: a case study. . *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 295-300.

Silveira, M. L. (2003). *Biosolids and heavy metals in soils*.

Singh, L. K. (2015). Analysis of heavy metals removal by Eichhornia Crassipes (Mart.) Solms. *World Journal of Pharmmacology and Pharmaceutical Sciences*, 732-739.

STOTTMEISTER, U. W. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands. . *Biotechnology Advances* , 93-117.

Suarez, R. y. (2007). *Remoción de nutrientes y materia orgánica en reactores tipo Batch operados con lemna sp tratando efluentes de lagunas anaerobias*. Valledupar, Colombia.

Tamayo, T. (2001). *El proceso de la investigación científica incluye evaluación y administración de proyectos de investigación*. Mexico: Limusa.

Taylor, H. (2001). *Inductively Coupled Plasm-Mass Spectrometry. Practices and Techniques*. USA: Academic Press. ISBN 0-12-683865-8.

Tchobanoglous, G. C. (2000). Una revisión de la cinética de tratamiento para humedales construidos. 723-734.

Torres, R. &. (2005). *Desarrollo e implementación de un sistema de monitorización mediante sensores químicos de un proceso de biosorción para la recuperación de ion cobre (II) en efluentes acuosos*. Cataluña.

Torres., S. M. (2009). *“Estudio del aprovechamiento del lechuguin, Eichhornia crassipes, del embalse de la represa Daniel Palacios como biosorbente de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales*. . Mexico: Universidad Polotecnica Salesiana.

Tripathi, B. T. (2011). “Efficiency of combined process of ozone and bio-filtration in the treatment of secondary effluent.”. ” *Bioresource Technol. Vol. 102.*, 50-56.

Vymazal, J. y. (2009). Removal of organic in constructed wetlands with horizontal sub-surface . *Science of the Total Environment*, 3911-3922.

Wang, W. (1990). *Literature Review on Duckweed Toxicity Testing*. . Elsevier.

ANEXOS

A. CARACTERIZACION DEL AGUA RESIDUAL

Preparación curva de calibración HIERRO TOTAL (mg/L)

HIERRO TOTAL	ABSORVANCIA	HIERRO TOTAL	ABSORVANCIA
(mg/l)	510 nm	mg/l	510 nm
0	0	5500	0,3711
100	0,00291	6000	0,4062
500	0,0286	6500	0,4413
1000	0,06	7000	0,4764
1500	0,0917	7500	0,5115
2000	0,1304	8000	0,5466
2500	0,1605	8500	0,5817
3000	0,1956	9000	0,6168
3500	0,2307	9500	0,6519
4000	0,2658	10000	0,687
4500	0,3009		
5000	0,336		

Tabla 24. Curva de calibración Hierro total.

Fuente: Autores, 2019.

Para la preparación de la curva de calibración cada muestra contó con 5 repeticiones y posteriormente se obtuvo el valor promedio, esta curva fue

diseñada mediante dos rangos, un rango bajo de 0 mg/L a 5000 mg/L, y un rango alto de 5500 mg/L a 10000 mg/L.

Con los datos obtenidos se construyó la curva de calibración ilustrada a continuación, en la que se representa mg/l de hierro total vs absorbancia.

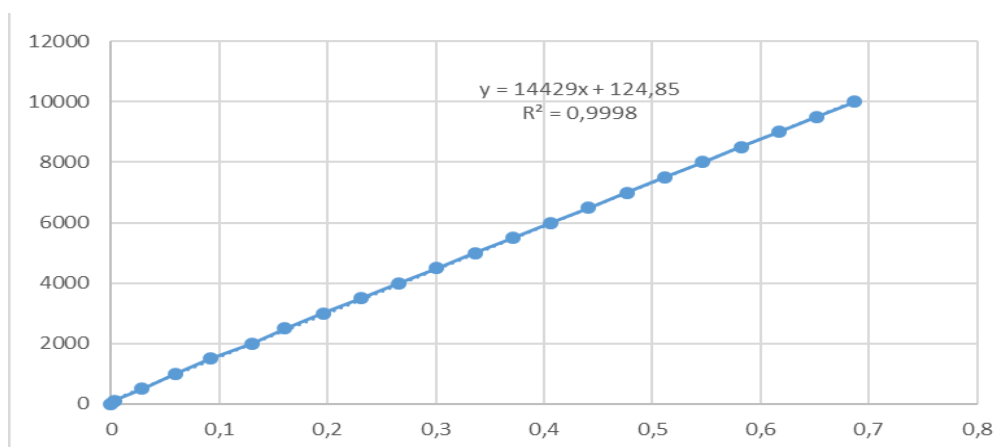
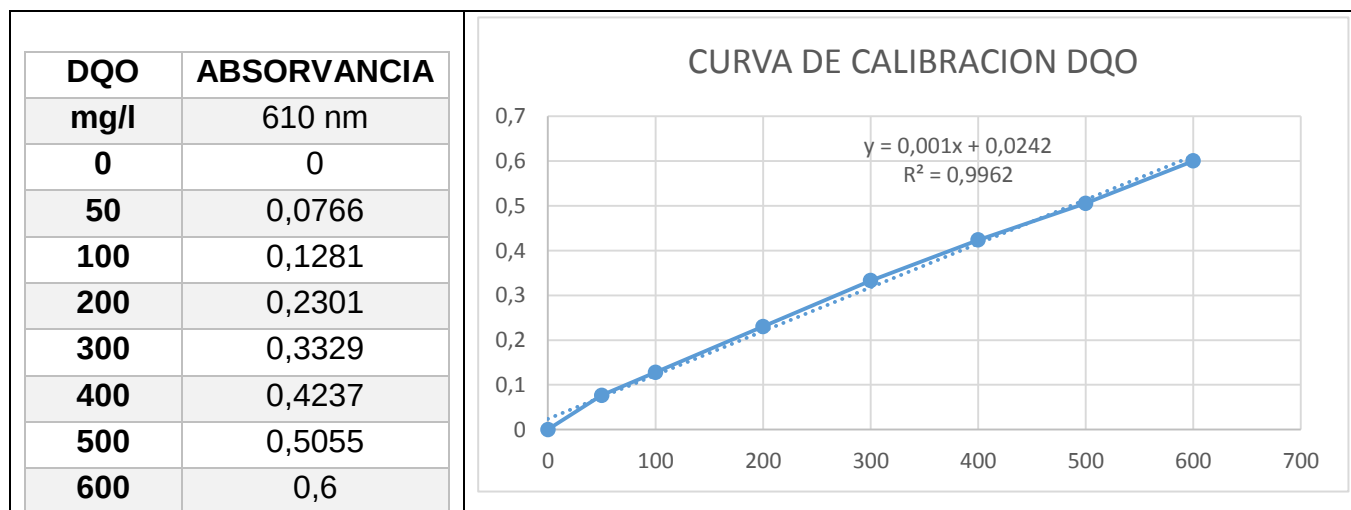


Figura 17. Curva de calibración hierro total.

Fuente: Autores, 2019

Preparacion curva de calibracion DQO (mg/L)

Tabla 25. Curva de calibracion DQO.



Fuente. Autores, 2019.

Siguiendo las indicaciones descritas en la metodología, se construyó la curva de calibración para el análisis de DQO en mg/L.

B. REGISTRO FOTOGRÁFICO

1. Procedimientos en el laboratorio.

Espectrofotómetro, Shimadzu UV- Vis 1601.



Concentraciones para la curva de calibración.



Preparación de la curva de calibración.



Insumos para la determinación de hierro en las plantas.

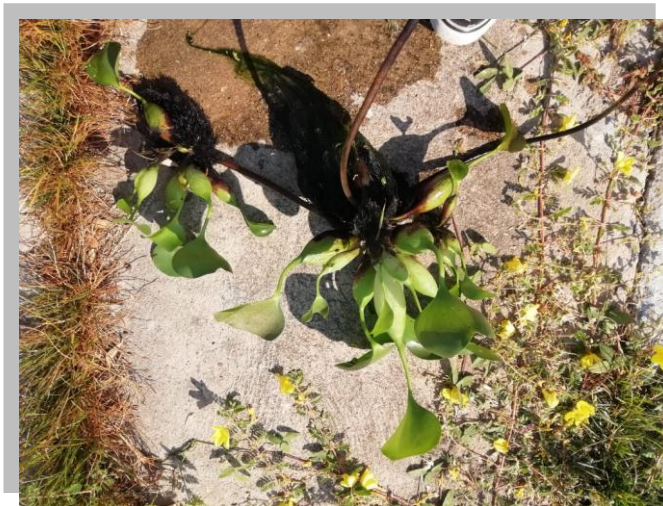


Determinación de hierro en las plantas a través del espectrofotómetro



2. Evolución de las plantas.

Eichhornia Crassipes en etapa temprana.



Eichhornia Crassipes en etapa juvenil, presencia de flor.



Eichhornia Crassipes, con ramificaciones.



Eichhornia Crassipes en etapa adulta, con ramificaciones.

