

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FITORREMEDIACIÓN DE UN
TRAMO DEL CAÑO LA CUERERA UTILIZANDO LAS PLANTAS
Eryngium foetidum L. (CILANTRÓN) y *Ricinus communis*
(HIGUERILLA).**

ERIKA VIVIANA ORTIZ JULA

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA
ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS PECUARIAS Y DEL MEDIO
AMBIENTE
INGENIERÍA AMBIENTAL
ACACÍAS
2016**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FITORREMEDIACIÓN DE UN
TRAMO DEL CAÑO LA CUERERA UTILIZANDO LAS PLANTAS
Eryngium foetidum L. (CILANTRÓN) y *Ricinus communis*
(HIGUERILLA).**

**ERIKA VIVIANA ORTIZ JULA
CC. 1023894927**

**Trabajo de línea investigativa de gestión y manejo ambiental como
requisito para optar el título en ingeniería ambiental.**

**ANGÉLICA GUZMÁN LENIS
DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA
ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS PECUARIAS Y DEL MEDIO
AMBIENTE
INGENIERÍA AMBIENTAL
ACACÍAS
2016**

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO

DIRECTOR DE GRADO

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a mi familia quienes
fueron un gran apoyo durante
el transcurso del proyecto.

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a DIOS por su grande amor para conmigo y por su respaldo, porque me permitió culminar este gran anhelo de mi corazón, por permitirme tener grandes personas a mi alrededor.

A mi familia por su apoyo y comprensión, a mis padres gracias por su ejemplo, paciencia y amor porque sin ustedes no sería quien soy ahora.

Hoy doy gracias a mi tutora de tesis Angélica Guzmán por su gran apoyo y consejos.

A mis amigos Paola Cajiao y Andrés Álvarez
y a mis compañeros de trabajo.

MIL GRACIAS

QUE DIOS LOS CONTINUE BENDICIENDO

RESUMEN

Se realizó el estudio para evaluar la eficiencia de fitorremediación ex situ de las aguas del caño la Cuerera utilizando las plantas *Eryngium foetidum* L. (Cilantrón) y *Ricinus communis* (Higuerilla). Se diseñaron y construyeron dos sistemas de cultivo hidropónico para la remoción de contaminantes, en las que se recirculó el agua muestreada del caño, haciendo seguimiento a los parámetros fisicoquímicos de Aluminio, Cadmio, Níquel, Cobre, Manganeso, Plomo, Hierro, Fosfatos, Nitrógeno amoniacal, pH, DBO, DQO, Turbiedad y Oxígeno disuelto. Las muestras de agua se recircularon durante cuatro meses y en el último mes se construyó el sistema para tener un control estadístico. A las raíces de las plantas se les midió el contenido de metales pesados, con el fin de verificar la bioacumulación de los mismos. Del caño la Cuerera se registraron parámetros por encima del límite superior de la norma: DBO, DQO, nitrógeno amoniacal, ortofosfatos y turbiedad. Dentro del estudio la DBO y la DQO no presentaron diferencias significativas a nivel estadístico debido a que los datos iniciales del agua cruda son muy diferentes con los datos del control, presentándose como resultados no concluyentes. A nivel estadístico se confirmó que a medida que pasan los meses la Higuerilla remueve el manganeso y la turbiedad; el Cilantrón remueve aluminio, hierro, manganeso y turbiedad; y el sistema de control remueve hierro y turbiedad. El plomo no fue afectado por los tratamientos. El oxígeno disuelto mejora con el paso del tiempo en cada cultivo hidropónico. Se demostró que las plantas utilizadas para el tratamiento son capaces de absorber metales pesados y materia orgánica, pero no acumulan los metales en las raíces. Según la investigación la planta más eficiente es el Cilantrón.

Palabras Claves: Fitorremediación, Agua, fisicoquímica, hidroponía, *Eryngium foetidum* L., *Ricinus communis*.

ABSTRACT

The investigation was directed to evaluate the ex situ phytoremediation efficiency of *Eryngium foetidum* L. (Cilantrón) and *Ricinus communis* (Higuerilla) plants on the Cuerera stream's waters. Two hydroponics systems for contaminant removal were designed and built. Aluminum, Cadmium, Nickel, Copper, Manganese, Lead, Iron, phosphates, ammonia nitrogen, pH, BOD, COD, turbidity and dissolved oxygen parameters were measured, and the samples of water were recirculated during four months, in the last month an experimental control was built. Macrophytes roots were analyzed to verify bioaccumulation of heavy metals. Most of the water quality parameters of Cuerera stream were above the upper limit of the norm. The results of statistical data showed significant differences and inconclusive results for both macrophytes. It was demonstrated both plants are capable of absorb heavy metals and organic matter. According the investigation the most efficient plant is the Cilantrón.

Keywords: Phytoremediation, Water, Physico - chemical, Hydroponics, *Eryngium foetidum* L., *Ricinus communis*,

CONTENIDO

1	INTRODUCCION	11
2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	12
2.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
2.2	JUSTIFICACIÓN	13
3	OBJETIVOS	15
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	15
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
4	MARCO DE REFERENCIA	16
4.1	MARCO GEOGRÁFICO	16
4.2	MARCO CONCEPTUAL	17
4.3	MARCO LEGAL	21
4.4	ANTECEDENTES	26
5	METODOLOGIA	27
5.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO.....	28
5.2	ETAPA DE CAMPO	28
5.2.1	Recolección de Macrófitas.....	28
5.2.2	Muestreo del Caño La Cuerera.....	29
5.3	ETAPA DE LABORATORIO.....	30
5.3.1	Análisis de muestras de las raíces	30
5.3.2	Análisis de la muestra del agua	31
5.3.3	Análisis estadístico	36
6	RESULTADOS	38
7	DISCUSION DE LOS RESULTADOS	45

8 CONCLUSIONES.....	49
9 RECOMENDACIONES	50
BIBLIOGRAFÍA.....	51
ANEXOS	56

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 CAÑO LA CUERERA	16
FIGURA 2 CONSTRUCCIÓN INVERNADERO.....	28
FIGURA 3 CULTIVOS EN INVERNADERO.....	28
FIGURA 4 SIEMBRA DE HIGUERILLA	29
FIGURA 5 RECOLECCIÓN HIGUERILLA.....	29
FIGURA 6 RECOLECCIÓN CILANTRÓN	29
FIGURA 7 VERTIMIENTO AL CAÑO	30
FIGURA 8 TOMA DE MUESTRA	30
FIGURA 9 CURVA CALIBRACIÓN DE HIERRO	32
FIGURA 10 CURVA CALIBRACIÓN DE ORTOFOSFATOS	36
FIGURA 11 RESULTADOS ALUMINIO	38
FIGURA 12 RESULTADOS MANGANESO	38
FIGURA 13 RESULTADO CADMIO	40
FIGURA 14 RESULTADO COBALTO	40
FIGURA 15 RESULTADO NÍQUEL.....	40
FIGURA 16 RESULTADOS PLOMO.....	40
FIGURA 17 RESULTADO DBO₅.....	41
FIGURA 18 RESULTADOS DQO	42
FIGURA 19 RESULTADOS HIERRO.....	43
FIGURA 20 RESULTADOS NITRÓGENO AMONIACAL	43
FIGURA 21 RESULTADOS OD	43
FIGURA 22 RESULTADOS ORTOFOSFATOS.....	43

FIGURA 23 RESULTADOS PH	44
FIGURA 24 RESULTADOS TURBIEDAD	45

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 CONSTRUCCIÓN DEL INVERNADERO	57
ANEXO 2 HIGUERILLA	58
ANEXO 3 RECOLECCIÓN DE LA HIGUERILLA.....	59
ANEXO 4 RECOLECCIÓN DEL CILANTRON	60
ANEXO 5 LAVADO DE RAÍCES	60
ANEXO 6 INVERNADERO	61
ANEXO 7 RESULTADOS.....	63
ANEXO 8 RESULTADOS ANOVA PRIMER MES.....	65
ANEXO 9 DATOS UTILIZADOS PARA EL ANOVA PRIMER MES.	66
ANEXO 10 DATOS UTILIZADOS PARA EL ANOVA DEL PASO DEL TIEMPO.....	66
ANEXO 11 RESULTADOS ANOVA PASO DEL TIEMPO	66
ANEXO 12 DATOS UTILIZADOS PARA EL ANOVA DEL PASO DEL TIEMPO RAÍZ..	67
ANEXO 13 RESULTADOS ANOVA PASO DEL TIEMPO RAÍZ	67

1 INTRODUCCION

Colombia es un país rico en fauna, flora y fuentes hídricas, pero hoy en día quedan pocas fuentes de agua libres de contaminantes, este trabajo de investigación quiere ayudar a descontaminar la parte del caño la Cuerera entre la carrera 1 cerca al CAI de Catama hasta barrio San Carlos de la ciudad de Villavicencio (Meta), basado en una técnica que no utilizará reactivos.

Hoy en día en el departamento del Meta solo se cuenta con sistemas de tratamiento de agua residual basados en procesos fisicoquímicos, estos tratamientos son de alto costo y pueden dejar residuos no deseados en el agua. Es por eso que esta investigación propone utilizar un método diferente que se ha implementado en otros países: la fitorremediación, la cual es una alternativa que ayuda a remover contaminantes en las aguas, de bajo costo, y que promueve el uso de una variedad de plantas nativas y/o comunes que han sido utilizadas para descontaminar fuentes hídricas.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los temas más importantes de los últimos tiempos es el cuidado del medio ambiente. La contaminación del agua, suelo y aire genera grandes consecuencias en la salud de los seres vivos. En el agua se puede encontrar altos niveles de eutrofización, con la consecuente disminución de oxígeno disuelto, produciendo la muerte de animales acuáticos y alterando el ecosistema en su estructura, composición y función, afectando de igual forma a la fauna y flora que está alrededor de la fuente hídrica.

La contaminación del agua es uno de los problemas sociales y ambientales del municipio de Villavicencio, el cual, aunque tiene una gran riqueza hídrica, observa cómo sus ríos, caños y humedales están siendo contaminados debido a los vertimientos residuales y domésticos.

La microcuenca del caño la Cuerera se encuentra ubicada en el municipio de Villavicencio – Meta, en las partes centro y oriente de la capital llanera, recibiendo vertimientos que elevan la contaminación en esta fuente hídrica, no se tiene acceso a la información de los cuatro vertimientos. Este caño nace en el barrio Teusacá se une con el Caño Aguas Claras y desemboca en el río Guatiquía, la población tiene acceso a este caño y con la contaminación que lleva puede generar riesgos en la salud de las personas, proliferación de vectores y muerte de animales.

Según el Decreto 1076 de 2015 “Único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible”, el agua debe cumplir con unas características específicas para ser de uso recreativo, las cuales no se están cumpliendo actualmente en este cuerpo de agua, por lo cual urge realizar acciones de remediación y prevención de la contaminación.

Para la descontaminación de fuentes hídricas a través de tratamientos físicoquímicos convencionales se necesitan grandes sumas de dinero, y a su vez, se suele trabajar con reactivos que pueden quedar en el agua y pueden generar efectos adversos no deseados.

A partir de este problema, se plantea la siguiente pregunta de investigación, ¿Cuál es la eficiencia de fitorremediación ex situ del caño la Cuerera, utilizando las plantas *Eryngium foetidum* L. (Cilantrón) y *Ricinus communis* (Higuerilla)?

2.2 JUSTIFICACIÓN

La fitorremediación es una técnica que utiliza plantas para descontaminar suelo, agua y aire. Por su bajo costo este tratamiento se puede hacer in situ o ex situ, ayuda a aumentar el oxígeno disuelto y disminuir la eutrofización de las fuentes hídricas.

Para disminuir la contaminación de las aguas del Caño la Cuerera se plantea realizar el tratamiento de las mismas a través de fitorremediación, la cual es una buena opción de depuración de residuos contaminantes por su bajo costo, fácil acceso al trabajar con macrófitas, y que puede llegar a restablecer un equilibrio en el ecosistema.

Para el desarrollo de esta investigación se eligieron dos plantas a

ensayar, la Higuera y el Cilantro, las cuales se escogieron porque son abundantes en la región llanera y son fáciles de sembrar. La higuera normalmente se encuentra a las orillas de los ríos, es utilizada para usos medicinales, elaboración de aceites y en algunos países, para la descontaminación de suelos y aguas; el Cilantro es muy utilizado en la industria gastronómica para condimentar y tiene diversos usos medicinales.

Este proyecto es necesario porque las pocas fuentes de agua dulce que quedan en el país se están contaminando y debemos pensar en un desarrollo sostenible. Se debe tomar una conciencia ambiental para poder mantener limpia el agua, nuestra fuente de vida.

El agua es un elemento que se encuentra en gran abundancia en el planeta, pero tan solo el 2,53% es dulce (UNESCO, 2003). Según la Organización Mundial de la salud (OMS) “el agua es esencial para la vida” tanto del hombre como de la fauna y flora; la humanidad necesita del agua para su consumo, uso doméstico y recreativo. Según Paredes (2013) “la contaminación del agua y su escasez plantean amenazas para la salud humana y la calidad de vida, pero su incidencia ecológica es más general”.

Con el aporte de este trabajo de investigación en fitorremediación se dejará una puerta abierta para que las autoridades ambientales, entidades privadas y la sociedad civil tengan un método que ayude a disminuir un gran porcentaje de la contaminación hídrica.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de fitorremediación ex situ de un tramo del caño la Cuerera utilizando las plantas *Eryngium foetidum* L. (Cilantrón) y *Ricinus communis* (Higuerilla).

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las características fisicoquímicas del tramo de la carrera 1 cerca al CAI de Catama del Caño la Cuerera.
- Comparar la eficiencia de fitorremediación del Cilantrón y de la Higuerilla.
- Diseñar y construir el sistema del cultivo hidropónico para la fitorremediación ex situ de la fuente hídrica.
- Evaluar la eficiencia de absorción de metales de las raíces de las plantas por medio de la comparación.

4 MARCO DE REFERENCIA

4.1 MARCO GEOGRÁFICO

La microcuenca del caño la Cuerera se encuentra ubicada en el municipio de Villavicencio – Meta, en las partes centro y oriente de la capital llanera, nace en el barrio Teusacá, recorre los barrios de las comunas 5 y 6 (Bolívar, 2014), se une con el Caño Aguas Claras y desemboca en el río Guatiquía.



Figura 1 Caño la Cuerera
Imagen tomada de Google Earth

Según la información disponible de los vertimientos que contaminan el caño, se encuentra el informe de gestión de la Empresa acueducto y alcantarillado de Villavicencio E.S.P. (2015), en donde se mencionan ocho vertimientos identificados, de los cuales cuatro fueron eliminados con la tubería del alcantarillado sanitario, y los otros cuatro se mantienen, aunque no se especifica qué tipo de vertimientos se realizan.

Escobar Martinez (2011) realizó una valoración económica de los servicios ecosistémicos y realizó un muestreo en el caño la Cuerera arrojando altas concentraciones de conductividad, DBO, DQO, fósforo total, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, solidos disueltos, tensoactivos y turbidez, según los índices de calidad arrojados por este proyecto el caño cuenta con baja contaminación.

A principios del presente año el caño recibió un vertimiento de 450 galones de líquido excedente del petróleo, generados durante el lavado de un carrotanque (Llano Sie7e Días, 2016).

Con la información disponible y las observaciones hechas en campo, se establece que los principales vertimientos al caño son de aguas residuales domésticas y vertimientos puntuales no controlados.

4.2 MARCO CONCEPTUAL

La fitorremediación es un proceso en donde las plantas son utilizadas para degradar y/o remover contaminantes del agua, suelo o aire.

Según Nuñez Lopez, Means Vong, Ortega Borgue, & Olgúin (2004) Los primeros sistemas de tratamiento de aguas residuales a base de plantas se implementaron en los países europeos a principios de 1960, utilizando juncos o carrizos. La fitorremediación tiene unas ventajas como son: No produce contaminantes secundarios, es de bajo costo, es una tecnología sustentable y es poco perjudicial para la salud. La fitorremediación puede reducir de gran manera los contaminantes porque pueden llegar a absorber los metales por sus raíces (Agudelo Betancur, Macias Mazo, & Suarez Mendoza, 2005)

Como desventajas de la fitorremediación se tiene que no todas las plantas son acumuladoras y es un proceso lento.

Entre los métodos de fitorremediación se mencionan los siguientes:

- Fitoestabilización: Reduce la concentración de los contaminantes, es un método donde se utilizan plantas tolerantes a metales.
- Fitodegradación: Proceso donde las plantas descomponen los contaminantes orgánicos.
- Rizofiltración: Proceso donde la planta por medio del cultivo hidropónico crece y por medio de sus raíces absorbe los metales pesados.
- Fitoestimulación: Proceso donde son usados los microorganismos que degradan contaminantes.

Como criterios para selección de las plantas se encuentran el ser especies locales, ser tolerantes a altas concentraciones de metales y ser fáciles de sembrar (Nuñez Lopez, Means Vong, Ortega Borgue, & Olguín, 2004).

Siguiendo estos criterios, se seleccionaron dos especies de plantas, la Higuerilla y el Cilantrón, las cuales se describen a continuación.

La Higuerilla (*Ricinus communis*) es una planta perteneciente a la Familia Euphorbiaceae, género *Ricinus* y especie *communis*. Se encuentra a las orillas de los ríos o al borde de los caminos y es utilizada en la industria para la fabricación de aceites, fertilizantes, entre otros usos.

En el país de México se ha realizado un estudio donde se encuentra que la “higuerilla es capaz de extraer metales pesados y es una planta ideal para proceso de fitorremediación” (UNAM estudia plantas que extraen metales pesados del suelo, 2003).

El Cilantrón (*Eryngium foetidum*) es una planta tropical ramificada de la familia Apiaceae y se reproduce por semillas. Es utilizada en gran parte del mundo por su uso medicinal y gastronómico.

En el país de México estudiantes realizaron una investigación donde purifican agua con cilantro, “en el estudio han encontrado que el cilantro tiene una estructura celular capaz de atrapar ciertos metales” (Rogers, 2013).

Aunque no hay estudios relacionados con el cilantrón, se eligió porque tiene las características anteriormente nombradas: fácil de sembrar, es una especie local y porque tiene características parecidas al cilantro.

Para el desarrollo de la investigación se utilizó la hidroponía como técnica para el tratamiento del agua y mantenimiento de las plantas. La hidroponía es cultivar las plantas sin utilizar suelo, se utilizan sustratos para ayudar a sostener las plantas como la cáscara de arroz, arcilla o arena de río. Se utilizó esta técnica para tener acceso diariamente al cultivo y así identificar los cambios que pudiera haber.

Con el fin de definir la eficiencia de cada planta para remover los contaminantes en el caño la Cuerera, se definió medir una serie de parámetros útiles para estimar el nivel de contaminación en fuentes

hídricas como Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Turbiedad, Oxígeno Disuelto (OD), Fosfatos, Nitrógeno amoniacal, pH, Aluminio (Al), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni), y Plomo (Pb). Estos parámetros se tuvieron en cuenta por ser los más utilizados en estudios de fitorremediación para poder obtener una comparación en el análisis de resultados. Como no se tienen estudios de cilantro se decidió empezar con estos pocos parámetros. Metales como el Cromo total y el Mercurio no se tuvieron en cuenta puesto que en la ciudad no hay procesos de curtido y en el sitio no se observan hornos de cemento.

Las demandas de oxígeno (DBO y DQO) son muy utilizadas para determinar contaminación en fuentes hídricas, la DBO es la cantidad de oxígeno consumido por los organismos en el agua para la degradación de la materia orgánica y está relacionada con la DQO, la cual es el consumo de oxígeno para degradar químicamente la materia orgánica. Estas demandas tienen una relación directa con el OD, cuando hay contaminación los niveles de DBO y DQO son altos, por lo tanto los valores de OD serán bajos y la vida acuática se verá afectada, según Roldán (2003) el OD es uno de los indicadores más importantes de la calidad del agua.

El pH indica la concentración de ion de hidrogeno, su rango va de 0 a 14 siendo 7 un valor neutro, menor de 7 es acida y mayores de 7 son alcalinos. Los cambios de pH afectan los ecosistemas acuáticos (Roldán, 2003).

Como nutrientes en el agua podemos encontrar el nitrógeno y los fosfatos, los vertimientos son las fuentes de contaminación que ayudan a aumentar estos nutrientes en el agua desencadenando la eutrofización (Roldán,

2003). Según Villaseñor (1998) el nitrógeno amoniacal está presente en aguas residuales, es tóxico y provoca un alto consumo de oxígeno, alterando el ecosistema acuático (Cresspi, 2011)

Los metales pesados y ligeros son encontrados en la naturaleza, y son utilizados ampliamente en la industria. Los metales pesados tienen una densidad superior a 3 g cm^{-3} , mientras que los ligeros tienen densidades bajas, como contaminantes del agua, provienen de vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales. Las concentraciones elevadas de los metales pueden interferir en los procesos de depuración, su vertido al medio acuático podría poner en peligro el aprovechamiento de las aguas naturales dada su alta toxicidad (Sans Fonfría & Ribas, 1989). Según Camelo (2011) existen metales esenciales (Manganeso, Magnesio, Zinc, Cobre) y no esenciales (Cadmio, Plomo) pero en altas concentraciones pueden ser tóxicos. Según la inspección realizada alrededor del caño la Cuerera es de uso doméstica y a esta misma fuente llegan vertimientos aguas no residuales de prestadores de servicio público de alcantarillado.

El Plomo puede afectar el sistema nervioso, el Cadmio y el Plomo causan daño en el riñón (Erostequi Revilla, 2009), según Camelo (2011) estos metales también pueden afectar el sistema reproductivo, el Manganeso causa efectos en el sistema nervioso, reproductivo y respiratorio.

4.3 MARCO LEGAL

DECRETO 2811 DE 1974

Código nacional de los recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente.

Artículo 2. Fundado en el principio de que el ambiente es patrimonio común de la humanidad y necesario para la supervivencia y el desarrollo económico y social de los pueblos, este Código tiene por objeto:

1.- Lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, según criterios de equidad que aseguran el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de éstos, y la máxima participación social para beneficio de la salud y el bienestar de los presentes y futuros habitantes del territorio Nacional.

2.- Prevenir y controlar los efectos nocivos de la explotación de los recursos naturales no renovables sobre los demás recursos.

3.- Regular la conducta humana, individual o colectiva y la actividad de la Administración Pública, respecto del ambiente y de los recursos naturales renovables y las relaciones que surgen del aprovechamiento y conservación de tales recursos y del ambiente.

➤ **Constitución Política de Colombia de 1991**

Dentro de los principios fundamentales: de los derechos sociales, económicos, culturales, colectivos y del ambiente, se habla:

- **Artículo 79** Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo.

Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

-**Artículo 84** Cuando un derecho o una actividad hayan sido reglamentados de manera general, las autoridades públicas no podrán establecer ni exigir permisos, licencias o requisitos adicionales para su ejercicio.

➤ **Ley 99 de 1993**

Por el cual se crea el Ministerio del 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.

Artículo 1. Principios generales ambientales:

Artículo 1.2 la biodiversidad del país, por ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad, deberá ser protegida prioritariamente y aprovechada en forma sostenible.

Artículo 3. Del concepto de Desarrollo Sostenible: se entiende por desarrollo sostenible el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras para la satisfacción de sus propias necesidades.

➤ **Decreto 3930 de 2010**

Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 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 especificaciones.

Artículo 9. Usos del agua.

Para los efectos del presente decreto se tendrán en cuenta los siguientes usos del agua:

1. Consumo humano y doméstico.
2. Preservación de flora y fauna.
3. Agrícola.
4. Pecuario.
5. Recreativo.

6. Industrial.
7. Estético.
8. Pesca, Maricultura y Acuicultura.
9. Navegación y Transporte Acuático.

Artículo 11. Uso para la preservación de flora y fauna: Se entiende por uso del agua para preservación de flora y fauna, su utilización en actividades destinadas a mantener la vida natural de los ecosistemas acuáticos y terrestres y de sus ecosistemas asociados, sin causar alteraciones sensibles en ellos.

Artículo 15. Uso recreativo. Se entiende por uso del agua para fines recreativos, su utilización, cuando se produce: 1. Contacto primario, como en la natación, buceo y baños medicinales. 2. Contacto secundario, como en los deportes náuticos y la pesca.

➤ **DECRETO 1076 DE 2015**

Decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible.

Artículo 2.2.3.3.9.7. Criterios de calidad para fines recreativos mediante contacto primario

pH: 5 - 9 unidades

OD: 70% concentración de saturación.

PARAGRAFO 2. El nitrógeno y el fósforo deberán estar en proporción que no ocasionen eutroficación.

(Decreto 1594 de 1984, artículo 42)

Artículo 2.2.3.3.9.8. Criterios de calidad para fines recreativos mediante contacto secundaria.

pH: 5 - 9 unidades

OD: 70% concentración de saturación.

Artículo 2.2.3.3.9.10. Criterios de calidad para preservación de flora y fauna.

pH: 4,5 – 9 unidades

OD: 4,0

Hierro: 0,1

Cadmio: 0,1

Manganeso: 0,1

Níquel: 0,01

Plomo: 0,01

(Decreto 1594 de 1984, artículo 45)

➤ **RESOLUCION 631 DE 2015**

Se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Artículo 8. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas - ARD de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales.

Con una carga menor o igual a 625 kg/día DBO5

pH 6 a 9 Unidades

DQO 180 mg/L O₂

DBO 90 mg/L O₂

4.4 ANTECEDENTES

La fitorremediación ha sido un método muy utilizado en gran parte del mundo por no generar efectos secundarios, pero muchos de los estudios que se han realizado han usado plantas como la *Eichhornia crassipes* o lenteja de agua. Como ejemplo de investigaciones se encuentra una en Venezuela con Arenas, Marcó y Torres (2011) “Evaluación de la planta *Lemna minor* como Biorremediadora de aguas contaminadas con mercurio” y una en Argentina con Bress, Crespo y La Rossa (2012) “Capacidades de las macrófitas *Lemna minor* y *Eichhornia Crassipes* para eliminar níquel”. Han sido pocos los investigadores que han querido demostrar que existen otras plantas que pueden ayudar a descontaminar. México es uno de los países donde se ha realizado varios estudios por este método. Aunque aún no se conocen los resultados de algunas investigaciones, se ha reportado en una página ambiental mexicana Veo Verde (2013) cómo el Cilantro ha purificado aguas e incluso ha eliminado metales como el níquel.

En el departamento de Bolívar-Colombia Grosso, Sánchez, Avendaño y Restrepo (2000) realizaron un estudio de retención de cloruros, bario y cromo en dos especies de mangle *Avicennia germinans* y *Rhizophora mangle* desarrolladas en aguas de producción de la industria petrolera mediante la técnica de cultivo hidropónico, el tratamiento se realizó durante 308 días, por medio del estudio se puede demostrar que las dos plantas acumulan cloruro, bario y cromo, siendo la *A. germinans* la planta más efectiva.

En la ciudad de México D.F. Torres (2009) realizó un estudio de fitorremediación de aguas residuales por hidroponía, con el objetivo de comparar la capacidad de absorción de metales pesados de las plantas Menta Piperita y Girasol. La recirculación del agua se realizó por seis semanas donde las plantas fueron analizadas por medio del procedimiento

de absorción atómica. Ambas plantas acumularon nitritos y fosfatos comprobando que pueden ser usadas para remoción de contaminantes orgánicos.

En la ciudad de Mexico D.F. Manzano (2010) realizó un estudio de reducción del tiempo de absorción de nitrógeno y fósforo presentes en el agua residual mediante un pretratamiento, empleando un sistema hidropónico. El agua que recirculaba pasaba por las raíces de la planta *Ricinus communis* (Higuerilla), las muestras se tomaron cada 12 horas durante las primeras 72 horas, en el estudio se realizaron dos corridas y solo en la segunda corrida el nitrógeno disminuyó un 77% y el fósforo un 68%.

5 METODOLOGIA

Se diseñaron y construyeron dos sistemas de cultivo hidropónico, uno con Higuerilla y el otro con Cilantrón, con el fin de realizar la comparación de la eficiencia de remoción de contaminantes de cada especie a nivel ex situ. La muestra de agua tomada del caño La Cuerera se hizo recircular por cada sistema durante cuatro meses. Se realizó por un mes una tercera recirculación de agua contaminada, sin plantas, con el fin de tener un control. Se tomó muestras del agua en recirculación y de las raíces de las dos plantas para medición de parámetros, en cinco ocasiones dentro del estudio, uno antes de empezar el cultivo hidropónico, el segundo análisis a los 30 días del tratamiento, el tercero al día 60, el cuarto a los 90 días y el último análisis a los 120 días.

5.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CULTIVO HIDROPÓNICO

Para el diseño y construcción del sistema de cultivo hidropónico se tomó como base lo trabajado por Manzano (2010), adaptando el diseño al sitio de trabajo.

Se contó con 14 plantas de Higuierilla y de Cilantrón. Se utilizó tubo PVC de 3¹/₂ pulgadas, se colocó un tubo para cada planta con 1,5 metros de largo, donde las macrófitas fueron separadas cada 12 cm.

INVERNADERO



Figura 2 Construcción Invernadero



Figura 3 Cultivos en invernadero

Para el funcionamiento de cada sistema de cultivo hidropónico se colocó una bomba de recirculación de agua para cada cultivo para que el agua pudiera pasar por todas las raíces y se pudiera cumplir el proceso de fitorremediación, según Manzano (2010) el caudal que se puede utilizar en el sistema de cultivo es de 10 L/min.

5.2 ETAPA DE CAMPO

5.2.1 Recolección de Macrófitas

Las macrófitas utilizadas en la investigación se tomaron de cultivos de tierra. Se cumplió con el procedimiento establecido por Torres (2009), las

plantas se recogieron a los cinco meses después de sembradas, se lavaron las raíces con abundante agua desionizada para limpiarlas y quitar toda materia orgánica, y se llevaron al cultivo hidropónico.

HIGUERRILLA



Figura 4 Siembra de Higuerrilla



Figura 5 Recolección Higuerrilla

CILANTRON



Figura 6 Recolección Cilantrón

5.2.2 Muestreo del Caño La Cuerera

En el sitio de estudio se realizó un muestreo simple para la recolecta del agua, la muestra se tomó en el puente del anillo vial (carrera 1) cerca al CAI Catama (coordenadas N: 4°8'27,1'' W: 73°36'7,9''). Este punto se eligió por factores de contaminación antrópica, accesibilidad al punto de

muestreo y ubicación, ya que queda antes de que llegue a barrios de estratos bajos.

La muestra se recolectó en dos galones para llevar al cultivo hidropónico y en un envase de plástico de dos litros para ser analizada en el laboratorio.

Caño La Cuerera (N: 4°8'27,1'' W: 73°36'7,9'')



Figura 7 Vertimiento al Caño



Figura 8 Toma de muestra

5.3 ETAPA DE LABORATORIO

5.3.1 Análisis de muestras de las raíces

Después del lavado de las plantas con agua desionizada, se pesó en una balanza (marca Sartorius AX224) 0,20 gramos de cada raíz (Calderon, 2009), para su posterior proceso de digestión siguiendo la metodología analítica SM 3030 F- SM 3111 B del Standard Methods.

5.3.2 Análisis de la muestra del agua

En el laboratorio se analizó la muestra de agua del Caño la Cuerera, donde se midieron los siguientes parámetros: Aluminio, Cadmio, Cobre, Níquel, Manganeseo, Plomo, Hierro, DBO, DQO, Nitrógeno amoniacal, pH, Turbiedad, Fosfatos y Oxígeno disuelto.

- Metodología analítica SM 3030 F- SM 3111 B Procedimiento estándar para metales: Al, Cd, Co, Ni, Cu, Mn, Pb, Zn.

Medir 250 mL de la muestra agitada vigorosamente y trasvasar a un Erlenmeyer, agregar 5 mL de ácido clorhídrico concentrado y 2 mL de ácido nítrico concentrado. Llevar a la plancha de calentamiento y ebulir suavemente, digerir hasta un volumen de 3-5 mL.

El digerido debe ser de apariencia transparente o amarillo transparente, si no es así, adicionar una vez más 1 mL de ácido nítrico concentrado y continuar la digestión hasta aclarar la muestra o no se vea cambio en su apariencia. Dejar enfriar. Si es necesario filtrar el digerido y aforar a 50 mL con agua destilada des ionizada y leer.

- Método de referencia 1-10 Fenantrolina **SM 3500 Fe B**

Medir 50 mL de la muestra agitada agregar 2 mL de HCl concentrado y 1 mL de Hidroxilamina a cada Erlenmeyer, colocarlos sobre la estufa y llevar a cabo la digestión hasta reducir el volumen de 15 a 20 mL aproximadamente. Dejar enfriar, adicionar a cada muestra 10 mL de acetato de amonio y 4 mL de fenantrolina, agitar y transferir el contenido a tubos nessler de 50 mL, después de 15 minutos cuando ya se halla desarrollado el color máximo leer en el espectrofotómetro a 510 nm.

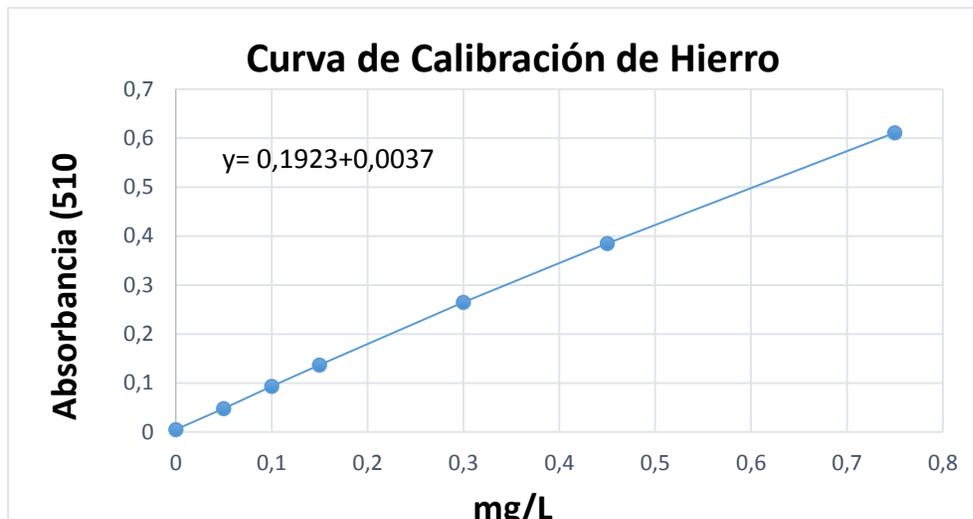


Figura 9 Curva calibración de Hierro

- Método de referencia de DBO por incubación según estándar métodos (2013). **SM 5210 B SM 4500 O G**

Se prepara agua de dilución para esta prueba y se prepara con un mililitro de reactivo por cada litro de agua. Los reactivos son: Solución Buffer de Fosfatos, Sulfato de Magnesio, Cloruro de Calcio y Cloruro Férrico.

Ajustar el pH de las muestras a un rango entre 6,5 a 7,5 unidades. La determinación del volumen de muestra se realiza organolépticamente, los volúmenes a sembrar para este tipo de aguas son 100, 40,15, 6b mL en cada botella winkler de 300mL.

Medir el oxígeno de cada botella y llenarlas con agua de dilución, tapanlas sin dejar ninguna burbuja. Llevar a incubadora por 5 días para su posterior lectura.

- Método de referencia para DQO por reflujo cerrado según estándar métodos (2013). **SM 5220 C**

Lave los tubos de digestión con H₂SO₄ 6N antes de utilizarlos para evitar la contaminación.

Los volúmenes de las muestras y reactivos deben ser medidos con la mayor exactitud posible, debido a que afectan directamente la exactitud de la prueba.

Elegir las muestras para los diferentes rangos:

Rango bajo entre 10 -150 mg/L, rango medio entre 100- 1500 mg/L y rango alto entre 500 – 10000 mg/L.

La homogenización de la muestra se realiza cuidadosamente con vortex. Colocar las muestras preparadas en el termo reactor a 150 ±2°C. Saque los tubos del termo reactor luego de la digestión y deje enfriar por lo menos 30 minutos.

Adicione 2 o 3 gotas de solución indicadora de ferroína homogenice, pase el contenido del tubo a un recipiente más grande para comenzar la titulación, enjuagar con agua destilada el tubo de digestión y titular con FAS (para rango bajo FAS 0,01M y para los rangos medio y alto FAS 0,1 M).

El punto final es un cambio de color azul verdoso a un marrón rojizo.

Calculo:

$$D. Q. O \text{ en } mg \frac{O_2}{L} = \frac{(A - B) * M * 8000}{mL \text{ de muestra}}$$

Donde:

A: mL de FAS utilizados para el blanco

B: mL de FAS utilizados para la muestra

M: Molaridad del FAS

- Método de referencia para nitrógeno amoniacal por destilación volumétrico según estándar métodos (2013). **SM4500 NH3 B C**

Medir 200 mL de muestra adicionar 8 mL de tampón de borato y ajustar el pH a 9,5 con NaOH 6N, usando pHmetro.

Destilar la muestra en destilador Buchi, recoger 100 mL del destilado en un recipiente que contiene 25 mL de solución indicadora de ácido bórico. Titular el amoniaco obtenido en la destilación con H₂SO₄ 0,02N hasta que el indicador vire a morado.

$$mg N - \frac{NH_3}{L} = \frac{(A - B) * N H_2SO_4 * 14000}{mL de muestra}$$

A: Volumen de acido sulfurico titulado para la muestra en mL

B: Volumen de acido sulfurico titulado para el blanco en mL

- Método de referencia para pH por potenciómetro según estándar métodos (2013). **SM 4500 H⁺ B**

Establecer el equilibrio entre la muestra y el electrodo, agitar suavemente y esperar que el equipo se estabilice. La lectura es directa.

- Método de referencia para turbiedad por método nefelométrico según estándar métodos (2013). **SM 2130 B**

Agitar bien la muestra, llenar el tubo hasta el aforo y esperar que el equipo de la lectura. Lectura directa.

➤ Método de referencia para ortofosfatos según estándar métodos **SM 4500 P D**

Antes del análisis realice el enjuague del material de vidrio con ácido clorhídrico 1:1 y seguidamente con porciones de agua destilada.

Tomar 100 mL de muestra en una probeta y transfiera a un Erlenmeyer, si la muestra presenta exceso de color y turbiedad filtrarla a través de un filtro de membrana de 0,45 µm prelavado con agua destilada.

Agregar una gota de fenolftaleína, si la muestra se toma rosada agregar gotas de H₂SO₄ 1:1 hasta que desaparezca el color si gasta más de 5 gotas debe tomar alícuota de muestra y diluir a 100 mL, haciendo el mismo procedimiento. Mantener las muestras, estándares y reactivos a una temperatura que no varíe más de 2°C entre ellas y dentro de un rango de temperatura entre 20-30°C.

Adicione 4 mL de solución de molibdato de amonio agite e inmediatamente adicione 0,5 mL de solución de Cloruro Estañoso. Agite vigorosamente hasta homogenizar, deje reaccionar para que desarrolle el color al máximo y leer dentro del periodo comprendido entre 10 y 12 minutos después de la adición del reactivo de desarrollo de color en el espectrofotómetro. Leer a una longitud de onda de 690nm, calibrar a 0 de absorbancia con agua destilada.

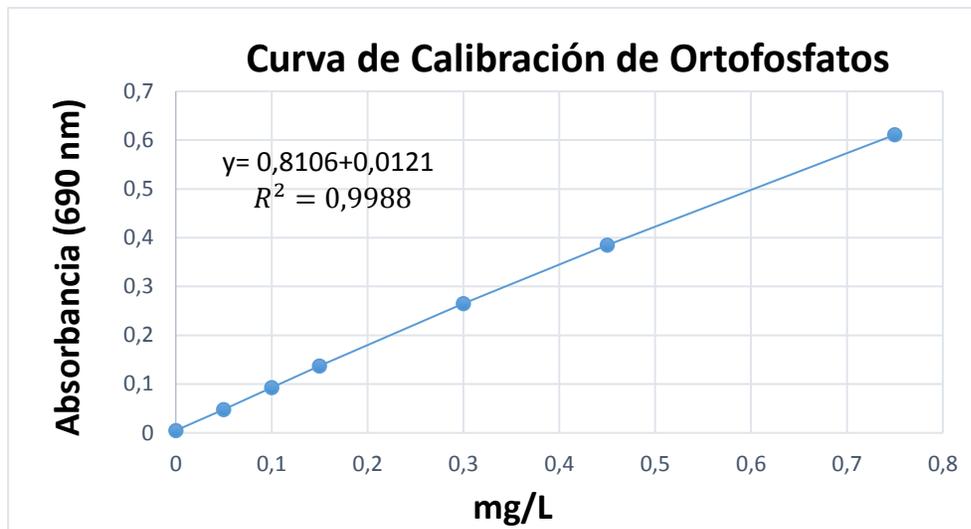


Figura 10 Curva calibración de Ortofosfatos

5.3.3 Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de la varianza ANOVA (del término inglés “Analysis of variance”) de un factor y un alfa (α) de 0,05 con ayuda del programa Microsoft Office Excel 2013.

Se utiliza el nombre de “análisis de la varianza” para el tipo de análisis estadístico en donde se estudia la variabilidad de una variable, la cual se puede presentar por dos casos: 1) el error experimental y 2) el determinado por la diferencia dada por las diferencias propias de los tratamientos analizados. El objetivo principal del análisis estadístico es determinar si la variabilidad dentro de una población de datos se da por el error experimental (H_0 , hipótesis nula) o porque existen dos o más poblaciones diferentes (H_a , hipótesis alterna).

Un modelo unifactorial ANOVA en el que la variable depende de un solo factor (tratamiento), permite tener resultados de comparación de varios grupos de datos de tipo cuantitativo donde se tiene en cuenta la media, su varianza y los posibles subgrupos de medias. Este análisis tiene en cuenta los tamaños de cada muestra, ya que no tienen que ser iguales.

Para aceptar la hipótesis alterna se tiene en cuenta el estadístico de la distribución F de Fisher (valores críticos para la distribución). En este análisis se tiene en cuenta si $F_{exp} > F_{teo}$, es decir, si el estadístico F calculado para el experimento da un valor mayor que el F teórico, existe una diferencia significativa, aceptando la hipótesis alterna (H_a), pero si es menor no hay diferencia, todos los tratamientos son iguales, aceptando la hipótesis nula (H_0).

Si existe una diferencia significativa en una variable medida (en este caso los parámetros de calidad del agua), se puede dividir por subgrupos la media para hallar más resultados de la muestra de trabajo.

En la presente investigación se establecieron cuatro tratamientos: 1. Agua cruda. 2. Agua recirculada, sin plantas (control estadístico). 3. Agua recirculada, tratada por Higuierilla. 4. Agua recirculada, tratada por Cilantrón. Debido a que el control estadístico sólo se realizó por un mes, los datos utilizados para el agua tratada por las plantas también se tomaron del primer mes de tratamiento para el análisis ANOVA.

Si el resultado estadístico arroja diferencia significativa se procede a realizar un análisis para el control y el agua sin tratar, con el fin de determinar si el control tiene influencia en la remoción del contaminante, posterior a esto se realiza un análisis ANOVA para cada macrófita para establecer cuál de las dos tuvo diferencia significativa, eliminando así el efecto del control (recirculación) sobre la remoción del contaminante.

Después de encontrar si la planta removía cierto parámetro, con diferencias significativas estadísticamente, se realizó un análisis de

tiempo para determinar si a medida que pasaban los meses se removía más el contaminante.

6 RESULTADOS

La muestra tomada del caño la Cuerera presenta unos resultados altos de contaminación en los parámetros: DBO, DQO, nitrógeno amoniacal, ortofosfatos y turbiedad (ver Anexo 7).

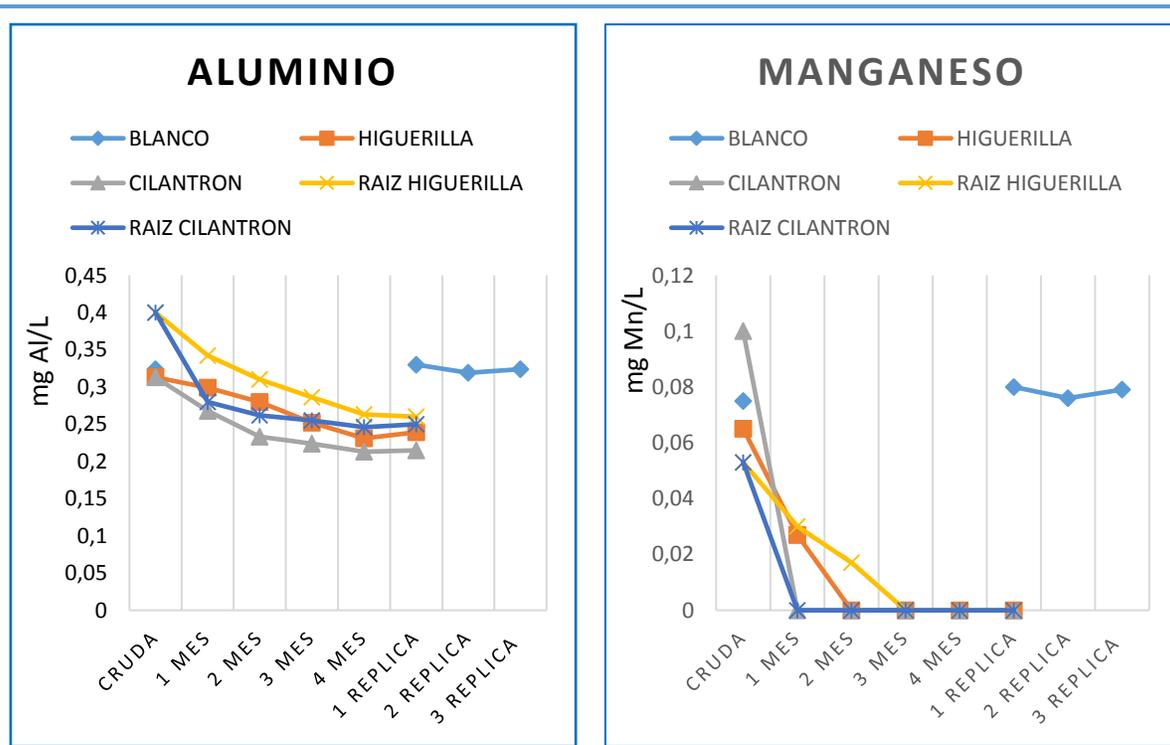


Figura 11 Resultados Aluminio

Figura 12 Resultados Manganese

Teniendo en cuenta los cambios presentados durante los cuatro meses para los parámetros aluminio y manganeso, se puede evidenciar que la Higuierilla y el Cilantrón removieron gran parte de estos metales en la muestra.

De igual forma, el Aluminio presentó disminución progresiva en las raíces de la higuera y del cilantro durante el transcurso de los meses (Figura 11). Realizando el ANOVA $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{teo} 9,28 F_{exp} 21,78)$ se obtiene una diferencia significativa entre los tratamientos, manteniéndose esta diferencia significativa (ver Anexo 10 y 11) únicamente en el Cilantro $F_{\alpha 0.05,4,1} = (F_{teo} 224,58 F_{exp} 957,17)$.

También se observa que en las raíces el almacenamiento del Manganese disminuyó (Figura 12) y obtuvo diferencias significativas para ambas plantas (Anexo 12 y 13). Según los datos arrojados por el ANOVA $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{teo} 9,28 F_{exp} 83,30)$, este parámetro tiene diferencias significativas entre los tratamientos realizados (agua cruda, control, higuera y cilantro) (Ver Anexos 8. Resultados ANOVA y 9. Datos usados en el ANOVA). La diferencia significativa se mantiene analizando por aparte la Higuera y el Cilantro, mientras que analizando por aparte el control no existe diferencia significativa. A medida que pasa el tiempo (Ver Anexo 10 y 11) el Cilantro $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{teo} 1364,42 F_{exp} 224,58)$ y la Higuera $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{teo} 1324,42 F_{exp} 224,58)$ se mantuvo una diferencia significativa para ambas macrófitas.

Los valores de Cd, Co, Ni y Pb (Figuras 13 a 16) estuvieron por debajo del límite de cuantificación establecido en el laboratorio.

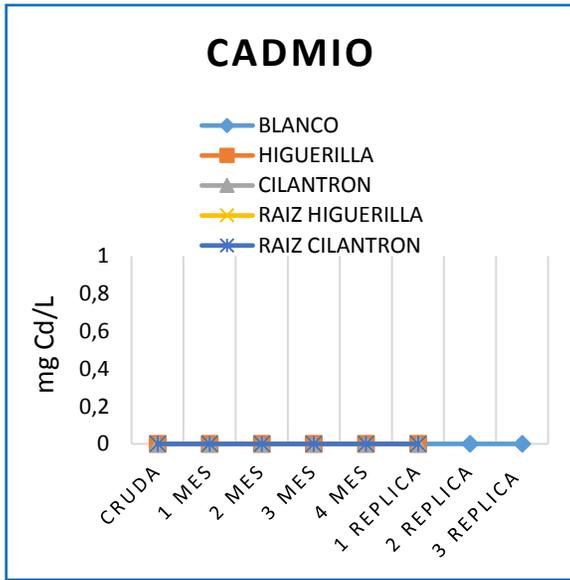


Figura 13 Resultado Cadmio

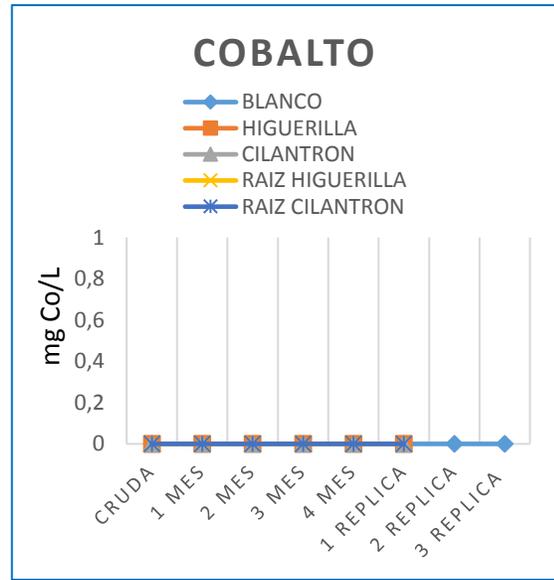


Figura 14 Resultado Cobalto

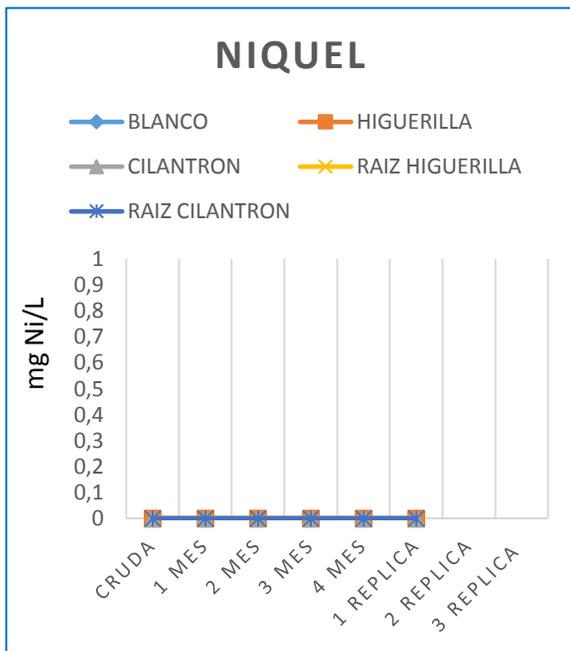


Figura 15 Resultado Níquel

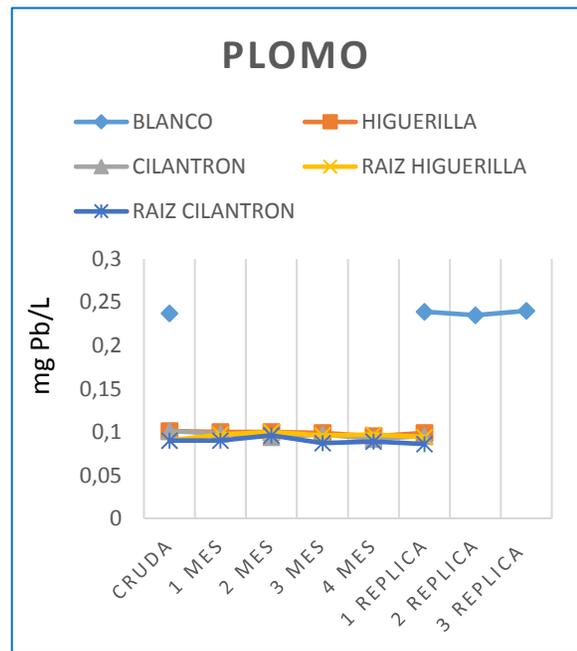


Figura 16 Resultados Plomo

La Demanda Bioquímica de Oxígeno mostró grandes cambios durante los cuatro meses llegando a valores por debajo del límite de cuantificación del laboratorio. La Higuierilla para el segundo mes ya presentaba valores por debajo del límite de cuantificación (Figura 17). Según el análisis de ANOVA este parámetro no tiene diferencia significativa $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{teo} 9,28 F_{exp} 1,15)$

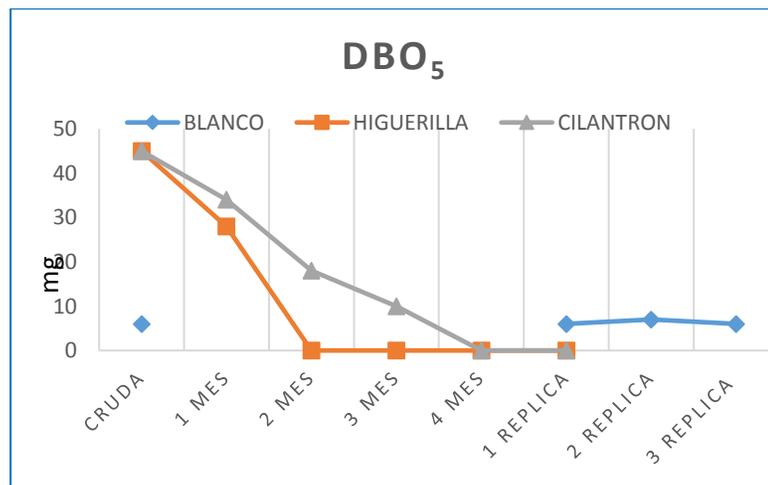


Figura 17 Resultado DBO₅

La Demanda Química de Oxígeno presentó los valores más bajos en el cuarto mes (Figura 18). El análisis ANOVA arrojó datos sin diferencia, todos los tratamientos son iguales $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{teo} 9,28 F_{exp} 1,15)$

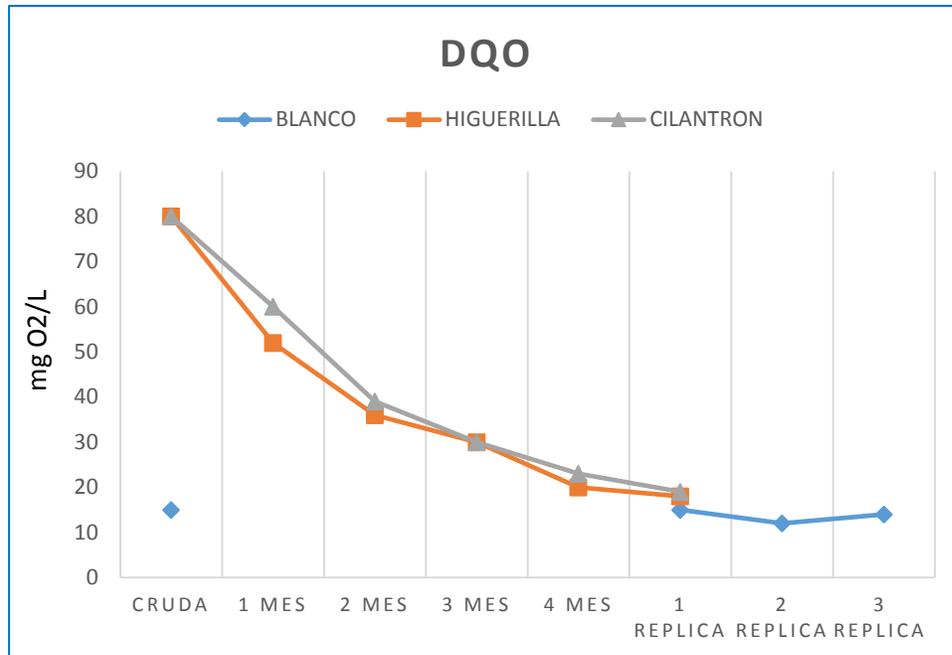


Figura 18 Resultados DQO

Considerando los valores obtenidos al inicio del proyecto se observa que en el parámetro de Nitrógeno Amoniacal se registra en el cuarto mes valores por debajo del límite de cuantificación del laboratorio (Figura 20) pero estadísticamente los datos no presentan una diferencia significativa $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{teo} 9,28 F_{exp} 1,28)$.

En el Hierro las dos macrófitas presentaron valores que fueron disminuyendo durante cada mes (Figura 19), en este parámetro los datos registrados por el ANOVA dan una diferencia significativa $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{teo} 9,28 F_{exp} 79,10)$, la cual se mantiene analizando por aparte el control y el cilantrón. El análisis por aparte de la higuierilla no presenta diferencias significativas (Anexos 8 y 9), el Cilantrón a medida que pasa el tiempo desde el mes 0 al último mes presenta una diferencia significativa (Ver Anexo 10 y 11) $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{teo} 22105,17 F_{exp} 224,58)$.

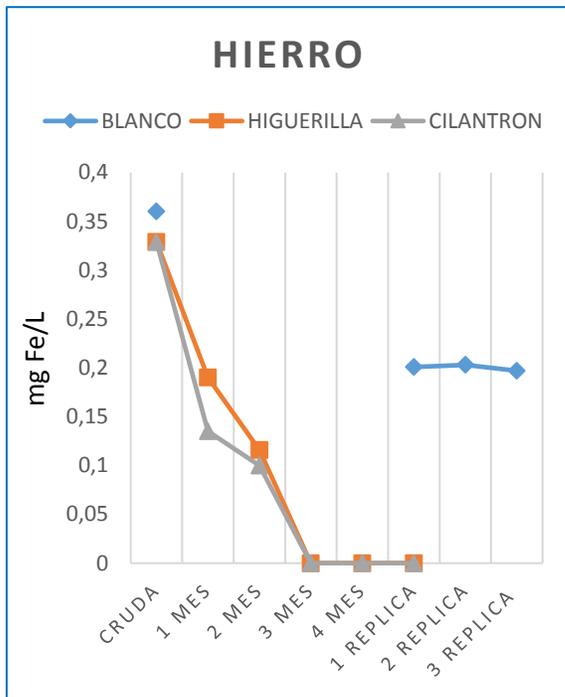


Figura 19 Resultados Hierro

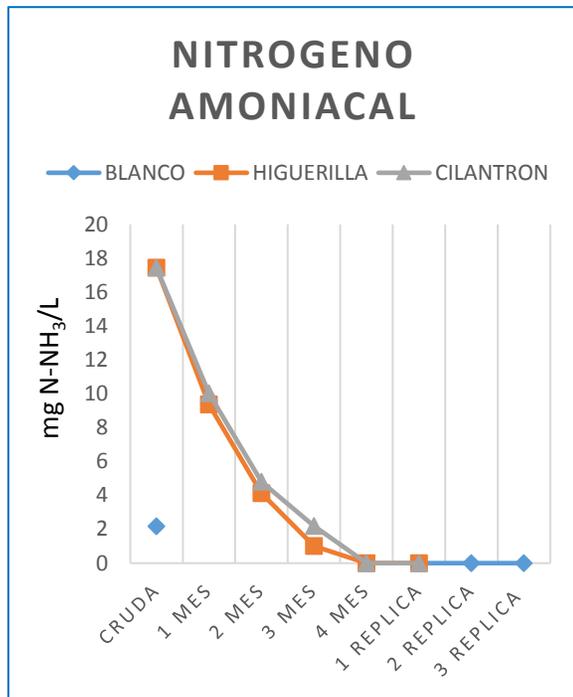


Figura 20 Resultados Nitrógeno Amoniacal

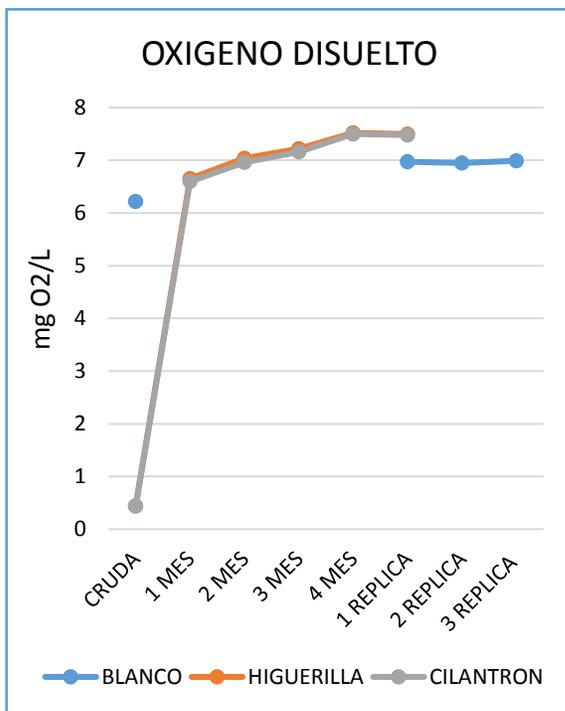


Figura 21 Resultados OD

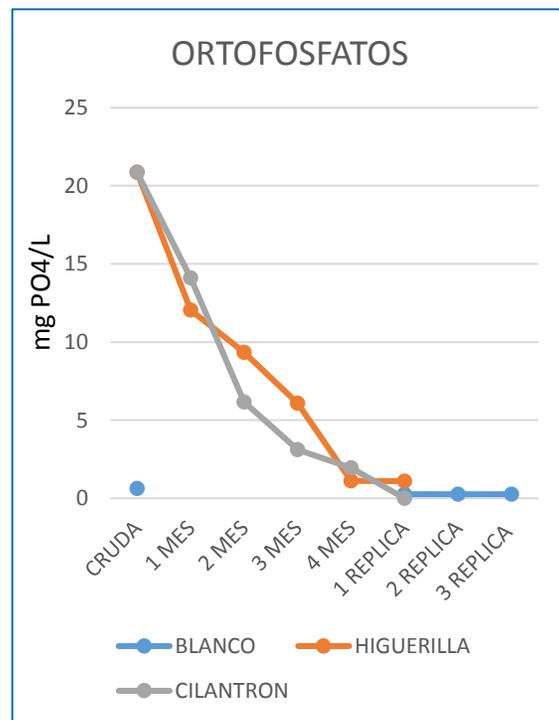


Figura 22 Resultados Ortofosfatos

El oxígeno disuelto presentó datos similares para las dos macrófitas (Figura 21), y la estadística no entrega diferencias significativas $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{\text{teo}} 9,28 F_{\text{exp}} 1,06)$. En el ensayo los ortofosfatos presentaron una disminución de sus valores en los tres últimos meses (Figura 22), para el ANOVA los tratamientos no tienen diferencias significativas $F_{\alpha 0.05,3,3} = (F_{\text{teo}} 9,28 F_{\text{exp}} 1,17)$.

La turbiedad (figura 24) presentó diferencias significativas para el control, higuierilla y cilantrón (ver Anexo 8 y 9). Los datos obtenidos por el ANOVA muestran que a medida que pasa el tiempo la turbiedad va disminuyendo (Anexo 10 y 11).

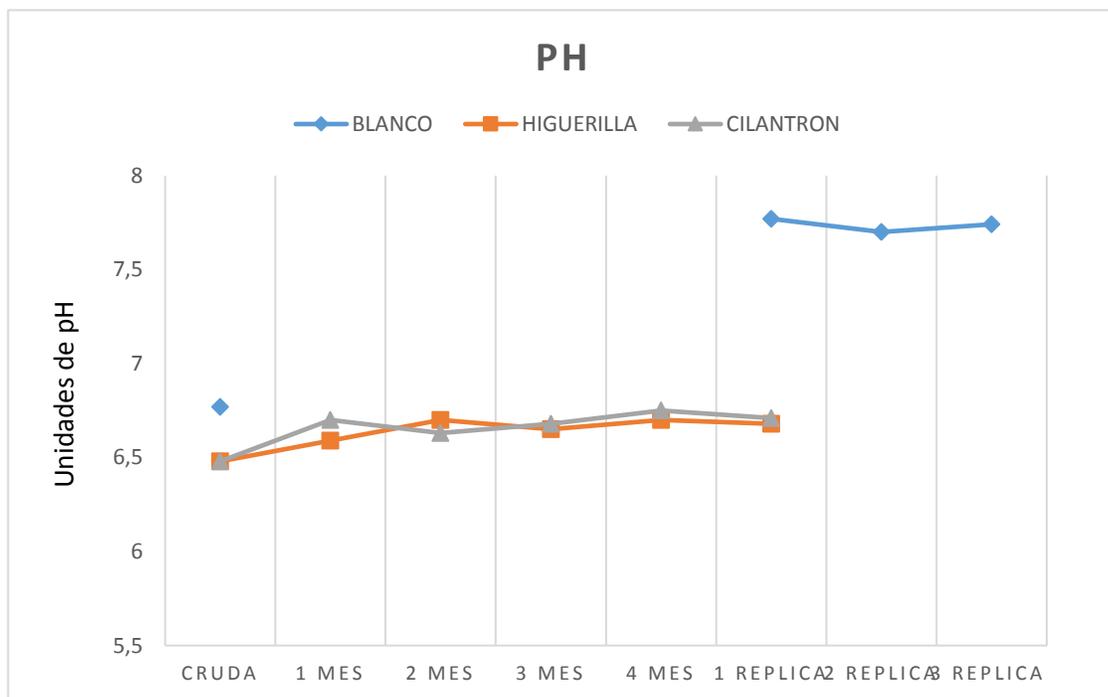


Figura 23 Resultados pH

El pH durante los cuatro meses no presentó diferencias entre las macrófitas, el agua se mantuvo siempre en un pH levemente ácido.

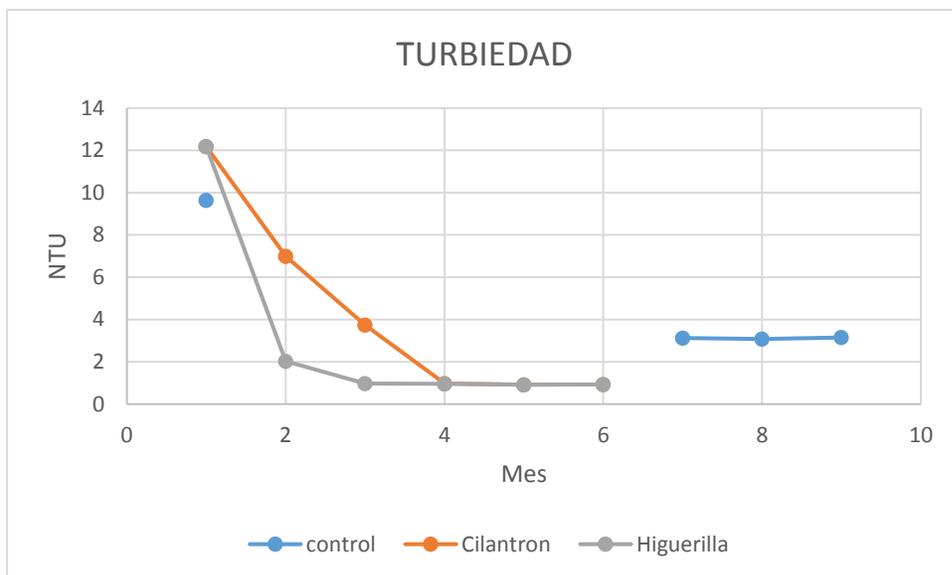


Figura 24 Resultados Turbiedad

7 DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Los altos niveles de fosfatos, nitrógeno amoniacal, DBO, DQO y los bajos niveles de oxígeno disuelto indican que hay contaminación en el tramo del Caño la Cuerera, parámetros como el hierro, oxígeno disuelto, manganeso no cumplen con los valores máximos permitidos por el Decreto 1076 de 2015.

El exceso de nutrientes como fosfatos y nitrógenos puede deberse a los vertimientos, los cuales aumentan la cantidad de materia orgánica (Roldán, 2003), llegando a provocar incremento de algas (Baird, 2001). Los altos niveles de contaminación de estos parámetros conllevan a una baja concentración de oxígeno disuelto en la fuente hídrica.

En una fuente contaminada se ven afectados los peces entre otros animales acuáticos, fauna y flora cercana, y puede causar enfermedades

en la piel de las personas, puesto que no es recomendable para uso recreativo.

Las concentraciones de hierro y plomo sobrepasan los límites máximos permitidos por la norma 1076 de 2015 para uso de fauna y flora (ver Anexo 7). Según Jiménez (2001) el hierro en el agua se debe a la corrosión de tuberías y no presenta problemas graves de toxicología. Los metales pesados pueden venir de vertimientos, según Manahan (2007) dichas sustancias pueden causar enfermedades en los humanos.

En cuanto a la construcción del sistema de hidroponía para la ejecución de la investigación, se tiene como resultado que el sistema adaptado funciona de forma adecuada para el desarrollo de los objetivos del estudio, y por tanto se recomienda su uso en investigaciones posteriores.

Estadísticamente los parámetros que son removidos por las plantas o el tratamiento de recirculación (control) son (Anexo 8 y 9):

- ✓ La higuera: Manganeso y turbiedad.
- ✓ El cilantrón: Aluminio, Hierro, Manganeso y turbiedad
- ✓ Control estadístico: hierro y turbiedad.

En varios parámetros se observa en los datos que existe una disminución de su magnitud a través del tiempo de tratamiento, pero a nivel estadístico no se establece una diferencia significativa debido a que los datos iniciales del agua cruda son muy diferentes a los datos del control. A estos datos se les trata como no concluyentes, debido a que posiblemente la no diferencia estadística se puede deber únicamente por el error inicial del experimento.

Los parámetros cuya remoción es no concluyente, y se observa una remoción por parte de las plantas o tratamiento, sin tener en cuenta la estadística son (Anexo 8 y 9):

- ✓ La higuierilla: DBO, DQO
- ✓ El cilantrón: DBO, DQO
- ✓ Control: NH₃, PO₄

El parámetro de OD mejora sustancialmente en todos los tratamientos realizados.

El parámetro de Plomo parece no ser afectado por ningún tratamiento.

Se demostró que las plantas utilizadas para el tratamiento son capaces de absorber metales pesados y materia orgánica. Realizando el análisis de datos a través de ANOVA se obtiene que la higuierilla a medida que pasa el tiempo va removiendo manganeso y turbiedad, estos resultados tienen una similitud con los obtenidos por Manzano (2010) en la reducción del tiempo de absorción de nitrógeno y fósforo empleando un sistema hidropónico, donde ambos parámetros se remueven a medida que pasa el tiempo. El cilantrón es la planta más eficiente en la remoción de los contaminantes analizados.

Durante el estudio se analizó la raíz de cada planta donde se observa que la Higuierilla y el Cilantrón absorbieron y almacenaron los metales (aluminio y manganeso) en otra parte de la planta, los datos del ANOVA registraron diferencias significativas a medida que pasaba el tiempo, relacionándose estos resultados con los encontrados en la Universidad Nacional Autónoma de México (2013) y por Mesa (2014) que da como

resultado que la Higuierilla tiene capacidad de concentrar metales. Por tanto, se descarta que estas plantas acumulen los metales en las raíces, sería necesario realizar otro estudio para verificar su acumulación en las hojas y tallos de la planta. Se debe tener en cuenta que el Cilantrón es una planta poco estudiada en el tema de la fitorremediación.

A medida que se recircula el agua se va aumentando el oxígeno disuelto y este juega un papel importante para disminuir concentraciones de parámetros como es el caso de la DBO y DQO, el proceso de aireación es muy utilizado para remover hierro, nitrógeno y fosfatos (Paulson, 2012). Para este ensayo se puede observar que la remoción de estos parámetros está relacionada con el control, lo que quiere decir que la remoción de estos parámetros se obtiene con ayuda del proceso de recirculación y aireación al igual que en la investigación de Paulson (2012).

8 CONCLUSIONES

Los parámetros nitrógeno amoniacal, ortofosfatos y turbiedad del caño la Cuerera, no cumplen con lo establecido en el Decreto 1076 de 2015.

El sistema de hidroponía se realizó de forma adecuada y eficiente para el desarrollo de los objetivos del estudio.

El cilantrón es la planta más eficiente en la remoción de los contaminantes analizados.

El proceso de aireación y recirculación ayudó a remover los parámetros de hierro y turbiedad (comprobados estadísticamente) y nitrógeno y fosfatos (datos obtenidos, análisis estadístico no concluyente).

Los contaminantes que fueron removidos por la higuera según datos registrados por el ANOVA fueron: manganeso y turbiedad.

Estadísticamente los parámetros removidos por el cilantrón fueron: Aluminio, hierro, manganeso y turbiedad.

Los parámetros cuya remoción es no concluyente, y se observa una remoción por parte de las plantas, sin tener en cuenta la estadística son DBO y DQO.

El parámetro de OD mejora sustancialmente en todos los tratamientos realizados.

El parámetro de Plomo parece no ser afectado por ningún tratamiento.

Se descarta que las plantas estudiadas acumulen los metales pesados removidos en sus raíces

9 RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso del sistema de hidroponía adaptado en esta investigación para futuras investigaciones del tema.
- Por los datos obtenidos en esta investigación se recomienda utilizar el cilantrón para fitorremediación y descontaminación del tramo de la carrera 1 (cerca al CAI de Catama) del caño la Cuerera.
- Para futuros estudios se recomienda hacer el montaje de un blanco experimental desde el inicio del experimento, con la misma muestra de agua.
- Se deberían hacer análisis de los tallos y hojas de cada macrófita utilizada, para confirmar la acumulación de los metales pesados.
- Aunque la autoridad del municipio de Villavicencio optó por cercar la fuente hídrica aledaña a los barrios para que la población no se acerque, el problema ambiental sigue en nuestros ríos, por esto se recomienda que el cilantrón pueda estar en contacto con la fuente hídrica para su fitorremediación.

BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo Betancur, L. M., Macias Mazo, K. I., & Suarez Mendoza, A. J. (2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista la Sallista de Investigación Vol 2 No. 1, 3*.
- Baird, C. (2001). Química ambiental. Editorial Reverté. España.
- Bolívar, L. F. (2014). *Contraloría de Villavicencio*.
- Calderon, J. T. (2009). *Fitorremediación de aguas residuales por hidroponia*. Mexico.
- Camelo Martínez, E (2011). Modulo de toxicología ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Cárdenas de Flores, C. H. Perruelo, T. Tarre, Y. Flores, K. Eliminación biológica de nitrógeno y fósforo de aguas residuales domésticas <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/tarre.pdf>
- Cresspi, R. (Julio de 2011). *Eliminación Biológica de nitrógeno de un efluente con alta carga orgánica y amoniacal*. Obtenido de http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12863/Rodriguez_Urioz_Raquel.pdf?sequence=6
- Empresa de acueducto y alcantarillado de Villavicencio E.S.P. (2015). *Informe de gestión ejecutivo empresa de acueducto y alcantarillado de Villavicencio E.S.P. AÑO 2012-2015*. Obtenido de http://www.eaav.gov.co/fileadmin/user_upload/documentos/Informes_de_gestion/INFORME_DE_GESTION_EAAV_VIGENCIA__2012_-_2015.pdf
- Escobar Martinez, I. (2011) Valoración económica de los servicios ecosistémicos que provee el sistema de humedales Kirpas Pinilla La Cuerera ubicado en la ciudad de Villavicencio - Meta. Trabajo de grado. Universidad Pontificia Javeriana.

Erostegui Revilla, C. Romero Ledezma, K. (2009) Contaminación por metales pesados. http://www.scielo.org.bo/pdf/rccm/v12n1/v12n1_a13.pdf

Grosso, J. Sánchez, L. Avendaño, D. y Restrepo, R (2000). Retención de cloruros, bario y cromo en dos especies de mangle *Avicennia Germinans* y *Rhizophora Mangle* desarrolladas en aguas de producción de la industria petrolera mediante la técnica de cultivo hidropónico. Bolívar – Colombia

Gómez Rendón, C. P. (2013). Manejo de aguas residuales en pequeñas comunidades. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá. http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358041/358041/Modulo_Curso_Manejo_de_Aguas_Residuales_en_Pequeñas_Comunidades.pdf

Informe de gestión ejecutivo empresa de acueducto y alcantarillado de Villavicencio E.S.P. AÑO 2012-2015. http://www.eaav.gov.co/fileadmin/user_upload/documentos/Informes_de_gestion/INFORME_DE_GESTION_EAAV_VIGENCIA__2012_-_2015.pdf

Jiménez, B. (2001). La contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada. México.

LLANO 7DIAS (2016) Investigan atentado ambiental a un caño en Villavicencio. <http://www.eltiempo.com/colombia/llano-7-dias/sustancia-quimica-fue-arrojada-a-cano-de-villavicencio-causando-dano-ambiental/16488360>

Manzano S, I. (2010). Tesis. Reducción del tiempo de absorción de nitrógeno y fósforo presentes en el agua residual mediante un pretratamiento, empleando un sistema hidropónico. Instituto politécnico nacional.

Manahan, S. (2007). Introducción a la química ambiental. Editorial Reverté. México D.F.

Ministerio de ganadería, agricultura y pesca. Manual de evaluación de impacto ambiental de actividades rurales. Uruguay <https://books.google.com.co/books?id=InnqaK9UCZAC&pg=PA34&dq=calid>

ad+de+aguas+superficiales&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwii2unJ-f3NAhVFpB4KHe2qB1cQ6AEIGjAA#v=onepage&q&f=false

Núñez Lopez, R. A., Means Vong, Y., Ortega Borgue, R., & Olguín, E. (2004). Fitorremediación: Fundamentos y Aplicaciones.

Orozco Barrenetxea, C. González Delgado, M. N. Alfayate Blanco, J. M. Pérez Serrano, A. Rodríguez Vidal, F. J. (2007). Problemas resueltos de contaminación ambiental: cuestiones y problemas. Madrid. https://books.google.com.co/books?id=qRrvrU5pcAgC&pg=PA23&dq=dbo+que+la+produce&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiPloux_P3NAhULLB4KHUVA AVQQ6AEIMjAE#v=onepage&q=dbo%20que%20la%20produce&f=false

Paredes Díaz, J. (2013). *Importancia del agua*. Obtenido de <http://www.usmp.edu.pe/publicaciones/boletin/fia/info86/articulos/importanciaAgua.html>

Paulson, L. (2012). *Que es la aireación del agua*. Obtenido de <https://www.rwlwater.com/que-es-la-aireacion-del-agua/?lang=es>

Pütz, P. Informe Práctico. Eliminación y determinación de fosfato. Hach Lange.

file:///C:/Users/VIVIANA%201/Downloads/14786780_DOC040.61.10011.Aug08.web.pdf

Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del agua. Remoción de hierro y manganeso en fuentes de agua subterránea para abastecimiento público. México. http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_04.pdf

República, P. d. (1984). *Decreto 1594*.

Revista Ambientum. (2002). Nitrógeno en el agua. Recuperado el 10 de julio. http://www.ambientum.com/revista/2002_05/NTRGNO2.asp

Rodríguez Urioz, R. (2011). Eliminación biológica de nitrógeno de un efluente con alta carga orgánica y amoniacal. Tesis master. http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12863/Rodriguez_Urioz_Raquel.pdf?sequence=6

Rogers, E. A. (16 de Septiembre de 2013). *Estudiantes mexicanos purifican agua con cilantro*. Obtenido de <https://www.veoverde.com/2013/09/estudiantes-mexicanos-purifican-agua-con-cilantro/>

Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Propuesta para el uso del método BMWP/Col*. Medellín: Universidad de Antioquia.

Sans Fonfría, R., & Ribas, J. (1989). *Ingeniería Ambiental: Contaminación y tratamientos*. España: Marcombo S.A.

Sánchez, O. Herzig, M. Peters, E. Márquez, R. Zambrano, L. (2007). Perspectiva sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. México. https://books.google.com.co/books?id=uWlrlx-r3oC&pg=PA124&dq=dbo+contaminacion+DEL+AGUA&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi79eOr_v3NAhWKHB4KHV1BAPcQ6AEIMjAD#v=onepage&q&f=false

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Calidad del agua. Programa de capacitación y certificación del sector de agua potable y saneamiento básico. http://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad_del_agua/#

Siles Fernández, E. Monforte Garrido, J. Estrany Coda, F. Oliver Pujol, R. Carreras Coma, S. (2008). *Técnica Industrial*. <http://www.tecnicaindustrial.es/tifrontal/a-355-Eliminacion-nitrogeno-amoniacal-aguas-residuales-sanitarias.aspx>

Suárez, J. Jácome, A. (2007). Eliminación de fósforo en los procesos de depuración de aguas residuales. Universidad de Coruña. ftp://ceres.udc.es/Master_en_Ingenieria_del_Agua/master%20antiguo_ant

es%20del%202012/Segundo_Curso/Tratamientos_Avanzados_del_Agua/master___TEMA_N___ELIMINACION_DE_FOSFORO.pdf

Torres Calderon, J. (2009). Tesis. *Fitorremediación de aguas residuales por hidroponia*. Instituto politécnico Nacional. Mexico.

UNAM estudia plantas que extraen metales pesados del suelo. (19 de Julio de 2003). Obtenido de <https://www.veoverde.com/2013/07/unam-estudia-plantas-que-extraen-metales-pesados-del-suelo/>

UNESCO. (1983). Programa de educación sobre problemas ambientales en las ciudades. Madrid. https://books.google.com.co/books?id=DZxX9z6T1PIC&pg=PA79&dq=dbo+que+la+produce&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiLyZyB_f3NAhUJgx4KHWj_A6QQ6AEIRjAl#v=onepage&q=dbo%20que%20la%20produce&f=false

UNESCO. (2003). *Agua para todos, agua para la vida*. Obtenido de <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556s.pdf>

Velasco, J. A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. pág. 36 <https://books.google.com.co/books?id=mj9rVESchHCcC&pg=PA36&dq=fitorremediacion+en+agua&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwisn66qIPHNAhVGKB4KHdYGDxsQ6AEIGjAA#v=onepage&q&f=false>

Villaseñor, J. (1998). Eliminación biológica de fosforo en aguas residuales urbanas. Universidad de castilla la mancha. Tesis doctoral. <https://books.google.com.co/books?id=8Vlu05kqFEgC&pg=PA13&dq=nitrogeno+amoniaco&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjWj7vDif7NAhVBHh4KHRd8BVIQ6AEIQzAG#v=onepage&q=nitrogeno%20amoniaco&f=false>

ANEXOS

ANEXO 1 Construcción del invernadero



ANEXO 2 Higuerilla





ANEXO 3 Recolección de la higerilla





ANEXO 4 Recolección del Cilantron

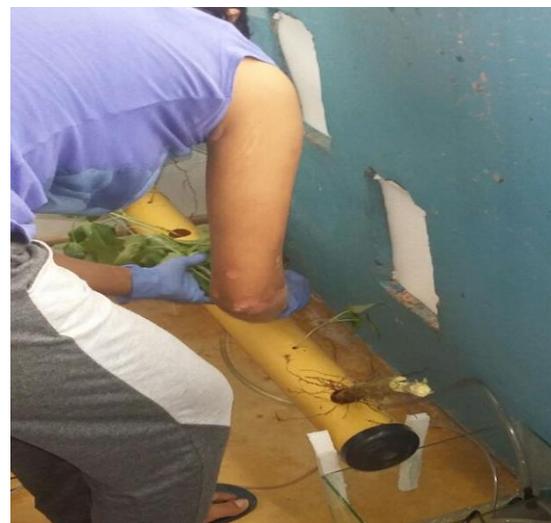


ANEXO 5 Lavado de raíces





ANEXO 6 Invernadero





ANEXO 7 Resultados

BLANCO DE MUESTRA					
	Unidad	Agua cruda	Mes		
			1 replica	2 replica	3 replica
Aluminio	mg Al/L	0,324	0,33	0,319	0,324
Cadmio	mg Cd-/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Cobalto	mg Co/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
DBO	mg O ₂ /L	6	6	7	6
DQO	mg O ₂ /L	15	15	12	14
Hierro	mg Fe/L	0,36	0,201	0,203	0,197
Manganeso	mg Mn/L	0,075	0,08	0,076	0,079
Níquel	mg Ni/L	< 0,03	< 0,03	<0,03	< 0,03
Nitrógeno Amoniacal	mg N-NH ₃ /L	2,17	< 0,5	< 0,5	< 0,5
OD	mg O ₂ /L	6,22	6,97	6,95	6,99
Ortofosfatos	mg PO ₄ /L	0,626	0,265	0,258	0,263
pH	UN	6,77	7,77	7,7	7,74
Plomo	mg Pb/L	0,237	0,239	0,235	0,24
Turbiedad	NTU	9,64	3,12	3,08	3,15

HIGUERILLA							
	Unidad	Agua cruda	1er mes	2do mes	3er mes	4to mes	
Aluminio	mg Al/L	0,313	0,299	0,28	0,252	0,231	0,239
Cadmio	mg Cd-/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Cobalto	mg Co/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
DBO	mg O ₂ /L	45	28	< 5	< 5	< 5	< 5
DQO	mg O ₂ /L	80	52	36	30	20	18
Hierro	mg Fe/L	0,329	0,19	0,116	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Manganeso	mg Mn/L	0,065	0,027	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Niquel	mg Ni/L	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Nitrogeno Amoniacal	mg N-NH ₃ /L	17,43	9,36	4,12	1	< 0,5	< 0,5
OD	mg O ₂ /L	0,44	6,65	7,04	7,22	7,52	7,5
Ortofosfatos	mg PO ₄ /L	20,861	12,052	9,341	6,09	1,112	1,098
pH	UN	6,48	6,59	6,7	6,65	6,7	6,68
Plomo	mg Pb/L	0,101	0,1	0,1	0,099	0,095	0,099
Turbiedad	NTU	12,18	2,03	< 1	< 1	< 1	< 1

CILANTRON							
	Unidad	Agua cruda	1er mes	2do mes	3er mes	4to mes	
Aluminio	mg Al/L	0,313	0,268	0,233	0,224	0,213	0,215
Cadmio	mg Cd- /L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Cobalto	mg Co/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
DBO	mg O ₂ /L	45	34	18	10	< 5	< 5
DQO	mg O ₂ /L	80	60	39	30	23	19
Hierro	mg Fe/L	0,329	0,135	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Manganeso	mg Mn/L	0,065	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Niquel	mg Ni/L	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Nitrogeno Amoniacal	mg N-NH ₃ /L	17,43	10,02	4,8	2,18	< 0,5	< 0,5
OD	mg O ₂ /L	0,44	6,6	6,96	7,16	7, 50	7, 48
Ortofosfatos	mg PO ₄ /L	20,861	14,106	6,163	3,112	1,952	1, 960
pH	UN	6,48	6,7	6,63	6,68	6,75	6,71
Plomo	mg Pb/L	0,101	0,098	0,094	0,097	0,092	0,095
Turbiedad	NTU	12,18	6,99	3,74	< 1	< 1	< 1

RAIZ HIGUERILLA							
	Unidad	Agua cruda	1er mes	2do mes	3er mes	4to mes	
Aluminio	mg Al/L	0,4	0,342	0,31	0,286	0,263	0,26
Cadmio	mg Cd- /L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Cobalto	mg Co/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Manganeso	mg Mn/L	0,053	0,03	0,017	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Niquel	mg Ni/L	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Plomo	mg Pb/L	0,09	0,097	0,1	0,096	0,097	0,094

RAIZ CILANTRON							
	Unidad	Agua cruda	1er mes	2do mes	3er mes	4to mes	
Aluminio	mg Al/L	0,4	0,28	0,262	0,255	0,246	0,25
Cadmio	mg Cd- /L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Cobalto	mg Co/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Manganeso	mg Mn/L	0,053	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Niquel	mg Ni/L	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Plomo	mg Pb/L	0,09	0,09	0,096	0,087	0,089	0,086

ANEXO 8 Resultados ANOVA primer mes.

PARAMETRO	TODOS		BLANCO		HIGUERILLA		CILANTRON	
	F exp	F teórica	F exp	F teórica	F exp	F teórica	F exp	F teórica
ALUMINIO	21,78	9,28	1,01	10,13	5,96	9,55	30,59	9,55
DBO	1,15	9,28	-	-	-	-	-	-
DQO	1,22	9,28	-	-	-	-	-	-
HIERRO	79,1	9,28	149,89	10,13	8,58	18,51	343,00	18,51
MANGANESO	83,3	9,28	4,26	10,13	51,22	9,55	94,94	9,55
NH3	1,28	9,28	-	-	-	-	-	-
OD	1,06	9,28	-	-	-	-	-	-
PO4	1,17	9,28	-	-	-	-	-	-
PLOMO	2,53	9,28	-	-	-	-	-	-
TURBIEDAD	27,7	9,28	67,73	10,13	718,08	18,51	34,09	9,55

ANEXO 9 Datos utilizados para el ANOVA primer mes.

PARAMETRO	BLANCO			AGUA SIN TRATAR		HIGUERILLA	CILANTRON
ALUMINIO	0,33	0,319	0,324	0,324	0,313	0,299	0,268
DBO	6	7	6	6	45	28	34
DQO	15	12	14	15	80	52	60
HIERRO	0,201	0,203	0,197	0,36	0,329	0,19	0,135
MANGANESO	0,08	0,076	0,079	0,075	0,065	0,027	0,009
NH3	0,441	0,44	0,443	2,17	17,43	9,36	10,02
OD	6,97	6,95	6,99	6,22	0,44	6,65	6,6
PO4	0,265	0,258	0,263	0,626	20,861	12,052	14,106
PLOMO	0,239	0,235	0,24	0,237	0,101	0,1	0,098
TURBIEDAD	3,12	3,08	3,15	9,64	12,18	2,03	6,99

ANEXO 10 Datos utilizados para el ANOVA del paso del tiempo

PARAMETRO	AGUA CRUDA	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4		PLANTA
ALUMINIO	0,313	0,268	0,233	0,224	0,213	0,215	Cilantrón
HIERRO	0,329	0,135	0,100	0,098	0,090	0,089	Cilantrón
MANGANESO	0,065	0,009	0,008	0,007	0,008	0,007	Cilantrón
MANGANESO	0,065	0,027	0,009	0,008	0,008	0,007	Higuerilla
TURBIEDAD	12,18	2,03	0,98	0,96	0,92	0,93	Higuerilla
TURBIEDAD	12,18	6,99	3,74	0,98	0,92	0,93	Cilantrón

ANEXO 11 Resultados ANOVA paso del tiempo

PARAMETRO	HIGUERILLA		CILANTRON	
	F exp	F teórica	F exp	F teórica
ALUMINIO	-	-	957,17	224,58
HIERRO	-	-	22105,17	224,58
MANGANESO	1324,42	224,58	1364,42	224,58
TURBIEDAD	510332,75	224,58	517235,75	224,58

ANEXO 12 Datos utilizados para el ANOVA del paso del tiempo raíz

PARAMETRO	AGUA CRUDA	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4		RAIZ PLANTA
ALUMINIO	0,400	0,280	0,262	0,255	0,246	0,250	Cilantrón
ALUMINIO	0,400	0,342	0,310	0,286	0,263	0,260	Higuerilla
MANGANESO	0,053	0,008	0,006	0,007	0,006	0,007	Cilantrón
MANGANESO	0,053	0,03	0,017	0,007	0,007	0,008	Higuerilla

ANEXO 13 Resultados ANOVA paso del tiempo raíz

PARAMETRO	HIGUERILLA		CILANTRON	
	F exp	F teórica	F exp	F teórica
ALUMINIO	800,24	224,58	542,78	224,58
MANGANESO	839,42	224,58	890,50	224,58