

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CONDUCTIVIDAD Y TURBIEDAD, DE AGUA
RESIDUAL DE UNA INDUSTRIA METALMECANICA, UTILIZANDO PROTOTIPOS POR
LOTES DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO LIBRE.

ADRIANA RESTREPO FARFAN

LUISA MARIA TAPIA QUINTERO

MANIZALES

UNIVERSIDAD CATOLICA DE MANIZALES

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2019

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CONDUCTIVIDAD Y TURBIEDAD, DE AGUA
RESIDUAL DE UNA INDUSTRIA METALMECANICA, UTILIZANDO PROTOTIPOS POR
LOTES DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO LIBRE.

ADRIANA RESTREPO FARFAN

LUISA MARIA TAPIA QUINTERO

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE AUTORÍA DE ESTUDIANTE O GRUPO
DE ESTUDIANTES QUE SE ARTICULA A UNA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
INSTITUCIONAL

TUTOR: ALEJANDRO RINCON SANTAMARIA

CO-TUTOR: SEBASTIAN PACHECO

MANIZALES

UNIVERSIDAD CATOLICA DE MANIZALES

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2019

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo lo dedicamos a Dios, por cada detalle y momento durante la realización del presente y por permitirnos adquirir los anhelos más importantes para nosotras.

Agradecemos a los directores de nuestro proyecto de grado, Alejandro Rincón Santamaría y Sebastián Pacheco, por compartirnos sus conocimientos y estar presentes a lo largo de la realización del trabajo.

Por otro lado, gratificamos el esfuerzo de nuestros padres por ayudarnos a crecer como personas y profesionales, a ellos les damos infinitas gracias.

CONTENIDO

1. RESUMEN	10
ABSTRACT	11
2. PLANTEAMIENTO PROBLEMA	12
2.1 Pregunta concreta que se quiere responder:	13
3. REVISIÓN DE LITERATURA	14
4. JUSTIFICACIÓN	16
4.1. Beneficios Científicos:	16
4.2. Beneficios prácticos:	17
4.3. Beneficios de formación:	17
5. OBJETIVOS	18
5.1. Objetivo General.	18
5.2. Objetivos Específicos	18
6. MARCO TEÓRICO	19
6.1. Humedales artificiales:	19
6.2. Clasificación de los Humedales Artificiales	20
6.3. Tipos de humedales artificiales según el flujo de agua:	21
6.4. Humedales artificiales de flujo superficial (FWS)	21
6.5. Componentes del Humedal Artificial:	23
6.5.1. Agua:	23

6.5.2. <i>Sustrato</i>	24
6.5.3. <i>Plantas macrófitas o Material vegetal:</i>	24
6.5.4. <i>Comunidades de microbios:</i>	25
6.5.5. <i>Invertebrados acuáticos:</i>	26
7. Metales pesados	26
7.2. <i>Zinc.</i>	27
8. Normativa	27
8.1 <i>Resolución 0631 del 2015</i>	27
8.2 <i>Resolución 1207 de 2014</i>	28
9. METODOLOGÍA	29
9.1. Objetivo específico primero ‘Evaluar el efecto de pH inicial y tipo de planta sobre remoción de sólidos disueltos, conductividad y la variación de pH, oxígeno disuelto’.	29
9.2. Objetivo específico segundo: ‘Evaluar la evolución de temperatura, pH, oxígeno disuelto, nivel de agua, conductividad y sólidos disueltos en las celdas de humedales a lo largo del tiempo’.	34
10. RESULTADOS Y DISCUSION	39
10.1. Objetivo específico primero ‘Evaluar el efecto de pH inicial y tipo de planta sobre remoción de sólidos disueltos, conductividad y la variación de pH, oxígeno disuelto’.	39
10.2.1. <i>Ensayo1:</i>	42

<i>10.2.2. Ensayo 2:</i>	47
11. CONCLUSIONES	52
12. ANEXOS	54
13. BIBLIOGRAFÍA	55

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Humedal artificial de flujo superficial (HAFS).....	22
Figura 2. Parámetros y valores máximos permisibles de vertimiento a cuerpos de agua.....	28
Figura 3: Límites máximos permisibles para el reuso de agua.....	28

INDICE DE IMÁGENES.

Imagen 1: Prototipos de humedales.	29
Imagen 2: Muestra después de sedimentación	30
Imagen 3: Materiales e insumos para medición de oxígeno disuelto	31
Imagen 4: Medición de oxígeno disuelto.....	32
Imagen 5: Medición de solidos disueltos totales.....	35
Imagen 6: Prueba de medición de oxígeno disuelto	36
Imagen 7: Prueba de medición de sólidos disueltos totales.	37
Imagen 8: Prototipo de humedal	38

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Método de medición.	33
Tabla 2: Método de conservación y almacenamiento de muestras	33
Tabla 3: Condiciones y parámetros iniciales del agua adicionada a los prototipos de humedales.	39
Tabla 4: Condiciones y parámetros finales del agua tratada en los prototipos de humedales.	40
Tabla 5: Comparación de condiciones y parámetros iniciales y finales	41
Tabla 6: Parámetros fisicoquímicos del ensayo de depuración para celda con Pasto vetiver. Ensayo 1	42
Tabla 7: Parámetros fisicoquímicos del ensayo de depuración para celda con Pasto vetiver. Ensayo 2	47
Tabla 8. Calculos	54

1. RESUMEN

En la ciudad de Manizales, Caldas; una de las principales fuentes de contaminación hídrica, es el vertimiento de aguas residuales por parte del sector industrial como lo es la industria metalmeccánica, la cual tiene altas concentraciones de zinc y cobre, que afecta de una u otra manera las propiedades fisicoquímicas del agua y a su vez la vida acuática. Debido a esto se pretende utilizar humedales artificiales que son zonas en los cuales se ve la intervención del hombre, para el proceso de remoción de metales pesados que están presentes en aguas residuales industriales, simulando así el sistema y las propiedades de un humedal natural.

De esta manera el objetivo general de este proyecto se centra en evaluar la remoción de conductividad y sólidos disueltos de agua residual de una industria metalmeccánica, utilizando prototipos por lotes de humedales construidos de flujo libre o superficial; constituidos por un efluente y una planta. Para ello se utilizarán plantas como pasto vetiver y *Typha angustifolia*, y una base de tierra para el crecimiento de la planta.

Dado a las características de estas plantas, se debe considerar un proceso de adaptación tanto con el agua como con la cantidad de metales presentes en ella, nivelando su concentración de pH entre 8,5 y 9,0; teniendo en cuenta que se realizará esta nivelación, con el objetivo de aumentar el Ph y así las plantas puedan asimilar estos niveles de concentración; y determinar cuál de los dos tipos de planta, desempeña un mejor rendimiento en la remoción de estos metales.

ABSTRACT

In the city of Manizales, Caldas; one of the main sources of water pollution, is the dumping of wastewater by the industrial sector such as the metal-mechanic industry, which has high concentrations of zinc and copper, which affects in one way or another the physicochemical properties of water and turn the aquatic life. Due to this, it is intended to use artificial wetlands that are areas in which the intervention of man is seen, for the process of removal of heavy metals that are present in industrial wastewater, simulating the system and the properties of a natural wetland.

In this way, the general objective of this project is to evaluate the removal of conductivity and dissolved solids from wastewater from a metal-mechanic industry, using prototypes by batches of constructed wetlands with free or superficial flow; constituted by an effluent and a plant. For this, plants such as vetiver grass and *Typha angustifolia*, and a ground base for plant growth will be used.

Given the characteristics of these plants, a process of adaptation must be considered both with water and with the amount of metals present in it, leveling its pH concentration between 8.5 and 9.0; taking into account that this leveling will be carried out, with the aim of increasing the Ph and thus the plants can assimilate these concentration levels; and determine which of the two types of plant, performs better performance in the removal of these metals.

2. PLANTEAMIENTO PROBLEMA

Actualmente, la zona industrial de Manizales genera vertimientos sobre la quebrada Manizales que genera contraindicaciones; a pesar que en varios casos se realice un proceso de depuración, los contaminantes están presentes aun teniendo su proceso de remoción. En el caso de la industria metalmecánica considerada, los metales mayoritarios en los vertimientos son Zn y Cu.

El presente proyecto tiene como propósito remover los metales pesados presentes en el agua de una industria metalmecánica la cual es rica en Zn y Cu, los cuales tienen grandes impactos negativos en los puntos de vertimiento, especialmente en la quebrada Manizales ya que estos son muy tóxicos aún en concentraciones relativamente bajas, no son biodegradables y por el contrario se acumulan a lo largo de la cadena trófica (Fergusson 1992).

La industria metalmecánica considerada utiliza un tratamiento de agua residual a partir de la electrocoagulación, el cual actualmente está sobrecargado, de modo que el nivel de remoción de metales es bajo. Esta empresa busca la implementación de la precipitación química, la cual es una tecnología tradicional para la remoción de metales que incluye aumento de pH, adición de floculantes, y sedimentación. Así en un futuro haya un buen tratamiento primario, hay una necesidad de utilizar una etapa complementaria en la operación, para cumplir con los valores restrictivos impuestos por la normativa y para reducir los impactos ambientales.

El sistema de tratamiento de las aguas ricas en metales comprende electrocoagulador encargado de remover en su mayoría los metales presentes; además de un sedimentador y un filtro de arena; el cual presenta una falla en su proceso por obstrucción, por ende, el costo de tratamiento y operación en este sistema es alto.

2.1 Pregunta concreta que se quiere responder:

Para la remoción de metales pesados presentes en el agua residual de la industria metalmeccánica se puede usar plantas como, la *Typha angustifolia* y el Pasto y se le puede modificar el pH inicial. Entonces surge la pregunta: ¿Cuál sería la planta (*Typha angustifolia* o Pasto vetiver) y el pH inicial más efectivos?

3. REVISIÓN DE LITERATURA

Los estudios sobre remoción de metales mediante humedales construidos, de agua residual de minería y otras aguas con contenido de metales, se han enfocado en analizar distintos parámetros y variables.

El autor Moreno en su estudio de la evaluación de un Humedal artificial de flujo superficial empleando lenteja de agua (*lemna minor*) para el tratamiento de aguas residuales generadas por la industria de curtiembres, ubicada en el barrio San Benito, Bogotá D.C, a orillas del río Tunjuelito, utilizo 4 humedales de igual capacidad y cada uno construido con una efectividad de retención hidráulica de 18 horas. Se sembró lenteja de agua en uno de los humedales y en otro no hubo presencia de esta planta, pero si contenía grava, con el fin de determinar el efecto de la planta sobre la remoción de contaminantes. Se midió la temperatura del agua, pH, SST, DQO, nitrógeno orgánico total, fósforo total, cromo trivalente y contenido de cromo en la planta presente en cada humedal. Se encontró que el tiempo de retención fue el indicado para que se realizará una remoción de estos contaminantes y el humedal que tuvo mejor eficiencia fue el que tenía lenteja de agua.

En la tesis de grado de María Fernanda Calle Macas y Ramiro Alberto Coello Montoya, evaluaron la eficiencia de remoción de contaminantes industriales, que se puede alcanzar al utilizar humedales artificiales de flujo superficial. Para la experimentación se usaron las especies vegetales acuáticas *Lemna Minor*, *Eichhornia Crassipes* y *Dracaena Sanderiana*, cada una en un reactor de vidrio; y un tiempo de retención de 15 días. Después de iniciar el tratamiento se realizaron mediciones cada tres días de concentraciones de los contaminantes.

Las concentraciones finales se compararon con límites máximos permisibles y criterios de calidad admisibles, se determinó la eficiencia de remoción de cada una de las plantas para los diferentes contaminantes (cadmio, cianuro, arsénico y mercurio) y se encontró que los humedales artificiales de flujo superficial son muy eficientes en la remoción de cadmio y cianuro; y en menor proporción para arsénico y mercurio.

Se concluyó que los humedales artificiales constituyen una opción útil y económica, y a ello se añade que estos sistemas no requieren energía eléctrica para su funcionamiento. En el caso de remoción de metales las plantas tienen un rol importante.

4. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto tiene como propósito evaluar la remoción de metales pesados presentes en el agua de una industria metalmecánica del sector de maltería de Manizales la cual es rica en Zn y Cu.

La industria metalmecánica cuenta con un amplio terreno, en el cual se podría construir un humedal artificial de flujo libre como etapa complementaria. Esto contribuiría a reducir los impactos del vertimiento en la quebrada Manizales y en el ecosistema acuático. Además, contribuiría a cumplir los valores de la normativa, y permitiría el reusó en actividad agrícola. Además, los humedales presentan otras ventajas como la reducción de la producción de lodos y por ende una disminución de costos en su tratamiento y su operación al utilizarlo.

4.1. Beneficios Científicos:

Con el proyecto, se genera información sobre:

- Las condiciones de operación (pH inicial y tipo de planta), que genera una mayor remoción de metales,
- El tiempo que se requiere para alcanzar la remoción final, es decir el tiempo de estabilización.
- Los porcentajes de remoción alcanzados.

4.2. Beneficios prácticos:

La información generada por el proyecto, es útil para el planteamiento y construcción de humedal a nivel real, para la depuración del agua considerada. Así, en un futuro para un buen tratamiento primario, el humedal construido es una buena opción como tratamiento terciario (complementario), que ayuda a:

- Cumplir la normativa, en especial para el caso de los parámetros máximos permisibles.
- Facilitar la reutilización del agua, para la disposición de riego agrícola.

4.3. Beneficios de formación:

Con la realización del proyecto planteado se contribuye a la formación académica como ingenieros ambientales; esto, puesto que se aprende sobre:

- Tratamiento de aguas residuales ricas en metales.
- Uso de humedales construidos para la depuración de agua residual.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General.

Evaluar la remoción de metales del agua residual de una industria metalmecánica de la zona industrial de Manizales, utilizando prototipos por lotes de humedales construidos de flujo libre.

5.2. Objetivos Específicos

- Identificar el efecto de pH inicial y tipo de planta sobre remoción de sólidos disueltos, conductividad y la variación de pH, oxígeno disuelto.
- Cuantificar la evolución de temperatura, pH, oxígeno disuelto, nivel de agua, conductividad y sólidos disueltos en la mejor celda a lo largo del tiempo.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Humedales artificiales:

“Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente.” (Andrade, et al., 2010. pág. 7).

El tratamiento de aguas residuales para depuración se lo realiza mediante sistemas que tienen tres partes principales:

1. Recogida
2. Tratamiento
3. Evacuación al lugar de restitución

Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales:

- Aguas domésticas y urbanas.
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros.
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.

6.2. Clasificación de los Humedales Artificiales

Los humedales artificiales pueden ser clasificados según: (ZAPATA PALACIO, 2014)

- Tipo de vegetación
- Tipo de forma de vida de la vegetación
- Tipo de circulación de flujo de agua

Según el tipo de vegetación o macrófitas que empleen en su funcionamiento pueden ser:

- Macrófitas fijas al sustrato (enraizadas)
- Macrófitas flotantes libres.

Considerando la forma de vida de estas macrófitas, los humedales artificiales pueden ser clasificados en: (ZAPATA PALACIO, 2014)

- ***Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes:*** principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos.
- ***Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas:*** comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.

- **Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes:** En suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos.

6.3. Tipos de humedales artificiales según el flujo de agua:

Los humedales basados en macrófitas enraizadas emergentes pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee: (ZAPATA PALACIO, 2014)

- ***Humedales de flujo superficial:*** si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas.
- ***Humedales de flujo subsuperficial,*** si el agua circula por debajo de la superficial del estrato del humedal.

6.4. Humedales artificiales de flujo superficial (FWS)

Los sistemas de flujo superficial son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0,6 m) y tienen plantas. (ZAPATA PALACIO, 2014)

En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, entre otras. “Pueden constituirse, en lugares turísticos

y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen”. (Andrade et al, 2010. pág. 9).

En el sistema de humedal artificial a flujo libre superficial, (FWS), el nivel de agua está sobre la superficie del terreno, la vegetación está sembrada y fija o suelta y libre emergiendo sobre la superficie del agua es principalmente superficial, lo que se aprovechará para incorporar un sistema de aireación aprovechando el nivel de inclinación del terreno dando un valor agregado a este modelo de humedal artificial. (ZAPATA PALACIO, 2014)

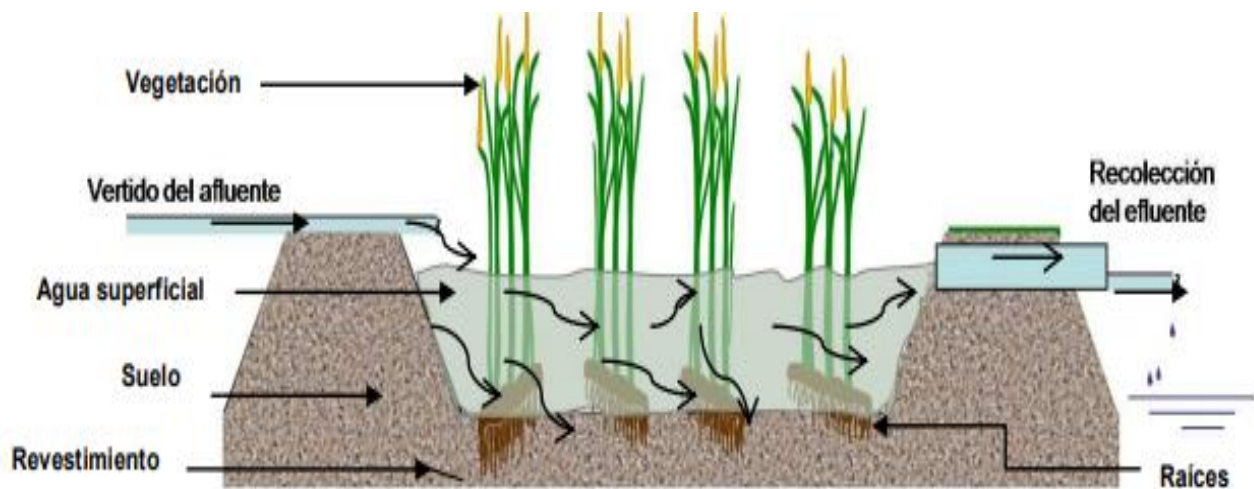


Figura 1: *Humedal artificial de flujo superficial (HAFS)*

Fuente: (GALLEGO, 2010)

6.5. Componentes del Humedal Artificial:

“Los humedales construidos o artificiales consisten en el diseño correcto de un depósito que contiene agua, sustrato, y plantas emergentes, (material vegetal) en su mayoría. Estos componentes pueden variar al momento de construcción un humedal. Otros componentes importantes de los humedales, como las comunidades de microbios y los invertebrados acuáticos, se desarrollan naturalmente” (Totuño Odel. s/f, 4).

Listado de componentes:

- Agua
- Sustrato
- Plantas emergentes, macrófitas o material vegetal
- Comunidades de microbios
- Invertebrados acuáticos

6.5.1. Agua:

Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie de agua y pérdida a través de la transpiración de las plantas). La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces, y rizomas y, segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol (Andrade et al., 2010. pág.12).

6.5.2. *Sustrato*

El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal.

“La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal”. (Andrade et al., 2010. pág.12).

6.5.3. *Plantas macrófitas o Material vegetal:*

Se hablará de macrófitas como el elemento de tipo vegetal que hará la parte fundamental en la descontaminación de las aguas residuales. Las macrófitas constituyen formas macroscópicas de vegetación acuática. Comprenden las macroalgas, las pteridofitas (musgos, helechos) adaptadas a la vida acuática y las angiospermas.

Presentan adaptaciones a este tipo de vida tales como: cutícula fina, estomas no funcionales, estructuras poco lignificadas.

Teniendo en cuenta la morfología y fisiología, las macrófitas pueden clasificarse según la forma de fijación en:

- *Macrófitas emergentes*: “en suelos anegados permanentes o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos” (Andrade et al., 2010. pág.8). para remoción de metales generalmente se usan los humedales de flujo libre que usan macrófitas emergentes.
- *Macrófitas de hojas flotantes*
- *Macrófitas sumergidas*
- *Macrófitas flotantes libres*

6.5.4. Comunidades de microbios:

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos, y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes.

La actividad microbiana:

- Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- Altera las condiciones de potencial redox del sustrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal.

- Está involucrada en el reciclaje de nutrientes.

6.5.5. *Invertebrados acuáticos:*

Los humedales construidos proveen un hábitat para una rica diversidad de invertebrados y vertebrados.

7. Metales pesados

Como constituyentes importantes de muchas aguas se puede encontrar un número importante de metales pesados, aunque su cuantificación sea a niveles de traza. Entre ellos se citan el níquel (Ni), el manganeso (Mn), el plomo (Pb), el cromo (Cr), el cinc (Zn), el cadmio (Cd), el cobre (Cu), el hierro (Fe) y el mercurio (Hg). (RUBIO GOYES. & PAEZ RUALES, 2009)

Los efectos de los metales en aguas residuales y potables pueden ser favorables, tóxicos o simplemente molestos. Algunos metales resultan esenciales, mientras que otros pueden perjudicar a los consumidores del agua, a los sistemas de tratamiento de aguas residuales y a las aguas de depósito. En muchos casos el potencial beneficioso o riesgo depende de la concentración del metal en el cuerpo de agua. (RUBIO GOYES. & PAEZ RUALES, 2009)

Las principales fuentes de generación de aguas residuales con elevadas concentraciones de metales pesados se presentan en las industrias del sector metalmeccánico, en los procesos de galvanizados y metalúrgicos, por la fabricación de acero y por actividades de recubrimiento como niquelado, cromado, cobreado, entre otros, en los que se requieren de varias etapas de limpieza de las superficies metálicas (Zafra y Rodríguez 2002). Estas aguas, además de tener diferentes

concentraciones de sustancias metálicas tóxicas (cromo, cinc, cobre, níquel, latón, cianuros y estaño), presentan residuos como limpiadores alcalinos, sales, aceites y grasas.

7.2. Zinc.

El Zinc (Zn) se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza y constituye aproximadamente un 0,02 % de la corteza terrestre. Adopta la forma de sulfuro (esfalerita), carbonato, óxido o silicato (calamina) de Zinc, combinado con muchos minerales. Es un elemento esencial y beneficioso para el crecimiento humano. Concentraciones por encima de 5 mg/l pueden ser causa de un gusto astringente amargo y de opalescencia en aguas alcalinas. (APHA, 1989).

La capacidad de resistir a la corrosión atmosférica (sufre un proceso de oxidación más lento), permite que industrialmente el Zn sea usado como constituyente de aleaciones y como recubrimiento protector de metales como el hierro fundido o el acero; esta actividad de tratamiento de superficies y en particular el proceso de galvanizado produce fundamentalmente efluentes líquidos de dos tipos: por un lado aparecen, cargas contaminantes altas, en volúmenes relativamente pequeños (efluentes generados en los baños de proceso), por otro lado, efluentes con cargas contaminantes diluidas en grandes volúmenes de agua (efluentes procedentes de la etapa de enjuague o lavado) (Samaniego, 2006).

8. Normativa

8.1 Resolución 0631 del 2015

Establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

Parámetro	Unidad de Medida	Valor Limite Máximo Permissible
Generales		
pH	Unidades de pH	6,0-9,0
Metales y metaloides		
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobre	mg Cu/L	1,0

Figura 2. *Parámetros y valores máximos permisibles de vertimiento a cuerpos de agua*

8.2 Resolución 1207 de 2014

Disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. (Límites máximos permisibles para el reúso de agua).

- Uso agrícola

Variable	Unidad de Medida	Valor Limite Máximo Permissible
Físicos		
pH	Unidades de pH	6,0-9,0
Conductividad	µS/cm	1.500,0
Metales		
Cinc	mg Zn/L	3,0

Figura 3: *Límites máximos permisibles para el reúso de agua*

9. METODOLOGÍA

9.1. Objetivo específico primero ‘Evaluar el efecto de pH inicial y tipo de planta sobre remoción de sólidos disueltos, conductividad y la variación de pH, oxígeno disuelto’.

Actividades:

- Medir características básicas iniciales de la muestra a ser tratada en cada uno de los prototipos de los humedales (temperatura, oxígeno disuelto, concentraciones de conductividad, sólidos disueltos y metales). El agua a tratar es tomada del efluente del electrocuagulador de la industria metalmecánica considerada.
- Verificar las características de los prototipos de humedal (dimensiones, vegetación, espacio para la zona de agua). Los prototipos corresponden a humedales de flujo libre (Free Water Surface), y un tipo de flujo tipo batch (lotes).



Imagen 4: *Prototipos de humedales.*

Fuente: *Autoría propia*

- Tratamiento primario (Precipitación química: Aumento de pH y sedimentación). Se utilizó hidróxido de sodio 1 molar en una cantidad de 70ml en 28.5 litros de la muestra; de los cuales se extrajo 4.5 litros para cada uno de los prototipos de humedales. Se dejó en reposo por 8 días. El fin de este paso es remover metales de acuerdo a un tratamiento primario.


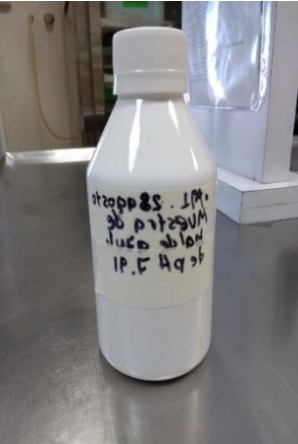


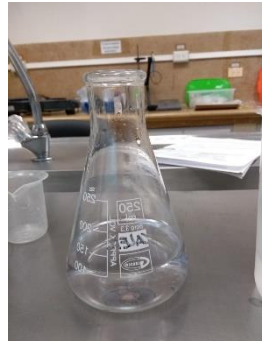
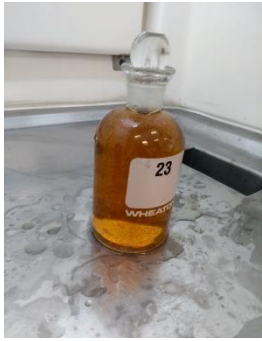
Imagen 5: *Muestra después de sedimentación*

Fuente: *Autoría propia*

- Disposición del agua en los prototipos de humedal. Se utiliza una capa de agua de más o menos de 10 cm de profundidad.
- Revisión y ajuste del plan de muestreo.
- Realización de campañas de toma de muestras y medición de parámetros en campo y en laboratorio. Se toma muestra de cada prototipo de humedal pasados 7 días de adicionar el agua en los humedales, por medio de una jeringa de 50ml en una profundidad de 5cm de la capa de agua, las cuales fueron desplazadas hasta el laboratorio, realizando la medición de los parámetros. Para preservar las muestras para medición de metales (en laboratorio externo) se acidifico 250 ml de muestra tanto iniciales como finales llevándolo a un pH menor a 2 usando ácido nítrico; seguido a esto se lleva a refrigeración. No se realizó filtración previa de la

muestra destinada a medición de metales. Cabe mencionar que las muestras no se realizaron por triplicado, es decir que de cada toma de muestra no se ejecutó ninguna repetición.

	
<p>A. Reactivos usados en el procedimiento de oxígeno disuelto.</p>	<p>B. Acidificación de la muestra para ser preservada y realizar prueba de metales</p>
<p>Imagen 6: <i>Materiales e insumos para medición de oxígeno disuelto</i></p> <p>Fuente: <i>Autoria propia</i></p>	



A. Muestra con solución de MnSO_4 , álcali-yoduro-azida y H_2SO_4 concentrado. (1mL) de cada uno

B. Titulación con tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.025N

C. Muestra con tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.025N

D. Punto final de la titulación con tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.025N y solución de almidón

Imagen 7: *Medición de oxígeno disuelto*

Fuente: *Autoria propia*

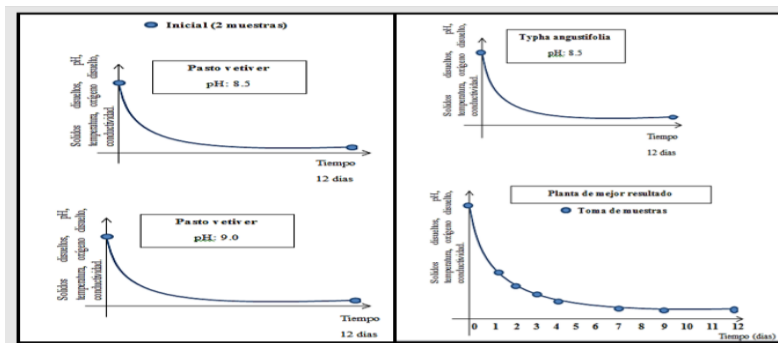
Los métodos de la caracterización fisicoquímica son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Método de medición.	
Parámetro	Método de medición
Temperatura	termómetro de columna de mercurio
Conductividad	Conductivímetro.
pH	Sensor potenciométrico (Potenciométrico; PH-metro).
Oxígeno disuelto	Método yodométrico modificación de azida
Sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos totales (SDT)	Método gravimétrico
Zn, Cu (que son los metales mayoritarios en efluente utilizado)	Método espectrométrico de absorción atómica de llama.

Tabla 2: Método de conservación y almacenamiento de muestras
Para muestras para medición de metales, se realiza acidificación hasta lograr $\text{pH} < 2$, adicionando ácido nítrico, y también refrigeración.

- Registrar datos en forma de tablas a partir de los resultados obtenidos en campo y laboratorio.
- Identificar el efecto del pH inicial sobre el cambio de la conductividad; y sobre el porcentaje de remoción de sólidos y metales.
- Identificar el mejor pH y mejor planta en cuanto a remoción.



Anexo 1. Planteamiento de experimentos



9.2. Objetivo específico segundo: ‘Evaluar la evolución de temperatura, pH, oxígeno disuelto, nivel de agua, conductividad y sólidos disueltos en las celdas de humedales a lo largo del tiempo’.




Actividades:

- Se identifica el mejor pH y planta del objetivo anterior, con base en resultados de remoción. Este pH y planta se consideran para las actividades siguientes.
- Medir características básicas de la muestra a ser tratada (temperatura, oxígeno disuelto, sólidos, etc.). El agua a tratar es tomada del efluente del electrocuagulador de la industria metalmeccánica considerada. La toma de sólidos disueltos totales se realizó por medio de un papel filtro en el cual se colocaron 50 mL de agua del prototipo y después de ser filtrada la muestra se dejó en secado durante dos días.

	
<p>A. Muestra inicial agua residual de una industria metalmecánica pasando por papel filtro(Prueba SDT)</p>	<p>B. SDT presentes en la muestra (Prueba SDT)</p>
<p>Imagen 8: Medición de solidos disueltos totales</p> <p>Fuente: Autoria propia.</p>	

- Acondicionamiento del pH de la muestra (al mejor pH), por medio de hidróxido de sodio. Se utilizó 19.6 ml de NaOH para 8 litros de muestra. Se dejó reposar durante 8 días para que los metales presenten precipitación.
- Disposición del agua en el prototipo de humedal.
- Realización de campañas de toma de muestras del prototipo de humedal. Y medición de parámetros. se toman muestras de 600ml del prototipo de humedal. A este fin, se incorpora una jeringa de 50ml a 5 cm de profundidad de la capa de agua. Estas tomas se realizaron el

primero, segundo, quinto y octavo día. Medición: seguido a cada toma de muestra se realiza la medición de parámetros; incluyendo temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad y sólidos disueltos; y se realiza preservación de la muestra para envió a laboratorio externo para medición de metales. Por ultimo no se realizó repetición (triplicado) de parámetros de cada una de las muestras consideradas.

		
<p>A. Muestra del humedal con solución de $MnSO_4$ Y reactivo álcali-yoduro-azida (prueba oxígeno disuelto)</p>	<p>B. sobrenadante floc de hidróxido de manganeso con ácido sulfúrico (prueba oxígeno disuelto)</p>	<p>C. Muestra titulada con $Na_2S_2O_3$ y adición de solución de almidón (prueba oxígeno disuelto)</p>
<p>Imagen 9: Prueba de medición de oxígeno disuelto</p> <p>Fuente: Autoria propia.</p>		



A. Muestra humedal al octavo día pasando por papel filtro.







B. SDT presentes en la muestra .

Imagen 10: Prueba de medición de sólidos disueltos totales.

Fuente: *autoria propia.*

- Registrar datos en forma de tablas.
- Realizar gráficas a lo largo del tiempo.
- Identificar de forma cualitativa el comportamiento al inicio y al final y al intermedio.

			
A. Prototipo humedal día uno.	B. Prototipo humedal segundo día.	C. Prototipo humedal quinto día.	D. Prototipo humedal octavo día.
<p>Imagen 11: <i>Prototipo de humedal</i></p> <p>Fuente: <i>Autoria propia.</i></p>			

- Se realizó una segunda corrida, con el fin de verificar la evolución temporal de los parámetros, exceptuando concentración de metales.

Cálculos oxígeno disuelto

Fórmula:

$$\text{Mg de OD/L} = \frac{\text{Volumen Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 * \text{Normalidad Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 * 800 * \text{Volumen Botella}}{\text{ml Muestra Valorada} * (\text{Volumen botella} - 2)}$$

Cálculos Sólidos Disueltos

Fórmula:

$$\text{TDS} = \frac{(A - B) * 1000}{\text{ml Muestra}} = \text{Mg/L}$$

Dónde:

A representa el peso del plato de evaporación + el filtrado

B representa el peso del plato de evaporación por sí solo

10. RESULTADOS Y DISCUSION

10.1. Objetivo específico primero ‘Evaluar el efecto de pH inicial y tipo de planta sobre remoción de sólidos disueltos, conductividad y la variación de pH, oxígeno disuelto’.

Tabla 3: Condiciones y parámetros iniciales del agua adicionada a los prototipos de humedales.

(28/08/18)

**Medición realizada con conductímetro*

Planta	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (ms/cm)	Salinidad	SDT (g/l) *	Metales (Mg/L)	
						Zn	Cu
Pasto vetiver	8,6	21,5	4,78	2,6	4,77	0,24	3,52
Pasto vetiver	7,9	21,5	4,66	2,5	4,67	3,46	5,08
Typha angustifolia	7,9	21,5	4,66	2,5	4,67	3,46	5,08

Tabla 4: Condiciones y parámetros finales del agua tratada en los prototipos de humedales.

(04/09/18)

**Medición realizada con conductímetro*

Planta	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (ms/cm)	Salinidad	SDT (g/l) *	Metales Mg/L	
						Zn	Cu
Pasto vetiver	6.75	20,5	3,09	1,6	3,09	0,76	0,57
Pasto vetiver	6.92	20,5	1,86	0,9	1,86	0,92	0,31
Typha angustifolia	7.45	19	2,62	1,3	2,60	1,03	0,34

Tabla 5: Comparación de condiciones y parámetros iniciales y finales

Planta	Muestra inicial			Muestra final			Porcentaje (%)			
	Salinidad	Conductividad (ms/cm)	Metales (mg/l)		Salinidad	Conductividad (ms/cm)			Metales (mg/l)	
			Zn	Cu			Zn	Cu	Zn	Cu
Pasto vetiver	2,6	4,78	0,24	3,52	1,6	3,09	0,76	0,57	-	58,1
Pasto vetiver	2,5	4,66	3,46	5,08	0,9	1,86	0,92	0,31	73,4	93,8
Typha angustifolia	2,5	4,66	3,46	5,08	1,3	2,62	1,03	0,34	70,2	93,3

- Partiendo de los resultados obtenidos se identifica que la celda con planta Pasto Vetiver a un pH inicial de 7,9, arrojó mejores resultados en cuanto a la remoción de los parámetros evaluados.
- La concentración inicial para el caso de Pasto Vetiver, es distintas de los otros casos, debido a que el tratamiento primario utilizó un pH mayor, que generó una mayor remoción.
- En el primer caso (*) de los datos de Zn el valor de porcentaje da negativo ya que hay resuspensión del metal, dando un aumento en este.

10.2. Objetivo específico segundo: ‘Evaluar la evolución de temperatura, pH, oxígeno disuelto, nivel de agua, conductividad y sólidos disueltos en las celdas de humedales a lo largo del tiempo’.

10.2.1. Ensayo 1:

Tabla 6: Parámetros fisicoquímicos del ensayo de depuración para celda con Pasto vetiver. Ensayo 1

Fecha	pH	Turbiedad (NTU)	Conductividad (ms/cm)	Salinidad	TDS (mg/l)*	TDS (mg/l)	Oxígeno disuelto (mg/l)	Temperatura (°C)	Metales	
									Zn	Cu
01/10/18 Muestra inicial	7,68	0,6	4,83	2,6	4840	13600	2,08	20,8	4,0	4,43
02/10/18	6,9	57,1	3,34	1,7	3340			19,5	1,55	0,91
05/10/18	6,98	18,1	2,63	1,3	2630		4,36	18,9	1,30	0,21
08/10/18	7,57	44,9	2,43	1,2	2430	12800	5,57	18	1,17 ^a	0,28 ^b

**Medición realizada con conductímetro*

- *Remoción sólidos disueltos*

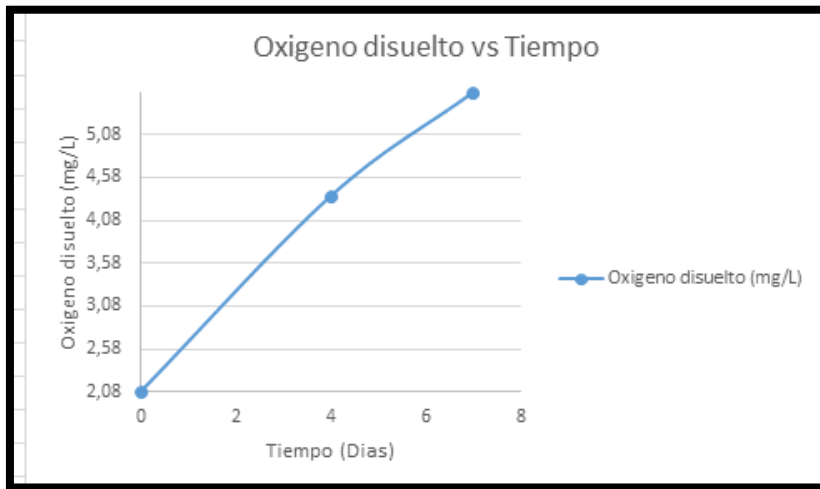
$$\frac{13600-12800}{13600} * 100 = \mathbf{5.9\%}$$

- *Remoción de Zn (a)*

$$\frac{4,0-1,17}{4,0} * 100 = \mathbf{70\%}$$

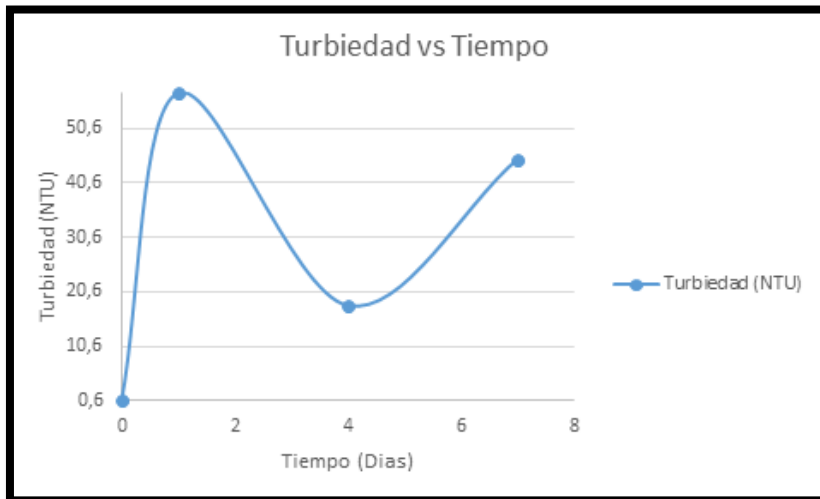
- *Remoción de Cu (b)*

$$\frac{4,43-0,28}{4,43} * 100 = \mathbf{94\%}$$



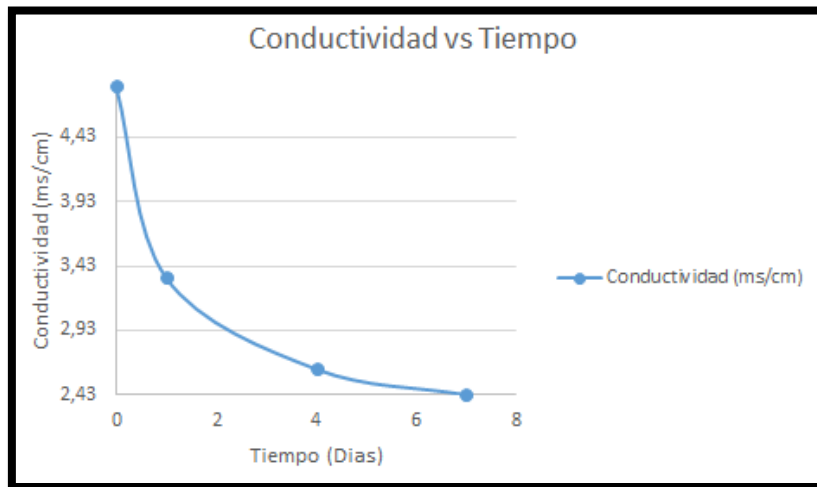
Gráfica 1. Evolución del oxígeno disuelto en el tiempo

En la gráfica 1 se evidencia una proporcionalidad, ya que a medida que el tiempo avanza el oxígeno presente en el humedal aumenta, esto se debe a la baja profundidad utilizada de la capa de agua (10 cm aproximadamente), lo cual permite la incorporación del aire atmosférico.



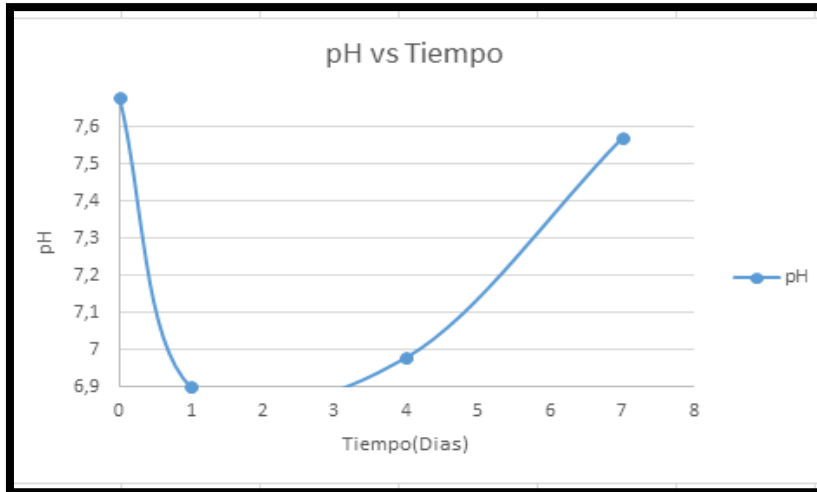
Gráfica 2. Evolución de la turbiedad en el tiempo

La gráfica 2 no es concluyente, ya que en el humedal se tiene presencia de tierra y esta no se disuelve perfectamente con el agua quedando de esta forma partículas en suspensión que puede interferir en la medición de este parámetro, por otra parte las condiciones climáticas de la zona tienen influencias sobre el parámetro.



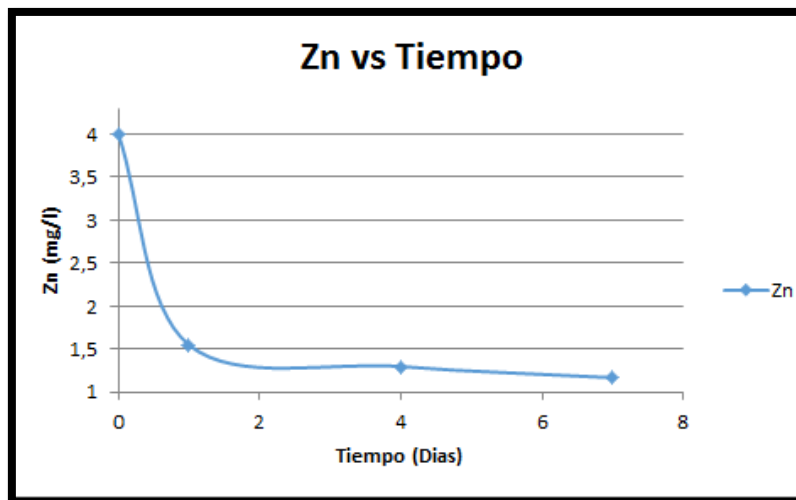
Gráfica 3. Evolución de la conductividad en el tiempo

En la gráfica 3 se observa una tendencia decreciente, ya que a medida que el tiempo pasa la conductividad disminuye, esto significa que el prototipo de humedal ayuda a la disminución de este parámetro, cumpliendo así con la Resolución 1207 del 2014 que establece los límites máximos permisibles sobre el reuso del agua para uso agrícola, incluyendo un valor de conductividad de 1.500 ms/cm y al tratar el agua por medio del humedal esta es de 2,43 ms/cm.



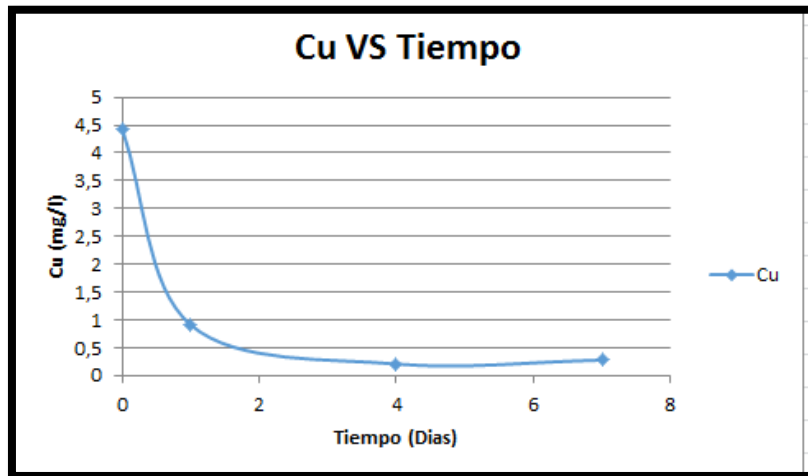
Gráfica 4. Evolución de pH en el tiempo

En la gráfica 4 se observa una tendencia de neutralidad en los primeros cuatro días, ya que el pH pasa de estar de 7,68 a 6,9; posteriormente el pH aumenta nuevamente hasta llegar a 7,57, siendo esto un valor admisible tanto para la resolución 0631 del 2015 y la resolución 1207 del 2014, ya que en ambas resoluciones el rango está entre 6,0 a 9,0.



Gráfica 5. Evolución del Zinc en el tiempo

En la gráfica 5 se observa un comportamiento decreciente, ya que a medida que el tiempo pasa la concentración de metal de zinc disminuye, cumpliendo de esta manera con la resolución 0631 del 2015 y la resolución 1207 del 2014, las cuales establecen los valores máximos permisibles de Zn que no debe superar los 3,0 mg/l, a partir del tratamiento por medio del humedal esta concentración final fue de 1,17 mg/l. También se observa que a los 2 días se obtiene la mayor parte de la remoción.



Gráfica 6. Evolución del cobre en el tiempo

En la gráfica 6 se observa un comportamiento decreciente, llevando así de concentraciones altas de cobre a concentraciones bajas, las cuales cumple con la resolución 0631 del 2015, ya que el valor máximo permisible de este metal es de 1,0 mg/l y con el tratamiento realizado por medio del prototipo esta concentración fue de 0,28 mg/l. También se evidencia que a los dos días se obtiene la mayor parte de la remoción.

10.2.2. Ensayo 2:

Como se había mencionado en la metodología, en este ensayo no se realizó medición de metales.

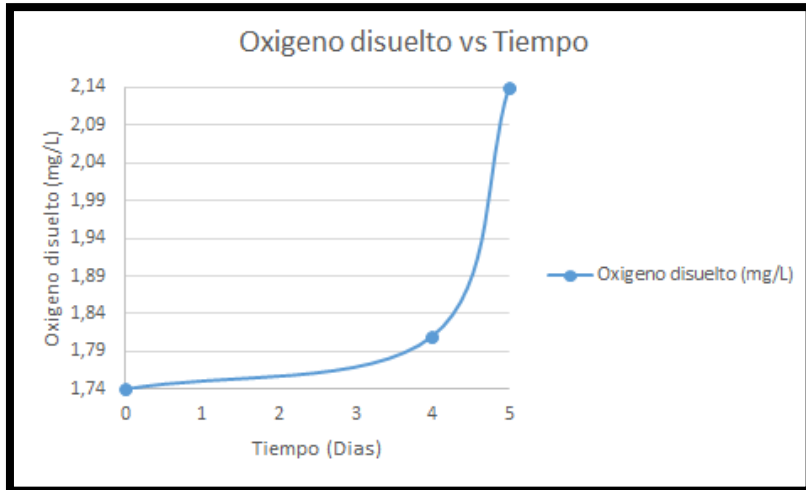
Tabla 7: *Parámetros fisicoquímicos del ensayo de depuración para celda con Pasto vetiver. Ensayo 2*

*Medición realizada con conductímetro

Fecha	pH	Turbiedad(NTU)	Conductividad(ms/cm)	Salinidad	TDS (mg/l)*	TDS (mg/L)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Temperatura (°T)
03/12/18 muestra inicial)	7,8	3,0	4,6	2,5	4630	5600	1,74	21
05/12/18	7,5	36,0	2,5	1,3	2520	5200	1,81	18,8
06/12/18	7,5	12,0	2,5	1,3	2500	4800	2,14	17,5

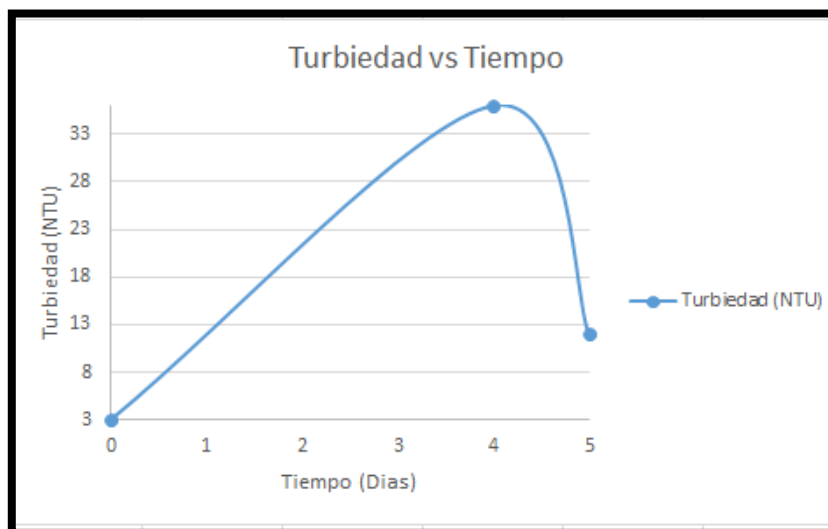
- Remoción sólidos disueltos

$$\frac{5600-4800}{5600} * 100 = \mathbf{14\%}$$



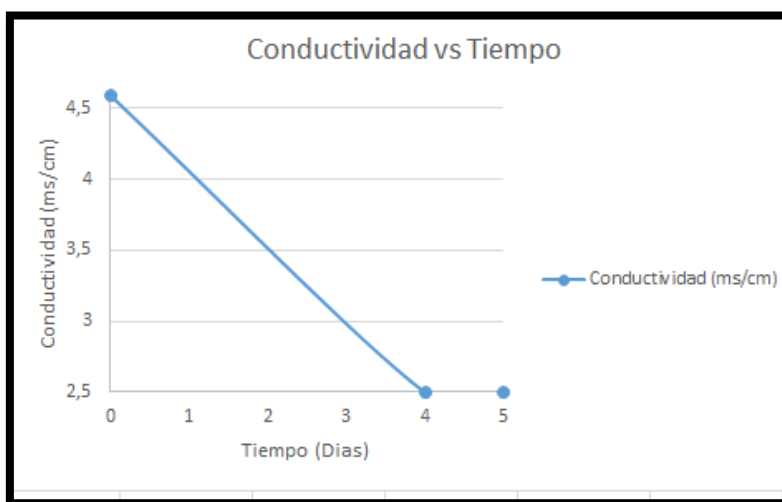
Gráfica 7. Evolución del oxígeno disuelto en el tiempo

En la gráfica 7 se puede evidenciar evolución creciente del oxígeno disuelto. Esto es conveniente en el tratamiento de aguas residuales, pues el oxígeno disuelto contribuye en la oxidación de metales.



Gráfica 8. Evolución de la turbiedad en el tiempo

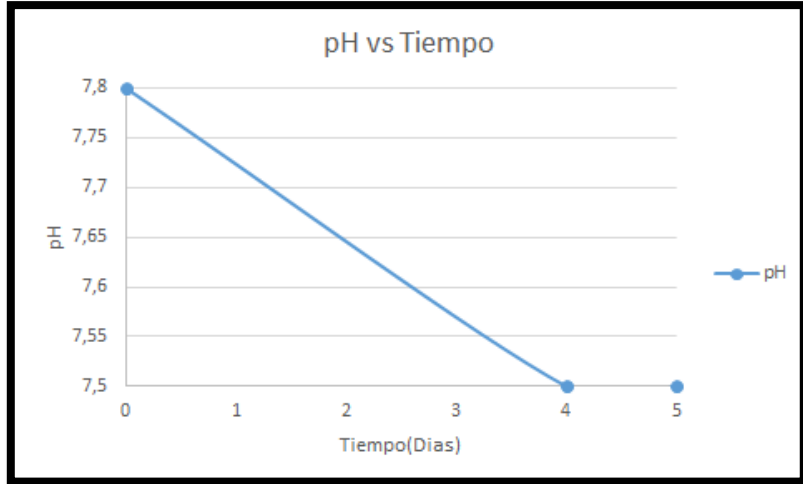
La gráfica 8 nos muestra una evolución cambiante de la turbiedad, lo cual puede ser debido a cambios de temperatura, que a su vez afecta la evapotranspiración y la actividad biológica de la planta. En los momentos en que hay aumento de turbiedad existe influencia de disolución de la tierra en el agua.



Gráfica 9. Evolución de la conductividad en el tiempo

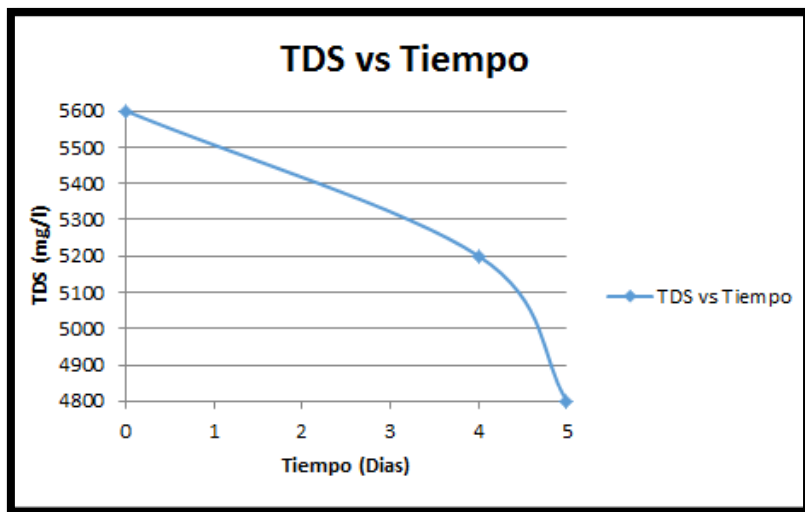
En la gráfica 9 podemos observar una disminución en la conductividad respecto al tiempo. En este comportamiento influyen dos procesos:

- Remoción de sólidos promovida por la planta
- Aumento de sólidos provenientes de la tierra.



Gráfica 10. Evolución de pH en el tiempo.

En la presente gráfica, se observa una tendencia del pH hacia valores neutrales. Este comportamiento ya había sido reportado en la literatura. Además, se puede evidenciar que el rango de valores desde el inicio cumple con la resolución 0631 del 2015 y la resolución 1207 del 2014, ya que el rango en ambas resoluciones está entre 6,0 y 9,0.



Gráfica 11. Evolución de TDS en el tiempo. Medición realizada con conductímetro

En la gráfica 11 se evidencia una evolución decreciente entre TDS y el tiempo, a medida que aumenta el tiempo disminuyen los TDS, la concentración total de sustancias disueltas en el agua

disminuye debido al efecto que hace el humedal frente a los metales presentes en el agua tratada. Esto se debe a la capacidad depuradora del humedal, sin embargo también influye un efecto de disolución de la tierra en el agua.

11. CONCLUSIONES

- La variación cambiante (no monótona) de la turbiedad, se debe a la interacción de dos procesos: los cambios en las condiciones climáticas, y la capacidad depuradora del humedal. Además en los momentos que hay aumento de turbiedad, esto se debe a la presencia de tierra en el humedal, que se disuelve en el agua.
- Se obtuvo un porcentaje de remoción de zinc de 70% y de cobre 94%, correspondiente a concentraciones iniciales de zinc y cobre de 4,0mg/l y 4,43 mg/l, y concentraciones finales de 1,17 mg/l y 0,28 mg/l respectivamente. De esta forma, contribuyen a cumplir los límites permisibles de la normativa (Zinc 3.0 mg/L y Cobre 1.0 mg/L).
- Con los resultados obtenidos se pudo evidenciar que los humedales artificiales contribuyen al cumplimiento con la normativa colombiana, como lo es la resolución 0631 de 2015 y la resolución 1274 de 2014, las cuales establecen los valores máximos permisibles de vertimientos de cuerpos de aguas y el reusó que se le puede dar a esta agua tratada.
- La remoción de Zn y Cu en su mayor parte se da en los primeros 3 días. La conductividad, en los primero 5 días alcanza la mayor parte de su disminución.
- No se observó afectación en las plantas por la presencia de metales. Esto se debe a que se realizó una precipitación química que redujo parcialmente la concentración. Por tanto los experimentos realizados dan una información útil para realizar un tratamiento a nivel real.

- Se cumplieron los dos específicos planteados al inicio del estudio, identificando las condiciones (planta y pH) adecuados para la depuración del agua residual de la industria metalmecánica considerada.
- A nivel real en un humedal para tratamiento de aguas residuales, se tiene plantas en un estado adulto, pero con el tiempo estas se reproducen paulatinamente. Por tanto, lo más coherente es que los ensayos se realicen con plantas adultas.
- Este trabajo aporta buenos resultados, ya que en la ciudad de Manizales se espera implementar un sistema colector de aguas residuales, lo cual se logra identificar que con la implementación de humedales artificiales de flujo libre superficial, la industria metalmecánica dará cumplimiento a lo establecido en la normativa.

12. ANEXOS

Tabla 8. Calculos			
<i>Ensayo 1</i>			
Oxígeno disuelto		Sólidos Disueltos	
Fecha	Mg de OD/L	Fecha	Mg/L
01/10/18	$\frac{3,1 \text{ ml} * 0,025\text{N} * 8000 * 300\text{ml}}{300\text{ml} * (300\text{ml} - 2)} = 2,080$	01/10/18	$\frac{(51450\text{mg} - 50770\text{mg}) * 1000}{50 \text{ ml}} = 13600$
05/10/18	$\frac{6,5 \text{ ml} * 0,025\text{N} * 8000 * 300\text{ml}}{300\text{ml} * (300\text{ml} - 2)} = 4,36$		
08/10/18	$\frac{8,3 \text{ ml} * 0,025\text{N} * 8000 * 300\text{ml}}{300\text{ml} * (300\text{ml} - 2)} = 5,57$	08/10/18	$\frac{(51150\text{mg} - 50510\text{mg}) * 1000}{50 \text{ ml}} = 12800$
<i>Ensayo 2</i>			
Oxígeno disuelto		Sólidos Disueltos	
Fecha	Mg de OD/L	Fecha	Mg/L
03/12/18	$\frac{2,6\text{ml} * 0,025\text{N} * 8000 * 300\text{ml}}{300\text{ml} * (300\text{ml} - 2)} = 1,74$	03/12/18	$\frac{(35780\text{mg} - 35500\text{mg}) * 1000}{50 \text{ ml}} = 5600$
05/12/18	$\frac{2,7 \text{ ml} * 0,025\text{N} * 8000 * 300\text{ml}}{300\text{ml} * (300\text{ml} - 2)} = 1,81$	05/12/18	$\frac{(35760\text{mg} - 35500\text{mg}) * 1000}{50 \text{ ml}} = 5200$
06/12/18	$\frac{3,2 \text{ ml} * 0,025\text{N} * 8000 * 300\text{ml}}{300\text{ml} * (300\text{ml} - 2)} = 2,14$	06/12/18	$\frac{(35740\text{mg} - 35500\text{mg}) * 1000}{50 \text{ ml}} = 4800$

13. BIBLIOGRAFÍA

Arias, C. A. (2016). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Revista Ciencia e ingeniería Neogranadina , 17-24. Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1321/1051>

Andrade, M. Camacho, A. Delgadillo O. F. Pérez, L. (2010) Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Bolivia.g.

APHA, AWWA y WPCF. Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. Madrid, España: Díaz de Santos, 1992. 1108 p.

Borrero, J. A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales.

Barcelona. Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de <https://www.ecohabitar.org/wp-content/uploads/2015/09/humedales-artificiales.pdf>

CASTILLO, R. (Mayo de 2005). Scielo. (Z. C. NIVELES DE PLOMO, Productor) Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v21n3/0188-4999-rica-21-03-115.pdf>

Calle, M, & Coello R. (2015). Uso de humedales artificiales superficiales para remoción de contaminantes industriales (Tesis de pregrado). ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL. GUAYAQUIL – ECUADOR

CAZORLA, L. L., OLIVARESRIEUMONT, S., COLUMBIE, I., ROSA MEDEROS, D., & GIL CASTILLO, R. (Mayo de 2005). Scielo. (Z. C. NIVELES DE PLOMO, Productor) Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v21n3/0188-4999-rica-21-03-115.pdf>

Díaz Acero , C. (04 de Julio de 2014). Universidad Santo Tomás. Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de <http://ustatunja.edu.co/cong-civil/images/Articulos/TRATAMIENTO%20DE%20AGUA%20RESIDUAL%20A%20TRAVES%20DE%20HUMEDALES.pdf>

Fergusson J.E (1992). The heavy elements: Chemistry, environmental impact and health effects, Pergamon Press, NuevaYork, 502 p.

GALLEGO, I. Y. (2010). UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. (M. S. FLUJO, Productor) Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1833/333918E82.pdf?sequence=1>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (25 de Julio de 2014). Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (18 de Abril de 2015). Obtenido de

https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

Moreno, A. F. (2013). UNIVERSIDAD LIBRE . (E. d. curtiembres., Productor) Recuperado el Agosto 13 de 2018, de

<http://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/9999/Evaluaci%C3%B3n%20de%20un%20Humedal%20artificial%20de%20flujo%20superficial%20empleando%20lenteja%20de%20agua%20%28Lemna%20minor%29%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

RODRÍGUEZ G, ZAFRA A. (2005) Diseño de una unidad piloto compacta para la remoción de metales pesados (Zn, Ni y Cu), presentes en agua residual de la industria Challenger S.A. empleando humedales subsuperficiales con tres especies de vegetación. Bogotá, Colombia, 2005. 174 p. Trabajo de grado (Ingeniera Ambiental y Sanitaria). Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.

ROMERO AGUILAR, M., COLÍN CRUZ, A., SÁNCHEZ SALINAS, E., & ORTIZ

HERNÁNDEZ, M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Scielo, 158-167.

RUBIO GOYES. , D., & PAEZ RUALES , J. (2009). Universidad de la salle. Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de

<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14942/T41.09%20R825e.pdf;jsessionid=56A92B17E66AD9E6B888EFAD01C9CD0B?sequence=1>

SAMANIEGO, Henar. Valorización de efluentes de decapado, ácido metálico: Recuperación de zinc.(tesis de doctorado valorización de efluentes: de decapado recuperación de zinc universidad de cantabria España).

Sanz, J. M. (s.f.). CONAMA. Recuperado el 13 de Agosto de 2018, de http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643_JMena.pdf

Solís Silván, R., López Ocaña, G., & Bautista Margulis, R. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de. Redalyc, 40-47.

Totuño O.. (s/f). Tratamiento de Aguas Residuales mediante Humedales Artificiales. Recurado de http://otoruno.files.wordpress.com/2012/05/hidro-edar_tratamiento-deaguas-residuales-mediante-humedales-artificiales.pdf

Universidad de la Plata. (2013). Recuperado de <http://www.ambiente.gob.ar/archivos/web/Pfreplata/file/Estudios%20e%20Investigaciones/DISENO%20HUMEDAL%20SAN%20CLEMENTE.pd>. Consulta realizada el 6 de

ZAPATA PALACIO, A. (2014). *UNIVERSIDAD DE MANIZALES*. Recuperado el Agosto de 13 de 2018, de http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/1930/Zapata_Palacio_ura_Raquel_2014.pdf?sequence=1