

**EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LA PLANTA *AZOLLA PINNATA* EN
EFLUENTES PISCÍCOLAS Y SU EFECTO EN LA CALIDAD DEL AGUA.**



**JHENNY KATHERINE HUETIO PASSOS
MARLON ANDRÉS CUERVO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL - GIIA
POPAYÁN
2009**

**EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LA PLANTA *AZOLLA PINNATA* EN
EFLUENTES PISCÍCOLAS Y SU EFECTO EN LA CALIDAD DEL AGUA.**

**JHENNY KATHERINE HUETIO PASSOS
MARLON ANDRÉS CUERVO**

TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR
ING. GUILLERMO CHAUX FIGUEROA
Docente departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL - GIIA
POPAYÁN
2009**

Nota de aceptación:

Firma del director del trabajo de grado

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, Diciembre de 2009

HOJA DE DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir y conocer la Ingeniería Ambiental.
A mi Papá Esteban Cerón, por los sacrificios, por apoyarme y creer en mí siempre.
A mi Mami Cecilia Passos, por ser mi amiga y consejera en momentos de alegría y
desesperación.

A mi hermana Melissa Cerón, por ver en mí un ejemplo de vida.

A mis abuelos José y Ligia por sus buenos deseos y bendiciones.

A mis tíos: Jaime Pazos, Nhora Pazos, Alba Pazos, Julio Piamba, Elsy Ordoñez y
mis primas Jessica pazos y Marieth Solarte por depositar confianza en todo lo que
realizo.

A mis verdaderos amigos: Victoria Salazar, Diana Monsalve y Andrés Vargas; por
su compañía e incondicionalidad a pesar de las circunstancias.

A mi grupo "GEIA", por todas las enseñanzas.

KATHERINE HUETIO

A mis abuelos Mario y Ligia, por su constante apoyo en el transcurso de toda mi
vida.

A mi tía Lida, por ser una persona incondicional y brindarme su colaboración en
todos los aspectos de mi vida.

A mi tía Patricia, por ser ese gran soporte y creer en mis logros.

A mi hijo Samuel Cuervo, por darme esa fe y esperanza para salir adelante.

Adriana gracias por tu amor cariño y comprensión

Finalmente esta dedicatoria va especialmente a mi Madre que desde el cielo
siempre me acompaña.

MARLON ANDRÉS CUERVO

HOJA DE AGRADECIMIENTOS

Los autores de este documento agradecen a:

Director de proyecto de grado Ing. Guillermo Chaux Figueroa. Por confiar en nosotros, por su entrega, paciencia y apoyo durante todo el proyecto.

Al CREPIC, por permitirnos hacer parte del proyecto “Desarrollo y Adaptación de Tecnología para el Tratamiento de Efluentes Piscícolas”, financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural

A todos los profesores del programa por instruirnos a lo largo de nuestra carrera.

A nuestra familia, por ser persistentes y creer en nuestros logros; Padres, Hijos, Hermanos y Amigos, por su apoyo.

A nuestros compañeros y a todas las personas que de una u otra manera nos acompañaron en todo el proceso académico.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE FOTOS.....	VIII
LISTA DE ANEXOS	IX
ABREVIATURAS	X
INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO	XI
RESUMEN.....	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. OBJETIVOS.....	19
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
5. MARCO TEÓRICO	20
5.1 TILAPIA ROJA	22
5.1.1 La producción de alevinos.	23
5.1.2 Levante:	23
5.1.3 Procesamiento.....	24
5.1.4 Canales de comercialización.	24
5.2 CLASIFICACIÓN DE LA ESPECIE	24
5.3 REPRODUCCIÓN.....	24
5.4 CALIDAD DEL AGUA PARA LA CRÍA DE TILAPIA	25
5.4.1 Temperatura.	25
5.4.2 Oxígeno:	25
5.4.3 pH:	25
5.4.4 Amoníaco:.....	25
5.5 PRINCIPALES CONTAMINANTES PRODUCIDOS POR LA EXPLOTACIÓN PECUARIA	26
5.6 CONTRIBUCIONES EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES PISCÍCOLAS.....	26
5.7 DEPURACIÓN DE AGUAS MEDIANTE SISTEMAS DE MACRÓFITAS	27
5.7.1 Sistema de macrófitas emergentes de flujo superficial	27
5.7.2 Sistema de macrófitas emergentes de flujo sub superficial	27
5.7.3 Sistema de macrófitas flotantes.....	28
5.8 LAS PLANTAS ACUÁTICAS.....	28
5.9 AZOLLA (<i>AZOLLA MICROPHYLLA L.</i>)	28
5.9.1 <i>Azolla Pinnata</i>	30
5.9.1.1 Factores que afectan el desarrollo de <i>Azolla</i>	31

5.10 BENEFICIOS AMBIENTALES DE LA APLICACIÓN DE LOS FILTROS DE MACRÓFITAS EN FLOTACIÓN PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	32
6. METODOLOGÍA.....	34
6.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	34
6.2 CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE	35
7. DISCUSIÓN Y RESULTADOS	39
7.1 CARACTERIZACION DEL EFLUENTE.....	39
7.2 TEMPERATURA	41
7.3 POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH).....	42
7.4 OXÍGENO DISUELTO (O.D)	43
7.5 FÓSFORO TOTAL (PT)	44
7.6 NITRÓGENO TOTAL (NT) Y NITRÓGENO AMONIACAL (NH ₃ -N)	47
7.7 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	50
7.8 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	51
7.9 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO)	53
7.10 CRECIMIENTO DE <i>AZOLLA</i> PINNATA EN EL SISTEMA PILOTO	55
8. CONCLUSIONES	62
9. RECOMENDACIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1 Parámetros para la caracterización del efluente	36
Tabla No. 2 Parámetros del efluente en la estación piscícola La Yunga, evento cosecha	39
Tabla No. 3 Parámetros del efluente en la estación piscícola La Yunga, en condiciones de operación normal	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Evolución de la producción nacional de piscicultura.	21
Figura 2 Evolución de la producción nacional por especies piscícolas en toneladas.	22
Figura 3 Ubicación estación piscícola " la Yunga". Departamento del Cauca Colombia. Adaptado de POT 2002-2012.	34
Figura 4 Planta piloto (estación piscícola " La Yunga")	35
Figura 5 Valores máximos y mínimos de temperatura en cada tanque	41
Figura 6 Potencial de Hidrógeno promedio en cada tanque	42
Figura 7 Promedios oxígeno disuelto en operación normal y cosecha	43
Figura 8 Comportamiento de fósforo total promedio (PT) en operación normal y evento de cosecha	45
Figura 9 Comportamiento del nitrógeno total (NT) en evento de cosecha y operación Normal	48
Figura 10 Comportamiento de nitrógeno amoniacal (NH ₃ -N) en operación normal y en cosecha	49
Figura 11 Valores Promedio de los Sólidos Suspendidos en la planta piloto	50
Figura 12 Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos en funcionamiento normal y en cosecha	51
Figura 13 Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno promedio (DQO) en la planta piloto	52
Figura 14 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) promedio en operación normal y evento de cosecha	54
Figura 15 Tasas relativas de crecimiento de <i>Azolla</i>	56
Figura 16 Diagrama de cajas para crecimiento de biomasa de <i>Azolla</i>	57

LISTA DE FOTOS

Foto No 1. Coloración de <i>Azolla</i> en el último tanque	58
Foto No 2. Planta piloto estación piscícola “La Yunga”	59
Foto No 3. Incidencia de la luminosidad sobre los tanques	60

LISTA DE ANEXOS

Anexo A Características del efluente de la estación piscícola "La Yunga"(influyente)	73
Anexo B Resultados de los parámetros tomados en el tanque 1	74
Anexo C Resultados de los parámetros tomados en el tanque 2	75
Anexo D Resultados de los parámetros tomados en el tanque 3	76
Anexo E Resultados de los parámetros tomados en el tanque 4	77
Anexo F Resultados de los parámetros tomados en el tanque 5	78
Anexo G Estadísticos descriptivos de los parámetros analizados en la planta piloto de la estación piscícola la Yunga	79
Anexo H Tasa de crecimiento de <i>Azolla</i>	79
Anexo I Tasa relativa de crecimiento de <i>Azolla</i> (TRC)	80
Anexo J Tiempo de duplicación de <i>Azolla</i> (TD)	80
Anexo K Cálculo del peso seco de <i>Azolla</i>	81
Anexo L Promedios generales de los parámetros medidos en cada tanque	81
Anexo M Resumen de las pruebas estadísticas realizadas	82
Anexo N Fotos estación piscícola "La Yunga" y planta piloto	83

ABREVIATURAS

DBO = Demanda bioquímica de oxígeno

DQO = Demanda química de oxígeno

NH₃-N = Nitrógeno amoniacal

NT = Nitrógeno total

OD = Oxígeno disuelto

COND= Conductividad eléctrica

PT = Fósforo total

PO₄= Fosfatos

SST =Sólidos suspendidos totales

T= Temperatura

T*= Tanque

TC= Tasa de crecimiento

TRC= Tasa relativa de crecimiento

TD= Tiempo de duplicación

mg/L= Miligramo por litro

µs/cm = MicroSiemens por centímetro

INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Título:

Evaluación del crecimiento de la planta *Azolla Pinnata* en efluentes piscícolas y su efecto en la calidad del agua.

Estudiantes:

Jhenny Katherine Huetio Passos.
Marlon Andrés Cuervo.

Director:

Ing. Guillermo Chaux Figueroa.

Lugar de investigación:

Estación piscícola “La Yunga” (Popayán).
Laboratorio de Ingeniería Ambiental, Universidad del Cauca.

Duración del proyecto:

Seis meses

Tipo de proyecto:

Investigación básica y aplicada

Financiación:

Ministerio de Agricultura
CREPIC
Universidad del Cauca.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar a escala piloto la eficiencia de eliminación de contaminantes (nitrógeno, fósforo y materia orgánica) en un efluente proveniente del cultivo de Tilapia Roja en la estación piscícola "La Yunga"-Cauca; utilizando lagunas de *Azolla* como tratamiento natural, y verificar el crecimiento de la planta *Azolla Pinnata* en dichos líquidos. El estudio se ejecutó entre Abril y Agosto de 2009.

A pesar de haber crecido en el sistema piloto, *Azolla* no se adaptó al medio de la manera más adecuada debido a que el efluente no presentó los requerimientos necesarios para su óptimo desarrollo (nutrientes y condiciones ambientales), por lo cual se obtuvieron tasas relativas de crecimiento entre 0.01 y 0.021 d⁻¹ y producción de biomasa fresca entre 42.7 y 100.7 g/m².d; valores inferiores a los reportados en otros estudios. También se demostró que *Azolla* no es eficiente en la eliminación de nitrógeno total debido a su característica específica de fijación de nitrógeno, por lo que se presentaron incrementos globales del 13.6% en este parámetro dentro de la planta piloto, efecto negativo; ya que no se mejora la calidad del efluente tratado. En cuanto a la remoción de fosforo total *Azolla* presentó eficiencias de 54.2% en etapa normal y de 69.8% en eventos de cosecha, SST 60.1% y 64% en cada evento respectivamente. Finalmente, se obtuvieron remociones de materia orgánica que se pueden considerar altas, teniendo en cuenta que este efluente es bastante diluido, lo que dificulta su tratamiento biológico, reportando eficiencias de remoción de DBO de 57.5% en etapa de funcionamiento normal y 44.6% en evento de cosecha y remociones de DQO del 61%.

Palabras Claves: *Azolla. Anabaena. Nitrógeno. Fósforo. Nutrientes. Materia Orgánica. Efluente piscícola.*

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la conservación de los recursos del ambiente es de gran preocupación ya que son la base de la sustentabilidad económica de los países. La destrucción de la base productiva de la naturaleza y la lucha por acceder a los recursos naturales (tierra, agua, bosques, etc.), son agudas y tienden a agravarse, provocando la extinción y disminución en las poblaciones de las especies silvestres de fauna y flora, debilitando el abastecimiento de materias primas necesarias para el mantenimiento de la población mundial. Es pues el gran desafío de la humanidad usar de una manera racional los recursos naturales disponibles; entre estos recursos el agua se destaca como el más importante porque es esencial para la vida en el planeta.

El crecimiento desordenado de las ciudades y la idea de que el agua es inagotable, han contribuido de manera firme a la degradación de la mayoría de los ríos y arroyos. El resultado de esa situación hace que se requieran acciones para volver a recuperar la calidad de las aguas. (De Oliveira, 2005) y darle a estas la vía adecuada para su utilización y posible re-utilización.

El liderazgo acuícola de Colombia está basado fundamentalmente en la riqueza de sus recursos hídricos lo que le otorga condiciones privilegiadas para el desarrollo de la acuicultura. Cuenta con 2,900 Km de costas en los dos océanos, 48,365 Km² de plataforma continental, 20,000 Km de ríos y más de 70,000 Ha en ciénagas, lagos, embalses y humedales (Castillo, 2006). De ahí que la acuicultura sea una de las actividades que a nivel productivo, ha tenido un mayor crecimiento económico a nivel nacional en el ámbito agropecuario; además de ser una alternativa de producción que brinda resultados a mediano plazo (6 meses) y que garantiza la inversión de los productores (COLPOS, 2007).

Después del arroz, los productos forestales, la leche y el trigo; los peces son el quinto producto agrícola más importante y el mayor recurso de proteína animal que consumen mas de mil millones de personas en todo el mundo (Castillo, 2006).

Desde el punto de vista nutritivo el pescado es considerado como un alimento funcional con un alto valor biológico, atribuyéndosele una serie de beneficios para la salud, en virtud a su aporte de proteína, aminoácidos esenciales, así como al contenido de ácidos grasos (Salamanca *et al.*, 2008). La gran biodiversidad acuática presente en el país, permite aseverar que existe aun una gran cantidad de especies con un atractivo potencial de cultivo a estudiar como es la tilapia roja, especialmente cuando el recurso pesquero en aguas continentales decrece cada

año debido a problemas de contaminación y sobrepesca, otorgándole a la acuicultura un rol importante en la seguridad alimentaria de las poblaciones afectadas (Castillo, 2006).

A pesar de todos los beneficios que trae el pescado, las excretas pecuarias contienen microorganismos patógenos y gusanos parásitos, tales como bacterias y helmintos. Al verter las aguas de esta fuente a los mantos acuíferos, se pone en peligro la vida del ser humano y otros animales (Nimukunda *et al.*, 2005). Por eso es de vital importancia la depuración de aguas residuales ya que es una necesidad imperiosa de la sociedad moderna debido al peligro que significan estas aguas. Sin embargo, en los países en vías de desarrollo los métodos convencionales para su tratamiento son impracticables, debido a sus altos costos de operación y mantenimiento, de aquí la necesidad de buscar métodos de bajo costo con los que pueda obtenerse algún subproducto.

Los sistemas de tratamiento acuáticos son una variante adecuada para la depuración de estas aguas, En ellos las plantas acuáticas funcionan como filtros biológicos removiendo sustancias tanto biodegradables como no biodegradables, nutrientes, sustancias tóxicas y microorganismos patógenos. Por otra parte las plantas cosechadas en los sistemas de tratamiento pueden ser utilizadas en la alimentación animal entre otras alternativas como es en el caso de *Azolla*. (Tchobanoglou, 1991; citado por Rodríguez *et al.*, 2001)

Azolla es un helecho acuático con pequeñas hojas alternas, que vive en simbiosis con cianobacterias, las cuales fijan el nitrógeno atmosférico y poseen generalmente una alta concentración de nutrientes; este puede ser usado con alta eficacia para abastecer de nutrientes a los cultivos y mejorar los sustratos (Castro *et al.*, 2006).

Este trabajo de grado hizo parte del proyecto —Desarrollo y adaptación de tecnología para el tratamiento de efluentes piscícolas— que fue adelantado por la Universidad del Cauca y el Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca (CREPIC), financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Se evaluó el desempeño de *Azolla Pinnata* plantada sobre lagunas en serie como sistema de tratamiento de efluentes del proceso productivo de tilapia roja, se observó su proceso de crecimiento, capacidad de fijación y su evolución teniendo en cuenta parámetros como DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, fosfatos, nitratos, pH, turbiedad, temperatura y conductividad; a escala piloto en la piscifactoría "La Yunga" (Popayán).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La notable disminución de la pesca de captura en el mundo ha conducido a que la producción acuícola (acuicultura) se constituya en una fuente alternativa de proteína para la seguridad alimentaria mundial (FAO, 2003). La piscicultura, definida como aquella actividad dedicada al cultivo de peces bajo manejo e implementación de buenas prácticas (desarrollo genético, incubación, alimentación, reproducción y sanidad de las especies), ha crecido de manera considerable durante las últimas décadas; de hecho en la actualidad Colombia cuenta con miles de productores a grande, mediana y pequeña escala.

En Colombia para la explotación piscícola a gran escala solo existen 88 plantas registradas, de las cuales solo cinco cuentan con la certificación del INVIMA sobre implementación del plan HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point System, o en español Sistema de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control). Estas últimas se encuentran localizadas en los departamentos del Huila, Tolima, el Valle del Cauca, Cauca y en el eje cafetero (FEDEACUA, 2001. Citado por Espinal, 2005).

Por otra parte es de gran importancia resaltar que en el país la industria piscícola para el año 2006 reportó una producción de 45.191 toneladas y para el año 2008 se proyectó por encima de las 63.000 toneladas, lo que involucra un incremento absoluto proyectado del 41.61% con respecto a este último año (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2008). Para el efecto la demanda de agua en miles de m³ por año para la actividad pecuaria es de 509.336, lo que corresponde al 8,8% de la demanda nacional; 5.785.765 miles de m³ por año (Ojeda *et al.*, 2000); este aumento ha traído consecuencias ambientales negativas en las fuentes hídricas a causa de los grandes vertimientos que esta actividad pecuaria genera.

Otras situaciones anexas al problema anterior son el volumen de las heces excretadas diariamente por la población de peces que es una de principales fuentes de residuos orgánicos en sistemas de acuicultura (Hussar *et al.*, 2005), lo cual involucra que la digestibilidad del material seco que se usa como alimento es del orden del 70 al 75%, teniendo presente que entre el 25 y el 30 % se convierta en residuo fecal (Kubitza, 1999; citado por Hussar *et al.*, 2005). Este material orgánico, no solo genera contaminación de tipo microbiológica, sino que también consume el oxígeno disuelto del agua, que compite con el oxígeno requerido por los peces; además otro efecto no tan notorio es el potencial efecto de las hormonas utilizadas en la reversión sexual de los peces en la producción de alevinos, por ejemplo en el caso de la tilapia (Ministerio de agricultura y desarrollo

rural, 2005), lo cual podría significar posibles implicaciones en la salud o condiciones de bienestar.

La preocupación mundial acerca de la contaminación ambiental, en la que se enmarca el problema de la calidad de los cuerpos hídricos, ha sido tema de discusión desde la Cumbre de Estocolmo, celebrada en 1972, en la que la comunidad internacional resaltó la importancia de proteger el ambiente. Esto conlleva a pensar en la problemática ambiental generada por la creciente industria piscícola en Colombia, la cual genera grandes vertimientos de sustancias contaminantes que sin previo tratamiento van a parar a las fuentes naturales de agua aumentando los problemas sanitarios y de escasez de este recurso hídrico, además de disminuir en consecuencia su calidad.

La contaminación de un cuerpo de agua depende del tamaño y calidad del vertimiento así como del tamaño de la fuente y su capacidad de asimilación. Los cuerpos hídricos del país son receptores de vertimientos de aguas residuales y su calidad se ve afectada principalmente por los vertimientos no controlados provenientes del sector agropecuario, doméstico e industrial (CONPES 3177, 2002); siendo la explotación acuícola un gran aportante a esta degradación natural de los cuerpos hídricos. Debido a esto se vio la necesidad de mejorar la calidad de agua proveniente del proceso piscícola desarrollando tecnologías más limpias y de bajo costo que permitieran minimizar los impactos que estos vertimientos generan sobre las fuentes naturales y el ambiente en general; teniendo en cuenta lo anterior este trabajo evaluó una alternativa de tratamiento por medio de la biofiltración utilizando una planta acuática llamada *Azolla Pinnata*.

3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la escasez del agua hace que cada vez más sea necesario ahorrar este recurso. Muchas industrias están intentando reemplazar el efluente de los sistemas del tratamiento; entre los procesos de tratamiento las plantas acuáticas aparecen como la alternativa para poder reusar el efluente mejorando la calidad de estos (De Oliveira, 2005).

La acuicultura produce un gran volumen de efluentes que, cuando se vierten en el ambiente causan graves impactos produciendo la eutrofización de los lagos y ríos por el exceso de N y P en la forma de vertido de efluentes (Boyd y Queiroz, 1997; citados por Pardo *et al.*, 2006). Dentro de este marco, es de resaltar el hecho de que el sector piscícola en el país, y particularmente en el Cauca, no cuenta con un manejo ambiental del recurso agua, por lo cual surge la necesidad de involucrar este sector productivo dentro de una esfera académica y de investigación, que permita establecer los parámetros técnicos y científicos que logren eficiencia y eficacia en el manejo y explotación del recurso logrando una mejor protección hacia el ambiente, anexando esta actividad económica a esa visión integral de planeación que toma fuerza en el país (De la Cruz y Salazar, 2007).

Sobre el tratamiento de los efluentes provenientes de los procesos piscícolas por métodos naturales hay poca información debido a que no se han hecho grandes estudios en el área; esto implica la búsqueda de estrategias nuevas, de fácil implementación y de bajo costo con impactos mínimos sobre el ambiente. Para tal fin se estudió la posibilidad de establecer metodologías naturales de tratamiento (fitotratamiento) de los vertimientos producidos por la industria piscícola como lo son el uso de plantas acuáticas como biofiltros

Una de las alternativas para disminuir la dependencia de los fertilizantes nitrogenados, puede ser la utilización de la fijación biológica del nitrógeno atmosférico mediante el uso de un helecho acuático (*Azolla Pinnata*); esta planta convive en asociación simbiótica mutualística con la cianobacteria *Anabaena* para formar la especie *Azolla A. Pinnata*. Esta asociación tiene la capacidad de fijar cantidades importantes de nitrógeno, el cual puede ser utilizado en procesos agrícolas.

Además el uso de *Azolla-Anabaena* en América se encuentra en fase de investigación y algunos trabajos en Brasil y Colombia, señalan que existe gran potencial para diferentes actividades agrícolas así como para comida en animales (Navas *et al.*, 2000).

Este trabajo buscó evaluar los resultados obtenidos en un sistema en serie de *Azolla Pinnata*. Las evaluaciones se basaron en los resultados de análisis físico-químicos del efluente donde se pretendió encontrar menor contaminación orgánica, optimizando de esta manera el recurso del efluente de la estación piscícola “La Yunga”.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el proceso de crecimiento de la planta *Azolla A. Pinnata* en efluentes piscícolas así como su efecto en la calidad del agua.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Evaluar la eficiencia de un sistema en serie de lagunas con *Azolla A. Pinnata* para la remoción de nitrógeno (amoniaco y total), fósforo total, sólidos suspendidos y materia orgánica (DBO₅ y DQO), del efluente de lagos productores de tilapia.
- ❖ Evaluar el crecimiento y adaptabilidad de *Azolla A. Pinnata*, en un sistema de lagunas en serie destinado al tratamiento de efluentes de lagos productores de tilapia.

5. MARCO TEÓRICO

La piscicultura es el cultivo intensivo de peces de agua dulce y agua salada; también se conoce como acuicultura que es el cultivo controlado de animales y plantas acuáticas hasta su cosecha, proceso, comercialización y consumo final. Al cultivo de peces se le denomina “piscicultura” y a la especie que se cultiva se le da el nombre de la actividad, por ejemplo: al cultivo de la trucha, truchicultura, al de la carpa, carpicultura, en el caso de los camarones, a su cultivo se le denomina camaronicultura, etc. Estas técnicas se han venido desarrollando en Colombia con relativo éxito durante las tres últimas décadas con el propósito de mejorar la dieta de los campesinos y mercadear los excedentes, en el nivel tecnológico inferior, y recientemente producir en forma industrial proteína de excelente calidad en los niveles tecnológicos superiores (Garzón, 2000).

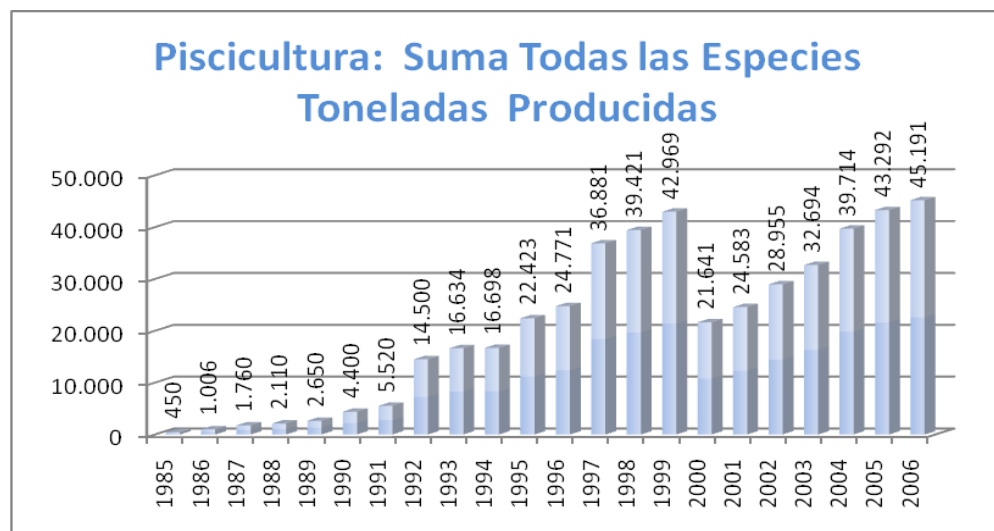
La acuicultura mundial (los peces para consumo y las plantas acuáticas) ha crecido significativamente durante el último siglo. Se pasó de una producción por debajo de 1 millón de toneladas en los años 50s a 5934 millones de toneladas para el año de 2004, con un valor aproximado de US\$ 70.3 mil millones. Esto representa un aumento medio anual de 6.9 % en la cantidad de peces consumidos (FAO, 2007).

Los peces representan el quinto renglón en importancia dentro de la producción agrícola mundial. Este producto provee el 25% de la proteína de origen animal en países desarrollados y el 75% en países en vía de desarrollo (Castillo, 2000; citado por López *et al.*, 2007).

El destino de la acuicultura en términos generales se orienta hacia la optimización de la reducción de costos, sistemas que utilicen más las tecnologías disponibles, que sean económicos y que aumenten la producción por unidad de área, mejor utilización de los recursos hídricos y producción de especies nativas. Las especies que están contribuyendo en mayor proporción al desarrollo de la acuicultura en Colombia son: tilapia roja, cachama, bocachico, trucha arco iris y camarón marino (Estrada, 2005).

Desde los años 70 la producción piscícola ha crecido substancialmente contribuyendo enormemente a la seguridad alimentaria mundial; la Figura 1 muestra la producción piscícola nacional; haciendo referencia al incremento en la cantidad de toneladas por año que se han venido produciendo durante las últimas dos décadas en Colombia; de esta producción la tilapia es el segundo grupo más importante de peces en el ámbito mundial después de las carpas chinas

(Salamanca *et al.*, 2008). El cultivo de tilapia comenzó a intensificarse aproximadamente en 1920; desde entonces, la tilapia roja (*Oreochromis spp*) ha sido una de las especies más producidas en la acuicultura mundial. Su alto nivel proteico, su bajo costo de producción y precio de venta asequible respecto a otras especies piscícolas, la convierten en un producto de gran importancia (López *et al.*, 2007) y aprovechando sus características se consideró ideal para la piscicultura rural. Posteriormente estos peces han sido introducidos en forma acelerada hacia otros países tropicales y subtropicales en todo el mundo, recibiendo el sobrenombre de las "gallinas acuáticas", ante la "aparente facilidad de su cultivo" soportado en la facilidad para su manejo, alta adaptabilidad a diferentes condiciones del medio, en algunos casos aún las más extremas, fácil reproducción, alta resistencia a enfermedades, alta productividad, generalmente herbívoras aunque aceptan todo tipo de alimentos tanto naturales como artificiales (Salamanca *et al.*, 2008).



Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2007.

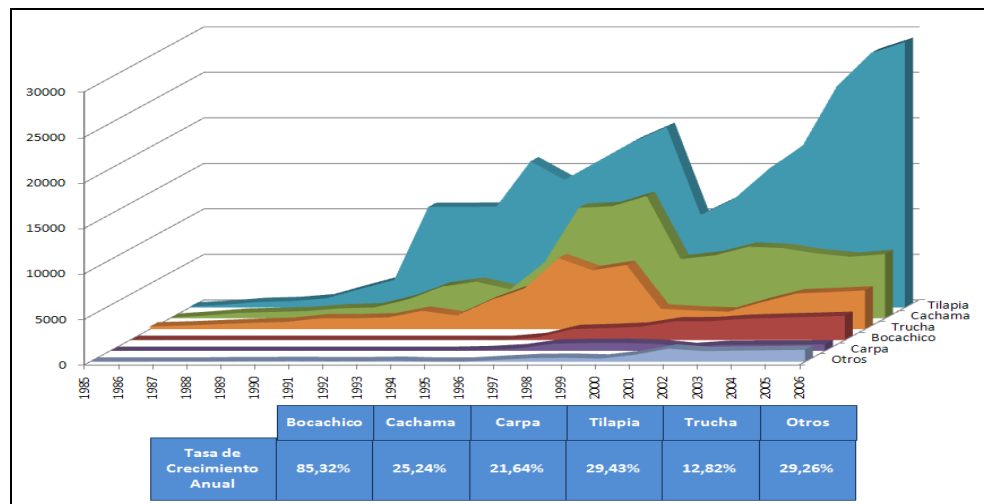
Figura 1. Evolución de la producción nacional piscícola.

En Colombia, la acuicultura se consolida como la actividad de mayor desarrollo dentro del sector pesquero (Sepúlveda, 2000; citado por López *et al.*, 2007). La producción de tilapia roja es la de mayor contribución al crecimiento de la acuicultura en el país (INPA, 2000; citado por López *et al.*, 2007), donde el consumo de esta especie, para el año 2001 superó las 30.000 toneladas, sumando la producción nacional (20.000 toneladas aproximadamente) (Castillo, 2001).

5.1 TILAPIA ROJA

La tilapia roja es originaria de África y del Oriente Medio, es producto del cruce de cuatro especies (*Oreochromis mossambicus*, *O. niloticus*, *O. hornorum* y *O. aurea*) (Beveridge, 2001; citado por López *et al.*, 2007). Lo anterior ha permitido la obtención de un pez cuya coloración puede ir desde el rojo cereza hasta el albino, pudiéndose presentar manchas negras. La obtención del color rojo es importante para el mercado nacional, aunque el mercado internacional acepta cualquiera de los tonos, ya que recibe el filete limpio de piel (Agrocadenas, 2003; citado por López *et al.*, 2007). Uno de los inconvenientes para su producción, es sin duda su alta precocidad para la reproducción, ya que alcanza su madurez sexual durante la etapa de ceba, lo que afecta su óptimo crecimiento y genera superpoblación.

La tilapia roja, se convirtió en la punta de lanza para el desarrollo acelerado de la piscicultura comercial a partir de la década de los 80 en países sin tradición acuícola suramericanos como Colombia, en forma casi simultánea con países centroamericanos, caribeños y norteamericanos (Castillo, 2001), su atractiva coloración estimuló a los productores a iniciar un acelerado programa de hibridación que permitió la obtención de nuevas líneas de tilapia. La Figura 2 en la que se grafica la evolución de la producción nacional por especies piscícolas en toneladas; muestra que la producción de tilapia en Colombia se ha incrementado en un 29.43% durante los últimos años; según el Ministerio de Agricultura y desarrollo Rural, este aumento se debe al alto consumo de esta especie piscícola.



Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2007.

Figura 2. Evolución de la producción nacional por especies piscícolas en toneladas.

La piscicultura en Colombia reúne a múltiples agentes económicos partícipes en las diferentes actividades de la producción y comercialización de los bienes finales e intermedios de la cadena. Estas corresponden a: la producción de alevinos, las actividades de levante y engorde, el procesamiento o transformación de los peces, y los canales de comercialización (Espinal *et al.*, 2005).

5.1.1 La producción de alevinos: se divide en las fases de reproducción, larvicultura, y pre cría; mediante el desove en cautiverio, entre machos y hembras previamente seleccionados, se obtienen las ovas (huevos embrionados) que son posteriormente depositadas en incubadoras o estanques, donde se convierten en larvas. Dependiendo de la especie se efectúa un proceso de determinación del sexo. En el caso particular de la tilapia, se inicia un ciclo de 30 días, en el cual las larvas permanecen exclusivamente para suministro de hormonas para efectos de reversión sexual. Finalmente, los alevinos son trasladados a estanques de mayor tamaño, donde son cultivados hasta que éstos alcanzan un peso cercano a los 30 gramos. (Espinal *et al.*, 2005).

Se colecta el alevín, al que se le proporciona alimento hormonado, para desarrollar la masculinización, con dosis preestablecidas. Las crías pueden ser vendidas en esta fase que aproximadamente le dan una edad al pez de 30 días. Una condición primordial para el crecimiento de los peces, es la densidad por m³, se proponen 20 peces por m³ en un peso de 15 gramos para alcanzar un peso de 400 g en un periodo de 6 meses, por lo que es muy importante asegurar la talla inicial y el sexo, recomendando peces revertidos a machos para evitar por un lado, tallas menores en hembras y la consecuente sobrepoblación del estanque por desoves indeseados incrementando la demanda de oxígeno disuelto y alimento (COLPOS, 2007).

5.1.2 Levante: consiste en llevar los alevinos hasta un peso aproximado de 180 g; a partir de ese momento, el pez pasa a la etapa de engorde, donde es cultivado hasta llevarlo a un peso por encima de los 300 g. La duración de estas dos actividades por lo general es de 6 meses (Espinal *et al.*, 2005).

Para la etapa de pre-engorde los peces se encuentran en la etapa de juveniles a partir de los 10 hasta los 100 gramos de peso, en esta etapa se debe administrar alimento con 40 y 30% de proteína cruda, y la densidad de siembra es de 50 hasta 65 peces/ m³ (esto en el caso de tilapia roja); para la etapa de engorda, el peso es de 100 gramos en adelante hasta su cosecha.

La densidad de siembra va en relación al modelo tecnológico seleccionado en el cual diferentes aspectos (cantidad de agua administrada para el recambio del estanque, oxígeno disuelto en el agua, pH, etc.), influyen en el crecimiento de los

peces, la utilización del alimento natural disponible en el estanque y el tamaño final de la tilapia para la cosecha. Luego las crías pasan a sembrarse, la siembra debe ser sincronizada para tener producto de venta durante todo el año y mantener un mercado cautivo (COLPOS, 2007).

En Colombia no existe diferenciación entre las actividades de levante y engorde, las cuales son desarrolladas de manera secuencial por el piscicultor, tanto en sistema de estanques como en jaulas flotantes (Espinal *et al.*, 2005).

5.1.3 Procesamiento: se obtiene, principalmente, el producto entero y filetes congelados. Una pequeña proporción se comercializa vivo con fines de esparcimiento (pesca deportiva), o para reproducción (Espinal *et al.*, 2005).

5.1.4 Canales de comercialización: Los productos procesados o bienes finales son acopiados por agentes comercializadores, tales como las tiendas mayoristas, supermercados, restaurantes especializados, entre otros, quienes se encargan de su distribución para el consumo interno (Espinal *et al.*, 2005). La venta en vivo es actualmente una de las mejores opciones para comercializar producto de excelente calidad, este mercado puede ser a pie de granja o bien en centros de acopio especializados, asegurando el transporte tecnificado.

5.2 CLASIFICACIÓN DE LA ESPECIE

Clase: *Perciformes*
Suborden: *Percoides*
Familia: *Cichlidae*
Género: *Tilapia*

5.3 REPRODUCCIÓN

Las tilapias poseen un tipo de reproducción bisexual, o sea que los espermatozoides y los óvulos se desarrollan en individuos machos y hembras separados. Las glándulas sexuales llamadas gónadas, son los ovarios en las hembras y testículos en el macho; a diferencia de otros seres vivos que nacen con el sexo definido, en la tilapia dichas glándulas solo se empiezan a diferenciar en la etapa temprana (entre el día 15 al 20 después de que nacen) de su desarrollo (Eckstein y Spira, 1965; citado por COLPOS, 2007).

5.4 CALIDAD DEL AGUA PARA LA CRÍA DE TILAPIA

Según Colpos, los parámetros óptimos para la supervivencia de tilapias se basan en lo siguiente:

5.4.1 Temperatura: parámetro que se debe verificar en cualquier cuerpo de agua donde se quiera desarrollar el cultivo de peces. El rango óptimo de temperatura es de 28-32 °C; cuando esta disminuye a los 15 °C, los peces dejan de comer y cuando desciende a menos de 12 °C los peces no sobreviven mucho tiempo. Durante los meses fríos los peces dejan de crecer y el consumo de alimento disminuye, cuando se presentan cambios repentinos de 5 °C en la temperatura del agua, el pez se estresa y algunas veces muere. Cuando la temperatura es mayor a 30 °C los peces consumen más oxígeno.

5.4.2 Oxígeno: el O₂ disuelto en un cuerpo de agua es indispensable para la sobrevivencia de los organismos que allí se desarrollan. La concentración normal de oxígeno para una correcta producción, es la de 5 ppm ya que el metabolismo y el crecimiento disminuyen cuando los niveles son bajos o se mantienen por períodos prolongados.

5.4.3 pH: la tilapia crece mejor en aguas de pH neutro o levemente alcalino. Su crecimiento se reduce en aguas ácidas y toleran hasta un pH de 5. El alto valor de pH, de 10 durante las tardes, no las afecta y el límite, aparentemente, es el de pH 11, ya que a alto pH, el amonio se transforma en amoníaco tóxico. Este fenómeno puede manifestarse con pH situados también a valores de 8, 9 y 10.

5.4.4 Amoníaco: el amoníaco es más tóxico a altas temperaturas. La disminución del oxígeno disuelto también aumenta la toxicidad del amoníaco, disminuyendo el apetito y el crecimiento en los peces, a concentraciones tan bajas como 0,08 mg/L.

Un problema serio de la acuicultura es la contaminación que esta causa en los acuíferos ya que el vertimiento de nutrientes inorgánicos es muy alto particularmente nitrógeno y fósforo; el incremento sobre todo de las dosis altas, de fertilizantes, alimento, etc, aumentan los nutrientes en los estanques contribuyendo a la degradación ambiental, el crecimiento de algas, la toxicidad del amoníaco, que a su vez hace que el pez se enferme o se reduzca la producción (Ferdoushi *et al.*, 2008).

Al verter las aguas provenientes de la piscicultura a los mantos acuíferos, se pone en peligro la vida del ser humano y otros animales. Según Spellman (2002), existe

una bacteria, *Escheria coli*, que se encuentra en las excretas de los animales entre ellos los peces. Esta bacteria produce una poderosa toxina que puede causar una infección severa que podría ocurrir también al nadar en agua residual contaminada o al beberla (Nimukunda *et al.*, 2005).

5.5 PRINCIPALES CONTAMINANTES PRODUCIDOS POR LA EXPLOTACIÓN PECUARIA

El principal aporte de energía en la acuicultura intensiva es la alimentación de los peces, en la que parte es transformada en biomasa para peces y parte queda en el agua como sólidos orgánicos suspendidos, dióxido de carbono, amoníaco, fosfatos y otros compuestos (Boyd, 2003; True *et al.*, 2004; Baccarin y Camargo, 2005), esto puede resultar en una considerable entrada de materia en los ecosistemas acuáticos (Piedrahita, 2003; Stephens y Farris, 2004). De los aportes contaminantes provenientes del proceso piscícola, es importante mencionar, que el fósforo se considera el nutriente que limita la productividad de los cuerpos de agua costeros y terrestres (Stumm y Morgan, 1981; citado por Páez-Osuna, 1990).

5.6 CONTRIBUCIONES EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES PISCÍCOLAS

En el contexto piscícola se han desarrollado trabajos con el fin de tratar los vertimientos realizados por las piscifactorías; teniendo en cuenta que los efluentes provenientes de la acuicultura pueden aumentar la cantidad de sólidos en suspensión y promover el enriquecimiento de nitrógeno y fósforo en los ecosistemas acuáticos, en consecuencia, se ha tratado de utilizar métodos de tratamiento naturales para la remoción de dichos contaminantes como por ejemplo: evaluar la eficiencia de tres especies de macrófitas acuáticas flotantes (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* y *Salvinia molesta*) para el tratamiento de efluentes de la tilapia del Nilo (Gonzaga *et al.*, 2006).

Otras investigaciones se han realizado sobre el impacto ambiental de la producción de bagre de canal (*Ictalurus punctatus*) en el estado de Alabama, EE.UU., por ejemplo, que requiere el despliegue de prácticas y códigos de conducta - "Buenas Prácticas Administrativas (BMP-Código Mejores Prácticas de Gestión) - para reducir el volumen y mejorar la calidad de los efluentes de la producción de tanques, la mejora de la calidad de agua y la reducción de la carga de contaminación de las masas de agua naturales circundantes(Boyd, 2003).

Según Pardo y Suárez (2006) se plantean dos métodos para minimizar el impacto generado por los efluentes piscícolas; en donde el primero de ellos es una disminución de la cantidad de efluentes (Teichert, 1999; Boyd, 2003), el segundo

método consiste en mejorar la calidad del efluente antes de ser lanzado al ambiente. Las técnicas utilizadas van desde la sedimentación, remoción de sólidos hasta la filtración del efluente a través de mangles artificiales, plantas, algas, moluscos, éstos últimos métodos conocidos como biotransformación.

Las macrófitas acuáticas pueden ser una alternativa para la gestión de la piscicultura. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales, basados en plantas acuáticas son relativamente baratos de construir y operar, fáciles de mantener y proporcionar servicios eficaces y fiables tratamientos de aguas residuales (Farahbakhshazad *et al.*, 2000; Lin *et al.*, 2005; Greenway, 2005; Hadad *et al.*, 2006).

5.7 DEPURACIÓN DE AGUAS MEDIANTE SISTEMAS DE MACRÓFITAS

Los sistemas que utilizan macrófitas acuáticas se basan en un monocultivo o policultivo de plantas superiores (macrófitas) dispuestas en lagunas, tanques o canales poco profundos. Aunque realizan normalmente tratamientos terciarios del agua que reciben, pueden incluso llegar a realizar tratamientos secundarios. Las propias plantas suministran el oxígeno al proceso de depuración que se realiza en el sistema radicular. Las plantas degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los contaminantes, pero también proporcionan una extensa superficie donde se posibilita el crecimiento bacteriano y se filtran los elementos sólidos en suspensión. Los diferentes sistemas de depuración que utilizan macrófitas acuáticas se clasifican en:

5.7.1 Sistema de macrófitas emergentes de flujo superficial

Este sistema y el siguiente utilizan plantas enraizadas y tolerantes al encharcamiento. Suelen ser vivaces y sus hojas se secan en invierno, rebrotando en primavera a partir de rizomas, como los carrizos (*Phragmites sp.*), juncos (*Scirpus sp.*) o eneas (*Typha sp.*) En los sistemas de flujo superficial la eliminación de contaminantes se produce por reacciones que tienen lugar en el agua y en la zona superior de contacto, ya que por las raíces circula una escasa cantidad de agua residual, por lo que su potencial de depuración es muy restringido.

5.7.2 Sistema de macrófitas emergentes de flujo sub superficial

Similar al anterior, utiliza una capa de grava o de suelo por donde circula el agua por gravedad. Se obliga a pasar toda el agua residual por las raíces, lo que incrementa enormemente el rendimiento depurativo. Su mayor inconveniente es la rápida colmatación del terreno con el paso de los años, ya sea por las propias

raíces y rizomas o por los sólidos sedimentados. Eliminar los contaminantes significa entonces destruir el sistema.

5.7.3 Sistema de macrófitas flotantes

Utilizan especies que son flotantes de forma natural, como las lentejas de agua (*Lemna*, *Wolffia*, *Spirodella*) el helecho (*Azolla* sp.), el jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), o los nenúfares (*Victoria regia*). Estos sistemas tienen la ventaja de que el contacto entre las raíces y el agua residual es total y presenta una gran superficie. Sin embargo, estas especies no alcanzan un gran tamaño y su producción de biomasa es limitada, lo cual reduce su valor depurativo absoluto, aunque absorben grandes cantidades de nitrógeno y fósforo. Sin embargo, son muy efectivos cuando las concentraciones de materia orgánica y de sólidos disueltos son bajas (Layman, 2005).

Los sistemas de tratamiento acuáticos son una variante adecuada para la depuración de estas aguas (Tchobanoglous, 1987; Rodríguez *et al.*, 1992; citado por Rodríguez; 2001). En ellos las plantas acuáticas funcionan como filtros biológicos removiendo sustancias tanto biodegradables como no biodegradables, nutrientes, sustancias tóxicas y microorganismos patógenos (Rodríguez *et al.*, 2001).

5.8 LAS PLANTAS ACUÁTICAS

Son plantas que viven flotando en el agua. Su papel es la absorción de los nutrientes, aparte de descontaminar el agua, son alimento para los animales. Algunas plantas acuáticas de mayor importancia son: lirio acuático o jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), lechuga de agua o lechuguilla (*Pistia stratiotes*), azolla (*Azolla microphylla*), espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) y oreja de ratón (*Salvinia minima*).

5.9 AZOLLA (AZOLLA MICROPHYLLA L.)

Azolla microphylla es una planta acuática flotante de la familia *Azollaceae*. La planta tiene 1 a 5 cm de tamaño. Se reproduce tanto de forma vegetativa como sexual (Van Hove and Lejeune 2002; citado por Nimukunda *et al.*, 2005).

Azolla es un helecho acuático con pequeñas hojas alternas, que vive en simbiosis con cianobacterias, las cuales fijan el nitrógeno atmosférico y poseen generalmente una alta concentración de nutrientes, este puede ser usado con alta eficacia para abastecer de nutrientes a los cultivos y mejorar los sustratos

(Castro *et al.*, 2006). Esta puede fijar de 100 a 1564 kg de N₂/ha-año (Quintero-Lizaola y Ferrera-Cerrato, 2000; citado por Castro *et al.*, 2008).

La planta ha sido empleada en la limpieza de acuíferos por su habilidad de fijar N₂ y remover P de los ecosistemas (Shiomi y Kitoh, 1987; citado por Castro *et al.*, 2008). También se utiliza como biofiltro de elementos tóxicos en sistemas con agua circulante. Su uso potencial en bioremediación se basa en sus estrategias de sobrevivencia y proliferación en acuíferos contaminados (Uheda *et al.*, 1995; citado por Castro *et al.*, 2008). Ladha y Reddy (2003) (citados por Castro *et al.*, 2008) mencionan que *Azolla* puede ser usado como purificador de agua y su aplicación biotecnológica requiere de selección de biotipos y desarrollo y mejoramiento de híbridos.

Azolla es un género de pequeños helechos acuáticos cuyos individuos son capaces de asociarse simbióticamente con el alga verde-azul fijadora de nitrógeno *Anabaena azollae*. Este género tiene un amplio intervalo altitudinal de distribución desde el nivel del mar hasta 5.000 m de altitud. En general, *Azolla* prefiere condiciones frías y semisombreadas y se desarrolla mejor en contenidos altos de fósforo, tanto en el agua como en el suelo.

Existen siete especies de *Azolla* ampliamente distribuidas a nivel mundial. Esta distribución ha sido fuertemente influenciada por el hombre, debido a la introducción indiscriminada del helecho de un área a otra. Previo a la dispersión humana, *A. caroliniana* fue reportada en América del Norte y el Caribe; *A. filiculoides* en Sur América y oeste mediterráneo, incluyendo a Alaska; *A. microphylla* en América tropical y subtropical; *A. mexicana* en el norte de Sur América y oeste de Norte América; *A. nilotica* desde el Nilo hasta Sudan; *A. pinnata* en Asia y costas de África Tropical; *A. japónica* en Japón (Espinoza *et al.*, 2006).

De acuerdo a Becking (1986) (citado por Espinoza *et al.*, 2006) la fijación de nitrógeno de la simbiosis varía con el tipo de especie de *Azolla*. Sin embargo, Reynaud (1985) y Watanabe *et al.* (1983) (citados por Espinoza *et al.*, 2006) encontraron que los factores ambientales ejercen gran influencia sobre esta capacidad y la de producción de grandes cantidades de biomasa. Tanto la fijación de nitrógeno como la alta tasa de crecimiento le permitieron producir en poco tiempo gran cantidad de biomasa rica en nitrógeno. Esta propiedad ha motivado su estudio como biofertilizante para cultivos desarrollados en condiciones de inundación. El FONAIAP inició en 1991 un proyecto de investigación para evaluar la potencialidad de la asociación *Azolla-Anabaena* como biofertilizante para

arrozales, para lo cual se planteó la necesidad de recolectar y desarrollar un banco de germoplasma de las especies de *Azolla* (Espinoza et al., 2006).

5.9.1 *Azolla Pinnata*

Proviene de la familia Salviniaceae, y es conocida comúnmente como helecho del mosquito; es un helecho de agua libre-flotante con aproximadamente 0.8-2.5 centímetros de largo, con hojas con muy pequeñas lobadas de color verde o rojo, dando a menudo la apariencia rojiza a la superficie de agua. El tallo principal con las ramas de *pinnate*; las más largas hacia la base que da una forma triangular a la planta. Produce varones y esporas hembras (Arora, 2002).

Según Arora y Singh (2002) la especie *Azolla Pinnata* tiene la tasa de crecimiento relativo más baja en comparación con la actividad nitrogenasea de otras especies, pero en condiciones adecuadas puede llegar a tener una alta producción como afirman Massod *et al.*, (2005) quienes aseveran que *Azolla* posee una distribución mundial y se produce bien en hábitats de agua dulce de las regiones templadas, tropicales, subtropicales y cálidas; además la especie *Azolla* es un cultivo simple y barato, que crece en todos los ambientes acuáticos de las aguas residuales contaminadas ya que posee capacidad de concentración de nutrientes (Arora y Saxena, 2005).

Distribución: esta planta es nativa de África tropical, África Sur, India, China, Japón, Malasia, Filipinas, Vietnam, Nueva Guinea, Australia; aunque también se encuentra en Bangladesh, Pakistán, Sri Lanka, Corea, el Sudeste Asia y Nueva Zelanda (Arora, 2002).

Hábitat: subtropical y tropical; presente en lagos, en arroyos y ríos lentos, pantanos, estanques, y se pueden incorporar en wetlands (Arora, 2002).

La planta *Azolla Pinnata* se ha usado durante siglos en el Sudeste Asia como un fertilizante en la producción de arroz. Los beneficios para el arroz se basan en la relación de la simbiosis con la cianobacteria *azollae* de *Anabaena* que compone el nitrógeno y que crece en una cavidad del lóbulo dorsal de las hojas del helecho por esta razón se ha usado para mejorar fertilidad de la tierra y la producción de arroz (Wagner, 1997; citado por Zhang *et al.*, 2008). Se conoce que *Azolla* tiene una capacidad alta para acumular metales pesados como Cd, Cr, Cu, Ni y Zn (Sela, 1989; citado por Zhang *et al.*, 2008), y puede usarse para quitar los metales pesados del agua residual (Bennicelli *et al.*, 2004; Arora, 2005; Rakhshae *et al.*, 2006; citados por Zhang *et al.*, 2008); sin embargo, la habilidad de *Azolla* de aumentar estos en el agua no se ha evaluado en detalle.

La información disponible que se tiene de esta planta es muy limitada, no se conocen detalles de su acumulación, tolerancia y de los mecanismos que se desarrollan en ella, así como la comparación entre diferentes especies. Lo que se puede encontrar es básicamente su utilización eficaz en sistemas de riego para cultivos de arroz donde actúa como biofertilizante (Zhang *et al.*, 2008).

La planta *Azolla Anabaena* es importante desde el punto de vista de la agronomía ya que es usada en cosechas por su habilidad de fijar el nitrógeno atmosférico en proporciones altas así como los beneficios que posee por sus bajos costos, la habilidad de adaptarse y desarrollarse en una forma global en habitats templados tropicales, subtropicales y calientes. Sin embargo, la salinidad es una amenaza seria para la agricultura en general, aproximadamente 100 millones de hectáreas de la taza mundial de tierra han sido afectadas por esta (Ghassemi *et al.*, 1995; citados por Masood *et al.*, 2005).

5.9.1.1 Factores que afectan el desarrollo de *Azolla*

Temperatura: la óptima se encuentra alrededor de los 25 °C para *A filiculloides*, *A Microphylla* y *A Pinnata*. Por encima de 30-33 ° C o por debajo de 10 ° C, el crecimiento es retrasado. *Azolla* puede tolerar (sobrevivir) hasta -5 °C (Watanabe, 2005).

Luz: en ambientes deficientes de nutrientes y condiciones de luz fuerte, *Azolla* se cambia a un tono rojo. Durante el verano o el frío de invierno, también se convierte en rojo o rojo parduzco. En virtud de las condiciones de sombra o en condiciones ricas en nutrientes, sigue siendo verde.

Nutrición mineral: *Anabaena-Azolla* absorbe los nutrientes del agua, cuando está flotando en ella. Debido a la difusión de fósforo del suelo al agua que es lento, el campo de la población flotante *Azolla* es generalmente deficientes en fósforo. La aplicación de fertilizantes de fósforo es eficaz para mejorar su crecimiento. El efecto de la deficiencia de P y Ca en el crecimiento y fijación del N es más intenso que la deficiencia de K y el Mg (Tandon y Roy; 2004)

pH: *Azolla* prefiere medios ligeramente ácidos hasta pH 4. Un pH de 5-8 resulta óptimo, aunque esta puede sobrevivir en un rango de pH de 3.5 - 10.0. El efecto del pH está relacionado con su impacto sobre la disponibilidad de nutrientes. (Tandon y Roy, 2004)

Daños por insectos: *Lepidoptera*, *Pyralidae* son la mayoría de las plagas de insectos nocivos que atacan *Azolla*. En los trópicos, *Webworm-Elophyla* y el

gusano - *Epheosispsis* son las principales plagas que atacan a la planta. A mayor temperatura (30°C), el daño puede ser grave, debido a que la velocidad de crecimiento de las larvas se aumenta poniendo en peligro la estructura de *Azolla* (Watanabe, 2005).

Las concentraciones de sal exógenas altas: causan un desequilibrio de los iones celulares que producen toxicidad (Cheeseman, 1988; Navari-Izzo *et al.*, 1988; Cramer *et al.*, 1994; citados por Masood *et al.*, 2005). Sin embargo, las plantas desarrollan las estrategias de defensa contra la tensión de sal (Dionisio-Sese y Toba, 1998; citados por Masood *et al.*, 2005). La salinidad es uno de los factores que afecta el desarrollo de *Azolla*. Este campo aún no se ha explorado totalmente, por lo tanto no se puede inferir la adaptabilidad y tolerancia de la planta en diferentes medios (Masood *et al.*, 2005).

5.10 BENEFICIOS AMBIENTALES DE LA APLICACIÓN DE LOS FILTROS DE MACRÓFITAS EN FLOTACIÓN PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.

Según el informe Layman (2005) en el cual se realizó un estudio de nuevos filtros verdes con macrófitas en flotación; se considero que *Azolla* puede ser utilizada como biofiltro sin tener efectos nocivos para el ambiente donde estas macrófitas se desarrollan; también en otro informe y según la Environmental Protection Agency (EPA, 2000), la implementación de macrófitas acuáticas como sistemas de descontaminación de aguas residuales también pueden tener beneficios positivos para el medio ambiente. Estos beneficios se traducen en mejoras tanto para el medio ambiente como para las comunidades o empresas que hacen uso de este tipo de tecnologías limpias; avances positivos como: bajos costos, facilidad de mantenimiento y operación entre otros.

Estos sistemas de macrófitas son de fácil operación y mantenimiento; debido a su naturaleza; además no se requiere de equipos mecánicos; como resultado su operación es en su mayoría pasiva y demanda poca intervención del operador. La operación consiste en procedimientos simples similares a los requeridos para el funcionamiento de lagunas. Por ejemplo mantenimiento de la uniformidad del flujo, gestión de la vegetación, control de plagas y los insectos entre otros. En cuanto a economía la EPA (2000) apunta a que estas tecnologías se caracterizan por ser de bajo costo ya que son fácilmente operables, debido a que el funcionamiento del sistema es posible de efectuarse con mano de obra disponible a nivel local y no se requiere de personal altamente calificado.

Otro aspecto importante para tener en cuenta es que este tipo de sistemas naturales no requiere de inversión en compra de equipos de alto costo para su funcionamiento y mantenimiento, lo que involucra un mínimo de consumo a nivel energético; además que estos sistemas con macrófitas son fáciles de implementar ya que implican principalmente movimiento de tierras, excavaciones y rellenos; por lo que la mayoría de los equipos y procedimientos son los mismos que los empleados para la construcción de lagunas simples. También factores ambientales como el nivel de ruido se reduce debido a que no se tienen equipos mecánicos durante la etapa de operación del sistema que generen perturbaciones, así como también bajo impacto visual ya que la vegetación proporciona apariencias de ambientes naturales (Fernández *et al.*, 2004)

En el caso de sistemas naturales con lagunas de *Azolla* existe la facilidad de cosechar las macrofitas que se encuentran en flotación, ya sea por medios manuales o de control biológico; esto implica que el sistema no se destruirá como en otros casos de sistemas naturales con macrófitas enraizadas. También hay que resaltar la capacidad que tienen las macrófitas acuáticas de suministrar el oxígeno al proceso de depuración desarrollando mecanismos adaptativos a las condiciones del medio; estos procesos se realizan generalmente en el sistema radicular (Layman, 2005), lo que crea un microambiente aerobio en el agua próxima a estas raíces y que autoregula estos sistemas naturales.

6. METODOLOGÍA

6.1 ÁREA DE ESTUDIO

La Figura 3 muestra la ubicación de la estación piscícola La Yunga; sitio donde se realizó el estudio y que se encuentra localizado en el corregimiento de La Yunga situado al noroccidente de Popayán Departamento del Cauca (Colombia). La piscifactoría cuenta con 8 estanques adaptados para el levante y engorde de tilapia roja con fines comerciales y su producción es de 4 toneladas en cada cosecha.

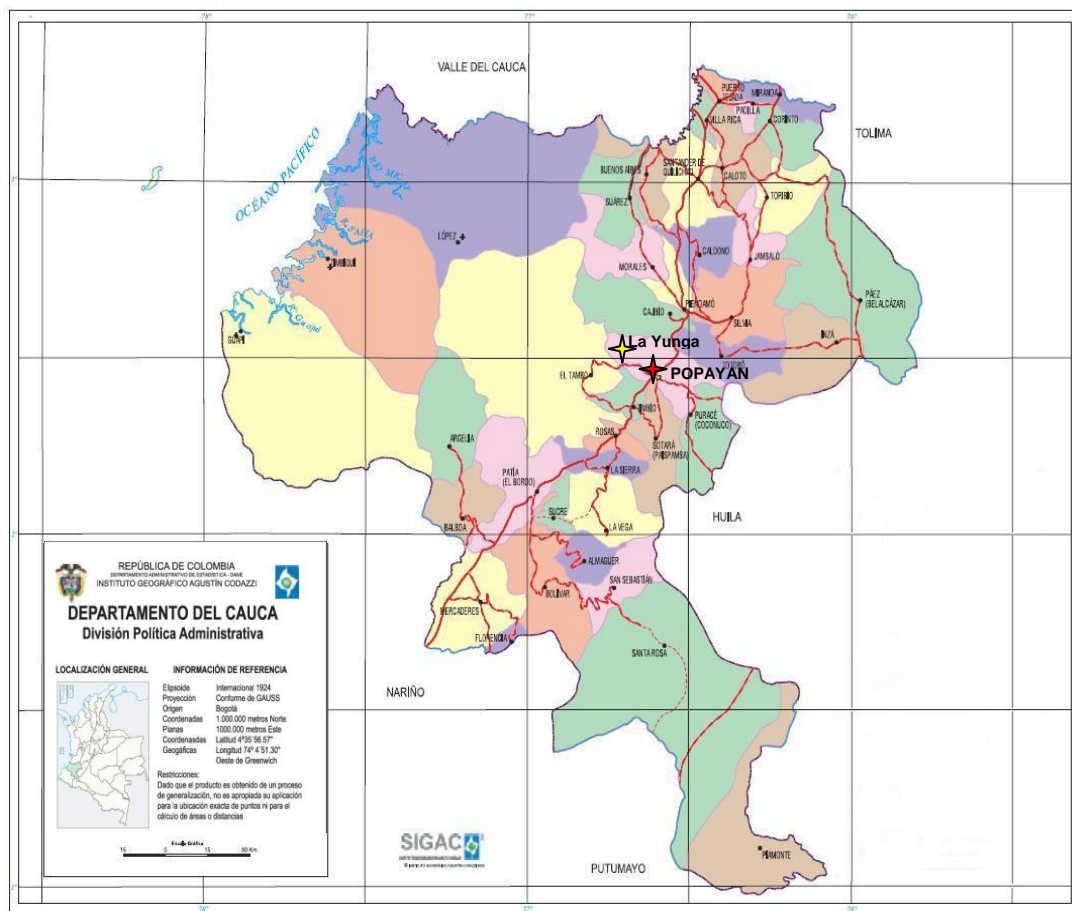


Figura 3. Ubicación estación piscícola" la Yunga". Departamento del Cauca Colombia. Adaptado de POT 2002-2012.

6.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE

Para realizar la caracterización del efluente del estanque piscícola fue indispensable obtener una muestra en la salida de cada uno de los 5 tanques de la planta piloto, para lo cual se tomaron solo 10 muestreos debido a que este efluente ya había sido caracterizado por Bazan y Alomía (2009) en el estudio comparativo de tratabilidad de efluentes piscícolas mediante lagunas duckweed en la misma estación piscícola notando un comportamiento similar a este estudio. Para realizar estos procedimientos se utilizaron 6 recipientes plásticos de 2 litros debidamente marcados. Al momento de tomar la muestra se desconectó la tubería en la unión universal adaptada en cada salida de los tanques y posteriormente se procedió a obtener la muestra en los puntos de toma de muestras indicados en la Figura 4; finalmente preservó la temperatura de la muestras para no afectarlas y se trajeron al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca.

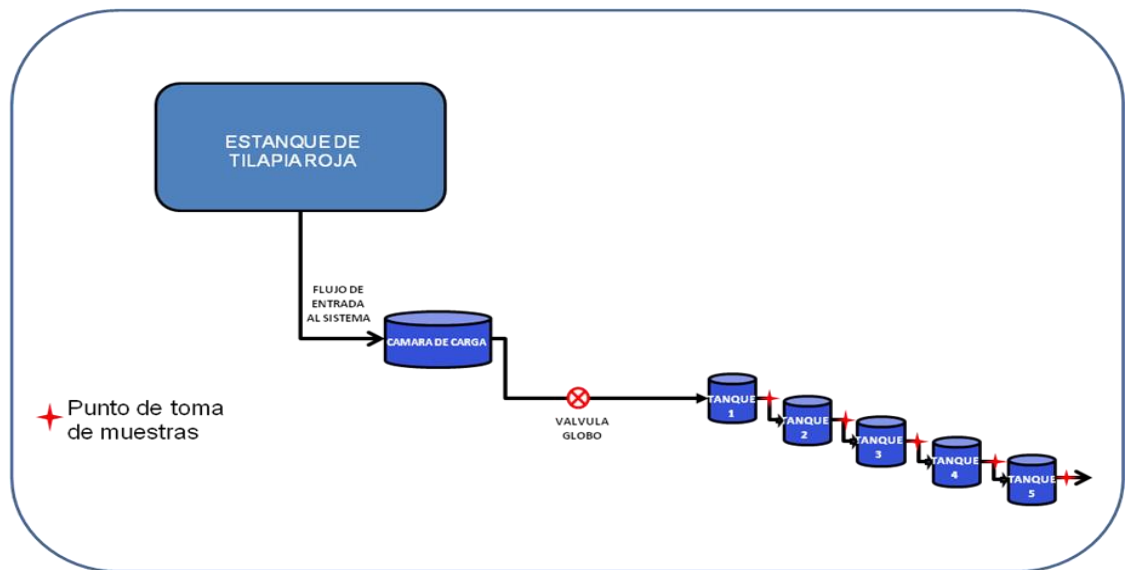


Figura 4. Planta piloto (estación piscícola " La Yunga")

Otro factor que se tuvo en cuenta para la investigación fue el tiempo de retención manejado; el cual se estableció en un día por laguna. Esto se logra por medio de dos procedimientos: el primero consistió en la adecuación de una cámara de carga que tuvo como propósito mantener el nivel constante del agua que entra al sistema y así garantizar caudales uniformes; en segunda instancia y con el objetivo de minimizar errores se reguló el caudal del flujo de entrada a la planta piloto por medio de una válvula tipo globo; además los caudales fueron

determinados diariamente por la persona encargada de la piscícola; para este procedimiento se utilizó un método volumétrico.

Para el desarrollo del estudio fue necesario realizar 2 visitas semanales a la planta piloto durante un periodo de 3 meses. En la Tabla 1 se muestran los parámetros que se tuvieron en cuenta para la caracterización del efluente, los cuales se dividieron en dos fases: Parámetros In situ y parámetros Ex situ; para estos últimos fue necesario transportar las muestras hasta el laboratorio donde se analizaron utilizando la metodología consignada en el Standar Methods. (1998)

Tabla 1. Parámetros para la caracterización del efluente.

Parámetro		Nº de Análisis	Método Estándar	Equipo
In situ	Temperatura	24	2550	Sonda multiparámetro
	Oxígeno disuelto	24	4500-O-G	Sonda multiparámetro
	pH	24	4500-H+B	Sonda multiparámetro
	Conductividad eléctrica	24	2510 B	Sonda multiparámetro
	Sólidos suspendidos	24	2540D	Standard Methods- Filtro whatman 934-AH Espectrofotómetro Nova 60 Merck
Ex situ	DBO ₅	24	5210-B	Standard Methods- Volumétrico
	DQO	24	5220-D	Standard Methods- Colorimétrico
	Nitrógeno amoniacal	24	4500- NH ₃ B	Unidad de destilación automática UDK 142 Velp Scientifica
	Nitrógeno total	24	4500 Norg B	Digestor DK6 Velp Scientifica Unidad de destilación Automática UDK 142 Velp Scientifica
	Fósforo	24	4500-P-H	Standard Methods- Cloruro estañoso

Fuente: Standard Methods for the examination of Water and wastewater 20Th Edition.

Con el fin de evaluar la tasa de crecimiento de *Azolla A. Pinnata* fue necesario realizar siembra y cosecha de *Azolla* cada 7 días durante el periodo de muestreo, dejando un peso aproximado de 430.6 g los cuales representan una cobertura del 70% de la superficie de cada tanque. Posteriormente para encontrar la tasa de crecimiento fue necesario eliminar una alta cantidad de humedad de las macrófitas dejándolas por fuera del medio acuático por un periodo de 10 minutos; para extraer las macrófitas de los tanques se utilizó un colador de plástico. Después de retirar humedad por 10 minutos se procedió a su respectivo pesaje para finalmente dejar el peso establecido inicialmente (430.6g) para el tratamiento. La producción de biomasa fresca se valoró mediante la diferencia de pesos obtenidos dividida entre el tiempo de crecimiento y el área de cada estanque. La expresión de cálculo utilizada fue la siguiente:

$$TC = \frac{Df - Di}{t}$$

TC= Producción de biomasa fresca (*Azolla*) (g/m²d)

Df= densidad final de *Azolla* fresca (g/m²).

Di= densidad inicial de *Azolla* fresca (g/m²)

t= periodo de cosecha (d)

La Tasa relativa de crecimiento (TRC) de *Azolla* y su tiempo de duplicación (TD) se hallaron mediante las siguientes expresiones

$$TRC = \frac{\ln w_2 - \ln w_1}{t}$$

TRC= Tasa relativa de crecimiento (d⁻¹)

w1= Peso húmedo inicial (g)

w2= Peso húmedo final (g)

t = Periodo de cosecha (d)

$$TD = \frac{\ln 2t}{\ln \frac{p_2}{p_1}}$$

TD= Tiempo de duplicación (d)

p1= Peso seco inicial (g)

p2= Peso seco final (g)

t = Periodo de observaciones en días (7).

Para el cálculo del peso seco se utilizó información secundaria proveniente del proyecto de desarrollo y adaptación de tecnología para el tratamiento de efluentes piscícolas— que fue adelantado por la Universidad del Cauca y el Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca (CREPIC); durante el cual se procesaron 10 muestras de *Azolla* y se secaron a una temperatura de 105°C durante 24 horas, obteniendo un promedio en términos de materia seca equivalente al 3.6% del peso húmedo, sin variaciones significativas entre las muestras (Chaux, 2009).

Finalmente para realizar comparaciones entre datos de cada uno de los parámetros fisicoquímicos analizados, se aplicaron las pruebas estadísticas paramétricas de Tukey y pruebas no paramétricas post hoc (Kruskal- Wallis). Estas se realizaron con el programa SPSS versión 11.5 para Windows. Se consideró que hubo diferencias significativas entre los datos cuando la probabilidad de exceder el estadígrafo de Tukey o de Kruskal- Wallis fuera menor del 5% ($p < 0.05$).

7. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

7.1 CARACTERIZACION DEL EFLUENTE

La caracterización del efluente de la estación piscícola "la Yunga" se realizó en las etapas de funcionamiento normal y eventos de cosecha teniendo en cuenta los puntos de muestreo y las características de entrada a la planta piloto; los resultados se muestran en la Tabla 2. (Parámetros del efluente en la estación piscícola "La Yunga", evento de cosecha) y la Tabla 3. (Parámetros del efluente en la estación piscícola "La Yunga", operación normal).

Tabla 2. Parámetros del efluente en la estación piscícola "La Yunga", evento de cosecha.

Tanque	O.D mg/L	pH unid	COND μS/cm	T °C	SST mg/L	PT mg/L	PO4 mg/L	NT mg/L	NH ₃ -N mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L
0*	2.0	7.9	25.4	21.8	152	0.525	1.610	10.89	4.75	16.93	442
1	2.2	7.86	25.9	21.0	143.2	0.202	0.620	10.84	4.44	15.92	366
2	1.8	7.58	25.3	20.8	70.8	0.183	0.562	5.42	3.94	15.21	314
3	1.8	6.59	24.8	20.7	82.2	0.184	0.564	3.45	2.96	10.93	306
4	1.8	7.35	25.1	20.8	71.0	0.135	0.413	4.93	3.45	10.34	310
5	2.0	6.82	25.8	20.9	54.2	0.158	0.485	5.91	0.99	9.39	316

* pertenece a las características del efluente de entrada a la planta piloto

Tabla 3. Parámetros del efluente en la estación piscícola "La Yunga", operación normal

TANQUE	ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS	O.D (mg/L)	pH (unid)	COND (μS/cm)	T (° C)	SST (mg/L)	PT (mg/L)	PO ₄ (mg/L)	NT (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	TC
0*	Promedio	4,18	6,53	38,31	21,96	119,9	0,143	0,4381	4,18	0,788	16,341	142,9	0
	Máximo	5,9	7,6	59,3	23	193	0,244	0,748	7,39	1,48	35,41	406	0
	Mínimo	2,8	5,4	12,4	21	73,6	0,061	0,186	0,49	0,49	3,54	39	0
1	Promedio	2,42	6,60	38,08	21,17	85,73	0,12	0,36	5,16	2,38	10,40	68,47	80,04
	Máximo	6,2	7,9	58,8	24,8	172,3	0,296	0,906	21,5	14,29	25,02	202	229,7
	Mínimo	0,7	4,8	19,5	17,7	23	0,044	0,133	0,45	0	3,71	8	21,3
2	Promedio	2,11	6,50	35,72	20,97	64,83	0,09	0,28	4,59	2,78	9,35	67,00	100,69
	Máximo	6	10	57,9	23,9	176,7	0,234	0,717	9,36	6,9	24,5	146	268,9
	Mínimo	0,5	4,8	19,6	18,6	9,4	0,021	0,063	0,9	0,9	1,49	22	0
3	Promedio	2,32	6,21	34,82	20,97	56,92	0,08	0,26	4,95	2,29	7,52	60,74	43,68
	Máximo	5,2	7,2	56,8	24,1	136,8	0,216	0,663	12,99	5,91	22,8	162	146,2
	Mínimo	0,4	4,8	18,5	18,8	3,8	0,029	0,088	0,99	0,45	0,74	14	0
4	Promedio	2,65	6,39	33,53	21,05	54,14	0,08	0,25	4,82	2,46	7,28	50,21	52,03
	Máximo	4,9	7,4	54,6	24,1	152,8	0,218	0,67	11,65	4,93	23,76	178	137
	Mínimo	0,4	4,9	18	18,9	15,4	0,001	0,003	0,9	0,45	0,3	12	0
5	Promedio	3,05	6,19	32,12	20,98	44,13	0,07	0,20	4,73	2,40	6,95	56,21	42,69
	Máximo	5,8	7,1	53,7	23,9	128,7	0,215	0,659	16,13	7,62	23,61	132	78,1
	Mínimo	1,2	4,9	16,2	18,8	4,5	0	0,001	0,49	0,49	0,15	4	0

* pertenece a las características del efluente de entrada a la planta piloto.

7.2 TEMPERATURA

La temperatura en los cinco tanques de la planta piloto presentó variaciones durante el periodo muestreo en el cual se registraron valores entre 17.7 y 24.8 °C, esto se puede apreciar en la Figura 5; sin embargo estos rangos de temperatura no fueron influyentes significativamente entre los diferentes tanques ($P > 0.05$ ver anexo M).

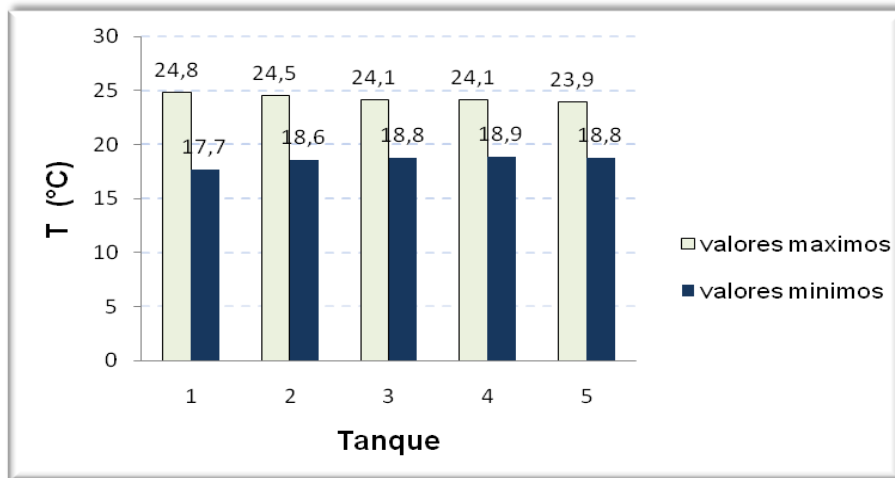


Figura 5. Valores máximos y mínimos de temperatura en cada tanque

Cary y Weerts (1992) estudiaron el comportamiento de *Azolla* en ambientes acuáticos demostrando que esta macrófita se desarrolla satisfactoriamente en este medio cuando se tienen temperaturas que se encuentran entre 20 y 25°C; para el caso del estudio de *Azolla* con lagunas en serie para efluentes provenientes de procesos piscícolas, la temperatura media registrada en el sistema $21,1^{\circ}\text{C} \pm 1,285$ se encuentra dentro del rango establecido de lo que se puede deducir que el comportamiento de este parámetro fue favorable durante el periodo de muestreo.

Debido a la alta densidad de *Azolla* que se encontraba cubriendo la superficie de los tanques, se limitó la penetración de la luz, afectando así la temperatura del sistema de lagunas en serie con *Azolla*.

7.3 POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH).

El pH a través de los tanques de la planta piloto no cambió significativamente y tuvo una tendencia decreciente como se puede observar en la Figura 6. El valor promedio obtenido fue de $6.39 \pm 0,75$ unidades de tal modo que este efluente no causará impactos negativos sobre un cuerpo de agua receptor; debido a que este valor se encuentra dentro del rango permitido por la normatividad colombiana como lo indica el artículo 72 del decreto 1594 de 1984 el cual especifica que todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, por lo menos, con un rango en cuanto a potencial de hidrógeno de 5 a 9 unidades.

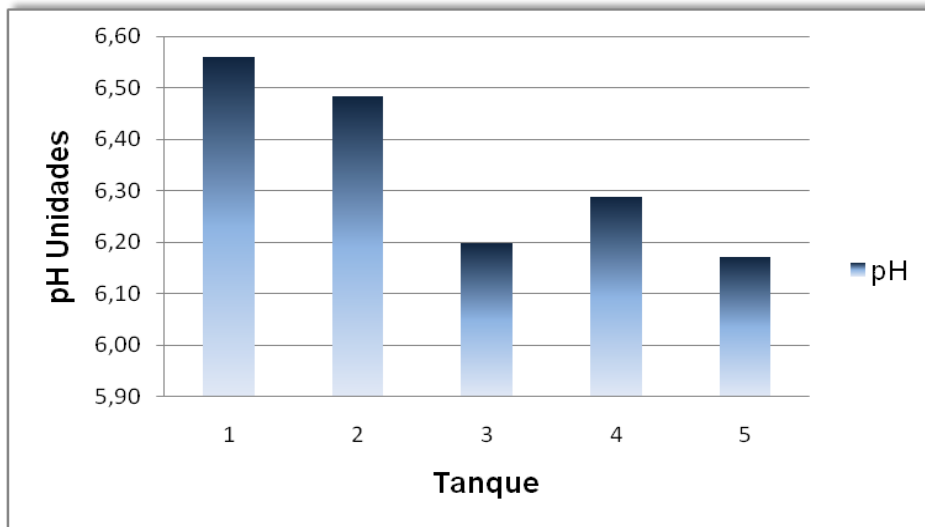


Figura 6. Potencial de Hidrógeno promedio en cada tanque.

El comportamiento de pH durante el periodo de muestreo varió de tal forma que se encontraron valores mínimos de 4.8 unidades; estas reducciones del pH en el período de muestreo se debieron posiblemente al aumento de materia orgánica en forma de hojas y raíces de *Azolla* muertas (Da Silva, 2006).

Si se considera la posibilidad de recircular el efluente del sistema para la cría de tilapia, debe tenerse presente que esta especie crece mejor en aguas de pH neutro o levemente alcalino. Su crecimiento se reduce en aguas ácidas y toleran hasta un pH de 5. El alto valor de pH, de 10 durante las tardes, no las afecta y el límite, aparentemente, es el de pH 11, ya que a alto pH, el amonio se transforma en amoníaco tóxico. Este fenómeno puede manifestarse con pH situados también a valores de 8, 9 y 10. (COLPOS, 2007); pero debido a los rangos bajos (4.8 unidades) de pH registrados durante el muestreo, se encontró que este parámetro

no cumple con las condiciones adecuadas para el levante y engorde de este tipo de pez. Finalmente es de gran importancia mencionar que el sistema de lagunas de *Azolla* baja gradual y levemente el pH apreciándose este comportamiento en la Figura 6 ,fenómeno que pudo estar influenciado por el aumento de materia orgánica ocasionada por la degradación de *Azolla* (Da Silva, 2006).

7.4 OXÍGENO DISUELTO (O.D)

El oxígeno disuelto promedio fue de 2,64 mg/L en época normal y de 1.92 mg/L en evento de cosecha. Las diferencias entre los dos no son significativas como se puede observar en la Figura 7. Según los parámetros normales para el manejo de la tilapia, el oxígeno no debe estar con valores inferiores a 5 mg/L (Martínez, 2008) Por lo que se puede inferir que si se quisiera realizar un cultivo de tilapia roja solo con este efluente; no se cumpliría con los valores óptimos para el desarrollo de este tipo de prácticas, finalmente es de gran importancia señalar que a menor concentración de oxígeno el consumo de alimento se reduce y por consiguiente el crecimiento de los peces.

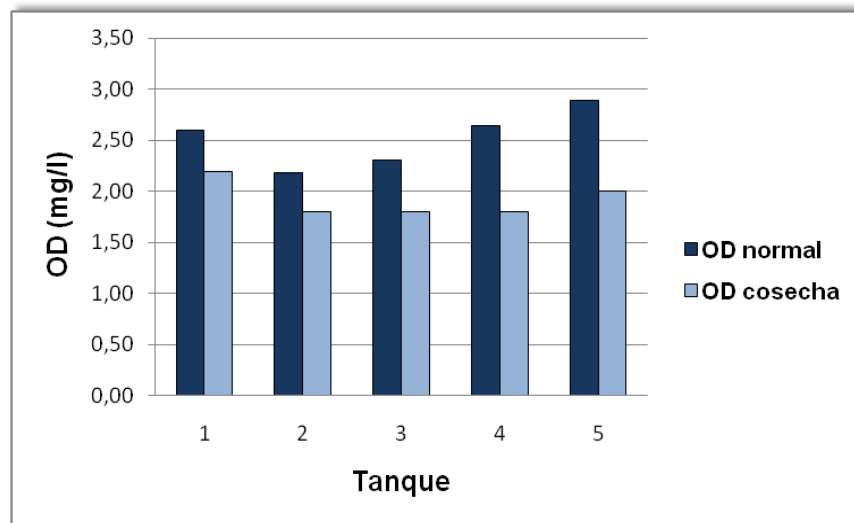


Figura 7. Promedios oxígeno disuelto en operación normal y cosecha

Las concentraciones de oxígeno también pueden variar de acuerdo al comportamiento de *Azolla* ya que esta evita el paso de iluminación solar directa y en consecuencia dificulta la fotosíntesis la cual está estrechamente relacionada con la producción de oxígeno (Martínez, 2008).

La temperatura ambiente en la estación piscícola La Yunga es en promedio 24°C, influyendo en la descomposición de la materia orgánica que en su degradación consume oxígeno esto puede ser corroborado por Martínez (2008) quien en su trabajo denominado parámetros importantes a controlar en un sistema de cultivo de peces afirma que a mayor temperatura del agua más rápido es el proceso de degradación de materia orgánica. La oxigenación del agua está en estrecha relación con la temperatura, pues el agua más fría puede guardar más oxígeno en ella que el agua más caliente. Por otra parte Saavedra (2006) en su artículo sobre el manejo del cultivo de la tilapia afirma que el contenido de oxígeno puede disminuir si la cantidad de materia orgánica y vegetación acuática son abundantes, como sucede en esta investigación. Otro factor a tener en cuenta y que posiblemente afectó el contenido del oxígeno disuelto podría ser la cantidad de fitoplancton la cual libera este componente durante el día y lo consume durante la noche (Martínez, 2008).

Según el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS (2000) en el título E, donde se refiere al tratamiento de aguas residuales, la concentración de oxígeno disuelto no debe ser menor de 1.0 mg/L, incluso en plantas de tratamiento de aguas residuales grandes con una buena operación. Si el contenido mínimo de oxígeno baja de este valor, pueden esperarse trastornos en el proceso de degradación biológica, en el caso de la investigación presente con *Azolla* se presentó un mínimo promedio del valor de oxígeno disuelto entre tanques de 0.52 mg/L, incumpliendo lo estipulado en esta norma.

También cabe resaltar que la tilapia es capaz de sobrevivir a niveles bajos oxígeno disuelto 1.0 mg/L (Martínez, 2008); pero el comportamiento de estos peces cuando el oxígeno es bajo genera condiciones de stress causando de una alta tasa de mortalidad en esta especie. Finalmente el efluente del sistema de tratamiento podría ser reutilizado para el cultivo de la tilapia si se combinara con un medio acuático que ayude a proporcionar las condiciones óptimas de oxígeno disuelto para la realización del proceso acuícola.

7.5 FÓSFORO TOTAL (PT)

Durante el periodo de muestreo en época de operación normal se presentaron fluctuaciones en este parámetro encontrando valores máximos de 0.30 mg/L y valores cercanos a 0 mg/L o posiblemente no detectados por el método de medición utilizado. Aunque se obtuvieron variaciones altas, la prueba estadística homogeneidad de varianzas ($P > 0.05$ ver anexo M), muestra una relación de baja significancia en concordancia con los datos entre los diferentes tanques.

En la Figura 8 se puede apreciar el comportamiento del fósforo total en los eventos de funcionamiento normal y en evento de cosecha dentro del sistema de lagunas de *Azolla*, en el cual se nota a nivel general que a pesar que este parámetro tiene pequeñas fluctuaciones, existe un decrecimiento a medida que el flujo pasa por cada uno de los tanques; este hecho se presentó debido a diferentes procesos a los cuales es sometido el fósforo total en el tratamiento natural con *Azolla*. Las macrófitas degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los nutrientes (Nitrógeno, Fósforo), pero también proporcionan una extensa superficie donde se posibilita el crecimiento bacteriano y se fijan compuestos que generan eutrofización de las aguas (Layman, 2005). Dichos procesos generalmente están relacionados con la absorción y adsorción de nutrientes (Nitrógeno, Fósforo) por parte de las raíces de *Azolla*, las cuales actúan como filtro biológico tomando y removiendo sobre todo el fósforo del medio donde estas macrófitas se desarrollan.

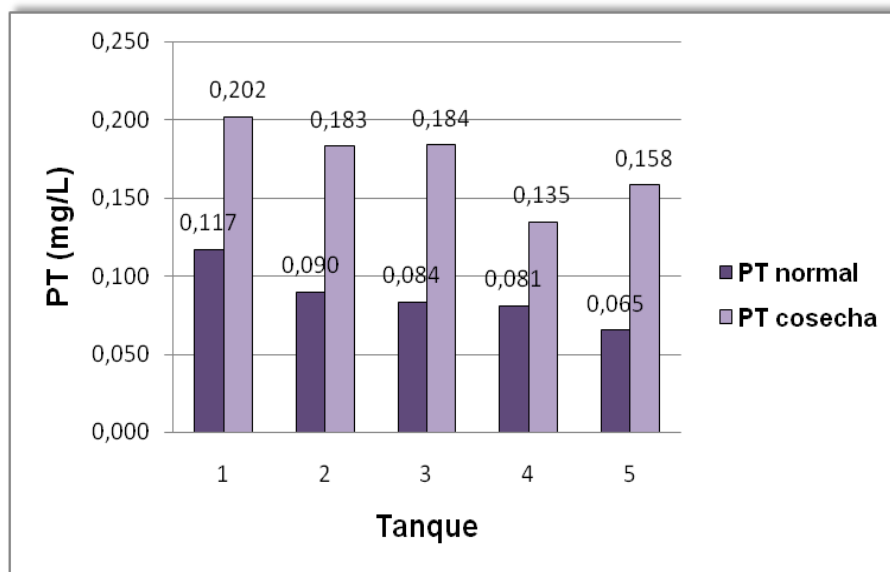


Figura 8. Comportamiento de fósforo total promedio (PT) en operación normal y evento de cosecha

El efluente después de entrar en la planta piloto reduce la concentración de fósforo total considerablemente ya que este efluente sale del sistema con 0.065 mg/L en época normal y 0.158 mg/L en eventos de cosecha. Para poder dar una clara visión de la contaminación producida por exceso de fósforo total en las aguas residuales provenientes del proceso productivo de tilapia roja y debido a la escasez de normatividad colombiana, para evaluar este tipo de vertimientos se tuvo en cuenta a Da silva (2006) quien realizó estudios con lagunas *Azolla* para

efluentes provenientes de acuicultura en Brasil ; según los rangos encontrados en el estudio realizado en la yunga los valores de fósforo están por encima de los estipulados en la legislación brasileña vigente, que establece un máximo de fósforo total para efluentes derivados de procesos de acuicultura de 0,050 mg/L, el comportamiento en la remoción del fosforo total dentro del sistema, se debió posiblemente a la actividad de crecimiento *Azolla*, la cual toma los nutrientes necesarios (N, P) para su desarrollo

La eliminación de fósforo es gradual a medida que el efluente pasa por cada uno de los cinco tanques de tratamiento, encontrándose porcentajes de remoción de fósforo total de 54.2% en etapa normal y de 69.8% en eventos de cosecha; estos valores de remoción son bajos teniendo en cuenta que otras macrófitas acuáticas como *E. Crassipes* y *P. Stratiotes* fueron más eficientes en la remoción de fósforo total (82,0% y 83,3%, respectivamente), para efluentes provenientes del cultivo de la tilapia (Gonzaga *et al.* , 2006), otro factor que se debe tener en cuenta en la remoción es el efecto del suelo el cual es el responsable de la más alta eliminación de fósforo de las aguas debido a la sedimentación en la parte inferior del estanque (Baccarin y Camargo, 2005).

Es importante tener en cuenta que si por motivos de escasez de agua potable en el área de influencia del estudio de lagunas en serie con *Azolla* y si solo se dependiera de este parámetro se pensara en retomar este efluente con fines de potabilización; los valores de fosfatos encontrados cumplirían con los rangos establecido por la normatividad colombiana (Resolución 2115 de Junio de 2007) para la destinación de este recurso para consumo humano y doméstico, debido a que el fosfato admisible es 0.2 mg/L.

A partir del análisis de los resultados obtenidos durante los muestreos de fósforo total y fosfatos; se compararon los datos arrojados de estos dos parámetros en las épocas de normalidad y eventos de cosecha, buscando una relación de recuperación del efluente después de una eventual cosecha, de lo cual se pudo inferir que estos parámetros no tuvieron gran incidencia dentro del tratamiento puesto que los valores de fosfatos a la entrada aumentaron hasta alcanzar los 1.61 mg/L y salieron con 0.485 mg/L (ver Anexo N); reduciéndose significativamente este parámetro, además de presentar mayor remoción al día siguiente de la realización eventual de la cosecha , debido a la rápida recuperación del efluente. Por otra parte el fósforo total tuvo el mismo comportamiento que los fosfatos, lo que no interfiere en el proceso de tratamiento del efluente por métodos naturales.

7.6 NITRÓGENO TOTAL (NT) Y NITRÓGENO AMONIACAL (NH₃-N)

El nitrógeno total es la suma del nitrógeno presente en los compuestos orgánicos y en el amoníaco. En un medio aerobio se necesita en una proporción de carbono 100 mg/L, nitrógeno 5mg/L y fósforo 1mg/L (C100/N5/P1) para que exista crecimiento de la biomasa (Seoánez, 2005). En la planta piloto con lagunas de *Azolla* en serie implantada en la estación piscícola “La Yunga” los valores promedio de nitrógeno total fueron de 4,78 mg/L y en nitrógeno amoniacal de 2,31mg/L; estos valores son cercanos al propuesto anteriormente por Seoánez, donde según las características estaría en una buena proporción para el medio acuático; además de acuerdo a los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso hídrico para uso pecuario (decreto 1594 de 1984) estos valores están por debajo del admitido, ya que el máximo es de 10 mg/L. Debido a la falta de normatividad colombiana para la regulación de efluentes provenientes de procesos piscícolas se comparó los valores totales de nitrógeno amoniacal encontrados en el estudio desarrollado en la yunga con los valores de nitrógeno amoniacal de la legislación brasileña, la cual permite un máximo de nitrógeno amoniacal en los efluentes de la acuicultura en forma de nitrato (10,0 mg/L), nitritos (1,0 mg / L); por lo que podría inferirse que los valores encontrados en la estación piscícola la yunga están dentro de los niveles permisibles en cuanto a vertimientos (Da Silva, 2006).

El valor del nitrógeno total que entra a la planta piloto es de 4.14 mg/L, al salir de esta (tanque numero 5) es de 4.73 mg/L dando una eficiencia de remoción negativa de -13,16%, esto se debe a que ecológicamente *Azolla* es responsable del aumento sustancial de nitrógeno del ambiente porque durante su vida fija nitrógeno y cuando muere, lo confiere al agua (Montaño, 2005).

Aunque según el decreto 1594 de 1984 el nitrógeno se encuentra entre los valores admisibles, este parámetro puede causar detrimento sobre la calidad del agua y las diferentes formas de vida que se desarrollan dentro de este medio (FAO, 2003).

El comportamiento del nitrógeno total varió durante la época de muestreo como se puede observar en la Figuras 9 manifestando diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tanques, esto pudo ser confirmado mediante la prueba estadística de Kruskal-wallis la cual se realizó debido a que los datos no se ajustaron a la prueba de normalidad (ver Anexo M).

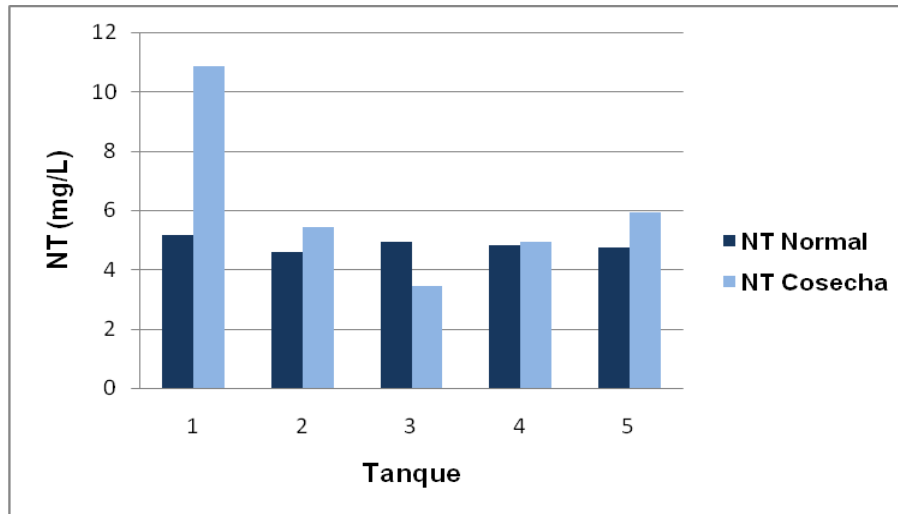


Figura 9. Comportamiento del nitrógeno total (NT) en evento de cosecha y operación Normal.

Azolla Pinnata es un helecho acuático que forma simbiosis con la cianobacteria *Anabaena*, la cual vive dentro de su fronda y puede fijar de 100 a 1564 kg de N_2 /ha año (Quintero y Ferrera, 2000; citados por Castro, 2008). Debido a esto ha sido empleada en la limpieza de acuíferos por su habilidad de fijar N_2 y remover P de los ecosistemas (Shiomi y Kitoh, 1987; citados por Castro, 2008). Esta además es capaz de usar su propia energía fotosintética para fijar el nitrógeno atmosférico y producir amonio, lo que es aprovechado para cubrir sus propios requerimientos de nitrógeno; así mismo, la relación simbiótica entre el helecho y la cianobacteria permite que *Azolla* sea relativamente independiente de utilizar nitrógeno de su entorno, este hecho hace que *Azolla* tienda a contener niveles relativamente altos de nitrógeno (Ly, 2004). De ahí que los niveles de nitrógeno en el agua de la estación piscícola La Yunga hayan aumentado, posiblemente en este caso *Azolla* tomó el nitrógeno del aire lo fijó sustancialmente pasándolo al medio.

La eutrofización es el proceso natural de envejecimiento que se produce en los lagos y arroyos, proceso que se acelera por los excesos nutrientes, particularmente nitrógeno y fosforo (Forni *et al.*, 2002) Como existe un aumento del 13,16% de este nutriente se puede esperar que con el tiempo exista eutrofización ya que este elemento si no es eliminado causa este fenómeno en el agua (Ferdoushi *et al.*, 2008). Aunque *Azolla Pinnata* ha demostrado gran potencial para ser utilizada en el tratamiento de estas aguas (Sutton y Ornes, 1975. Citados por Ferdoushi *et al.*, 2008) se evidenció que no se cumplió con el objetivo para el cual fue propuesta, esto es corroborado por Da Silva 2006 quien

afirmó que *Azolla* no reduce sustancialmente nutrientes como nitrógeno y fósforo en efluentes provenientes del proceso de la acuicultura.

A pesar que los niveles de nitrógeno aumentaron significativamente (nitrógeno total 10.84 mg/L y nitrógeno amoniacal 4.43 mg/L) en el evento de cosecha estos no tuvieron gran influencia en el efluente ya que este sufrió una rápida recuperación volviendo a los niveles de nitrógeno que tenía en época normal, como se puede apreciar en la Figura 10, este evento no causa degradación a “Rio Sucio” que es donde se vierte el efluente ya que esto se realiza cada 6 meses aproximadamente además por su capacidad de dilución.

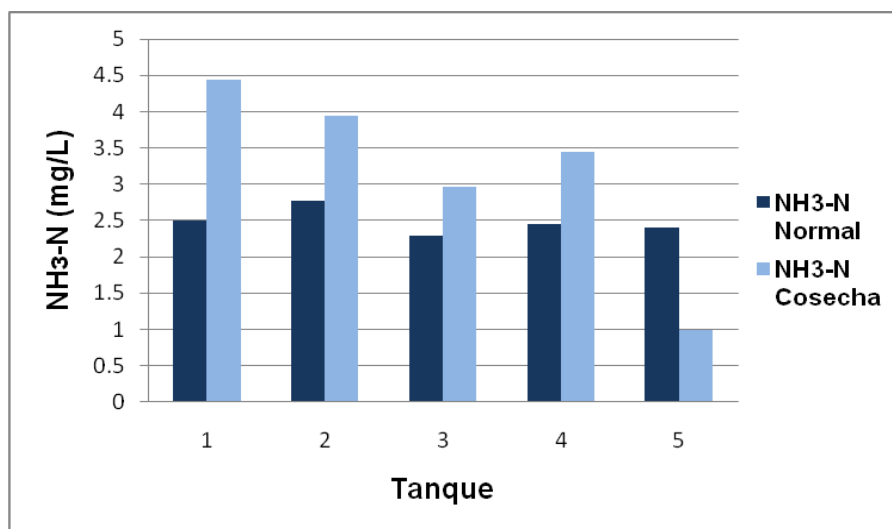


Figura 10. Comportamiento de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) en operación normal y en cosecha.

Finalmente un factor a tener en cuenta es que muchas de las macrófitas sembradas a raíz de las condiciones ambientales (temperatura, luminosidad, entre otras) murieron confiriéndole más nitrógeno al medio. En el caso de esta investigación *Azolla* se cosechó semanalmente encontrando periodos de tiempo en los cuales no hubo crecimiento ($\text{TC}=0$ Ver Anexo H) de esta y por lo tanto la bioacumulación de este nutriente iba saturando cada vez más los tejidos de *Azolla* que se encontraban en los tanques y que posteriormente con su deceso aumentó los niveles de N en el agua; así lo ratifican Lumpkin y Plucknett (1980) citados por Kern (2007), además, la asociación con la cianobacteria normalmente excreta al ambiente acuático 25% del nitrógeno fijado en un período de 30 días (Espinoza, 2006).

7.7 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

El valor promedio de los sólidos suspendidos obtenido a la entrada de la planta piloto fue de 119.9 mg/L y a la salida fue de 44.1 mg/L, presentado una tendencia decreciente como se nota en la Figura 11, este comportamiento pudo estar influenciado posiblemente por el efecto de biofiltro que cumplen las macrófitas acuáticas dentro del sistema piloto con lagunas de *Azolla* en serie, el cual es parecido a una laguna de sedimentación donde el material particulado del medio tiende a acumularse en el fondo de la laguna; por otra parte hay que resaltar la relación que existe entre los sólidos suspendidos con la demanda de oxígeno disuelto, ya que esta disminuye a medida que los sólidos suspendidos aumentan ocasionando efectos significativos sobre el cuerpo receptor (Soto *et al.*, 2007), lo que influye en el comportamiento de los demás parámetros.

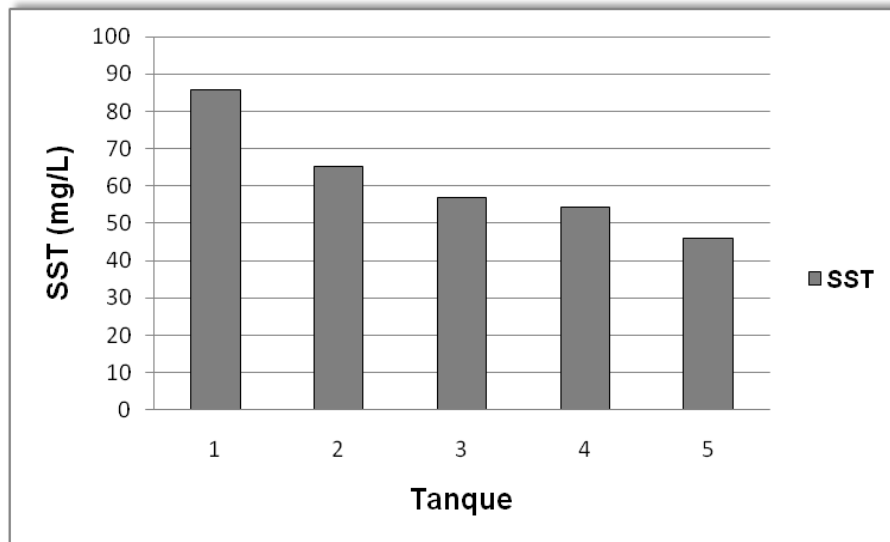


Figura 11. Valores Promedio de los Sólidos Suspendidos en la planta piloto

La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos en funcionamiento normal y en cosecha se puede evidenciar en la Figura 12; mostrando que el sistema elimino el 60.1% de los sólidos suspendidos totales en época de funcionamiento normal indicando que gran parte de estos sólidos son retenidos en el sistema de estudio, ya que este también tiene un comportamiento similar al de una laguna de sedimentación.

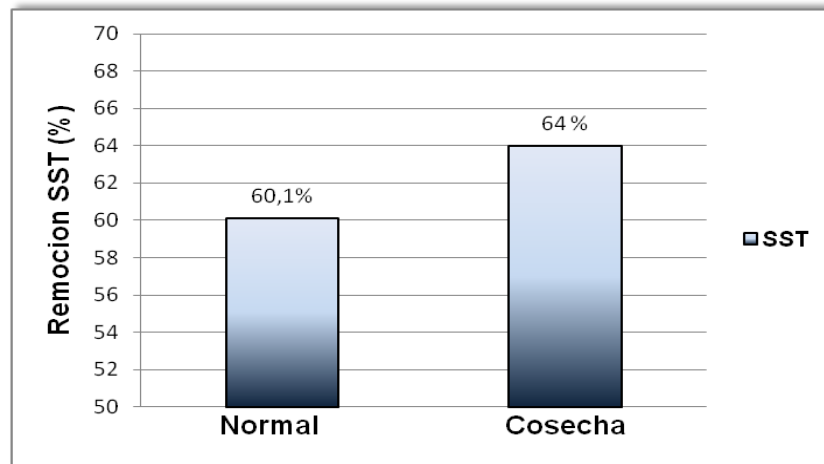


Figura 12. Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos en funcionamiento normal y en cosecha

A pesar que en evento de cosecha el aumento de los sólidos en el efluente se ve afectado por la agitación del medio lo que resuspende el material particulado en el medio acuático; el comportamiento de los sólidos es similar cuando la planta piloto está en época de funcionamiento normal, esto se puede corroborar con los datos obtenidos de sólidos durante el evento de cosecha el cual arrojó valores de 152 mg/L a la entrada y 54.2 mg/L a la salida obteniendo un porcentaje de remoción del 64% el cual no se aleja mucho del encontrado en etapa de funcionamiento normal de la planta piloto y que además da una clara visión que este parámetro no es importante en la descarga a otros efluentes naturales.

7.8 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

El comportamiento de la demanda química de oxígeno; muestra que la implementación de lagunas de *Azolla* en serie en La Yunga tiende a reducir este parámetro en los efluentes provenientes del cultivo de tilapia, este proceso de remoción es de forma gradual y muestra una tendencia decreciente dentro de los diferentes tanques de la planta piloto evaluada. El valor promedio de los datos de DQO a la salida de la planta piloto fue de 56,2 mg/L en la etapa de levante y de 316 mg/L en eventos de cosecha, los anteriores valores según Metcalf y Eddy (1995), citados por Bolaños *et al.* (2008), tienden a patrones de contaminación baja y media respectivamente (alrededor de 0-500mg/L), debido a las condiciones físicas del efluente proveniente del proceso de cultivo de la tilapia, la cual necesita de ambientes propicios para su desarrollo, en estos ambientes acuáticos generalmente se da mucho la promoción de fitoplancton (algas), alterando la carga orgánica de dichos efluentes y por consiguiente aumentando la DQO.

Durante el muestreo se encontraron valores máximos de DQO de 406 mg/L, los cuales pudieron estar influenciados por algas y material orgánico, pero también se encontraron valores mínimos de 4 mg/L, los cuales se obtuvieron debido a condiciones ambientales como temperatura, pH y precipitaciones; también probablemente por el cambio del efluente que provenía de especies más adultas por otras más jóvenes lo que pudo influir en las características fisicoquímicas del agua; este proceso se realizó después de haber ejecutado el evento de cosecha.

En la Figura 13 se puede ver el comportamiento de la demanda química de oxígeno en época normal y evento de cosecha, donde se aprecia una gran diferencia; debido a la alteración que el efluente sufre cuando se realiza el proceso de cosecha de la tilapia roja, donde los operarios entran a los estanques y por medio de redes recogen los peces, estos procedimientos de colecta remueven el lodo y la materia orgánica sedimentada haciendo que la demanda química de oxígeno se incremente inmediatamente; pero después de 48 horas los parámetros a evaluar durante esta investigación dentro de estanques regresaron a la normalidad, recuperándose este efluente rápidamente.

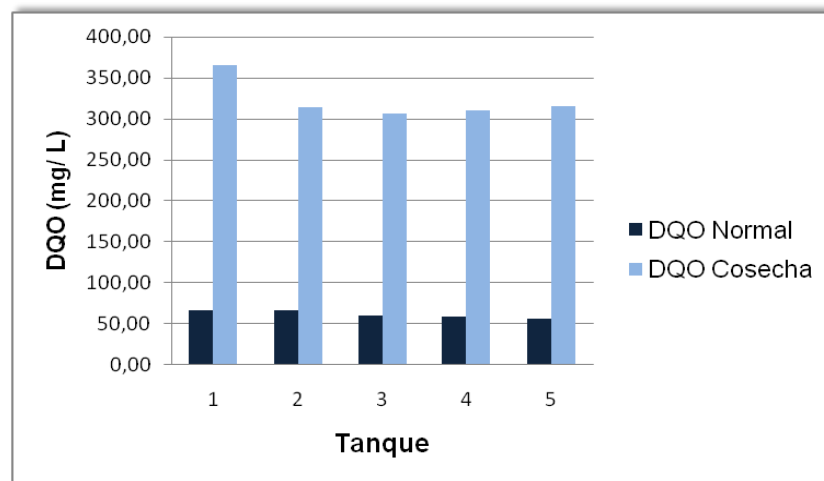


Figura 13. Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno promedio (DQO) en la planta piloto

En general el efluente después del proceso de tratamiento natural con *Azolla* presentó una reducción de la DQO cerca del 61% en etapa de funcionamiento normal, valor que se halla por encima del encontrado por Leal *et al.* (1993) quienes trabajaron con *Azolla* obteniendo un porcentaje de remoción del 44% para efluentes provenientes de porcicultura. De lo que se puede inferir que la *Azolla* se comporta mejor para la remoción de la DQO en aguas con niveles de

contaminación bajos o medios. En cuanto al proceso de cosecha la DQO se incrementó, pero el efluente se recuperó en los días siguientes, indicando que no causa daños significativos en el “rio sucio” donde es descargado este tipo de vertimientos. Finalmente al aplicar la prueba de Kruskal Wallis en el programa SPSS 11.5, los valores obtenidos en general durante la época de muestreo no se ajustaron a la normal ($P < 0.009$), demostrando que estos tuvieron una importante variación entre los diferentes tanques para los cuales tienen promedios poblacionales distintos.

7.9 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅)

La DBO₅ promedio de entrada fue de 16.3 mg/L, alcanzando valores máximos de 35.4 mg/L y mínimos de 0.15 mg/L dentro de la planta piloto lo que puede indicar que este parámetro tuvo altas fluctuaciones durante el periodo de recolección de datos ($P < 0.05$), mostrando que hubo variabilidad en la concentración de materia orgánica dentro del sistema de lagunas de *Azolla*.

Como se había mencionado anteriormente la variación de estos valores de DBO₅ pudieron estar influenciados posiblemente por el volumen de excreta producido por los peces que son la mayor fuente de residuos orgánicos ya que entre el 25 y el 30% es convertido en residuo fecal (Kubitza, 1999. Citado por Hussar *et al.*, 2005) Este material orgánico, no solo genera contaminación de tipo microbiológica, sino que también consume el oxígeno disuelto del agua, que compite con el oxígeno requerido por los peces (Acuica, 2000; citado por De la Cruz y Salazar, 2007), por otra parte están las condiciones ambientales como la temperatura la cual se mantuvo en rangos altos debido al periodo de verano en el que se realizó el estudio, este parámetro influyó de manera importante en la digestión de los peces ya que a mayor temperatura el proceso de digestión es más rápido así como también influyó en la actividad de *Azolla* y la vida acuática en general.

La Figura 14 muestra claramente el comportamiento decreciente de la demanda bioquímica de oxígeno durante operación normal y evento de cosecha a través de cada una de las lagunas de *Azolla* de la planta piloto.

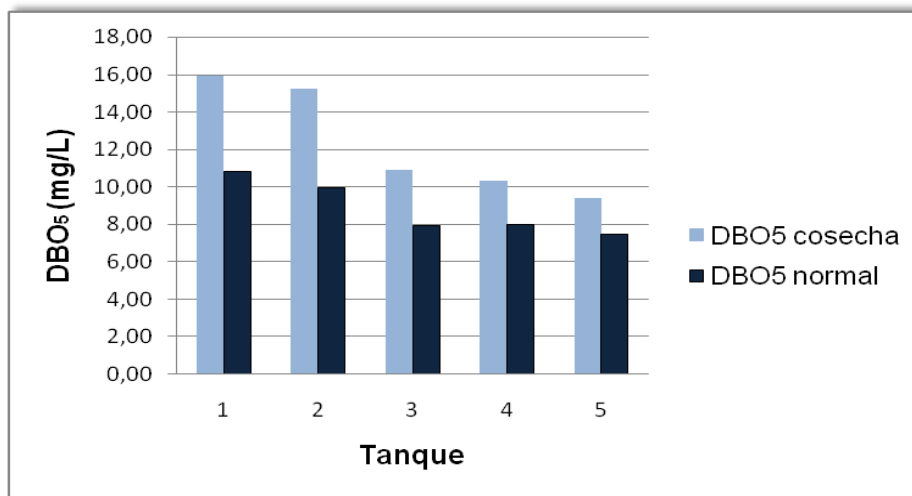


Figura 14. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) promedio en operación normal y evento de cosecha

La DBO₅ al salir de la planta piloto tuvo un valor promedio de 6.9 mg/L, que según Freire, 2009 indica que esta se encuentra en un rango de aguas poco contaminadas (5 a 50 mg/L); sin embargo, este efluente no es apto para su potabilización ni para reuso acuícola en caso de requerirlo para estos procesos; pero si con fines de uso agrícola o como riego de cultivos.

En cuanto a remoción *Azolla* logró llegar a reducir la demanda bioquímica de oxígeno hasta un 57.5% en etapa normal y 44.6% en evento de cosecha; estas remociones se pueden considerar altas teniendo en cuenta que el efluente es altamente diluido y por consiguiente su tratamiento en cuanto a este parámetro (DBO₅) por las características mencionadas se hace muy difícil y costoso utilizando tratamientos convencionales.

Según Rodríguez *et al.*, 2001 investigando sobre algunas macrófitas para la depuración de agua residuales domésticas encontró que *Azolla* puede remover cerca del 70% de la DBO₅ lo que indica que la *Azolla* se comportó de una manera bastante eficiente a medida que la cantidad de nutrientes en el medio aumentó, esto puede ser visto positivamente como un mecanismo viable en caso de tratarse de eliminar solo este parámetro; gracias a las altas tasas de remoción que se puede lograr con este sistema.

7.10 CRECIMIENTO DE AZOLLA PINNATA EN EL SISTEMA PILOTO

En la planta piloto se utilizó una cobertura del 70% de la superficie con *Azolla* por periodos de siete días, este tiempo es apropiado ya que según las investigaciones, los tiempos de duplicación de esta se producen en los primeros 10 días con un área de cobertura del 75% mostrando una mayor extracción de nutrientes como N y P por lo que se consideró hacerla en periodos más cortos de tiempo y con coberturas menores (Da Silva, 2006). En principio, las altas eficiencias de eliminación de nutrientes pueden alcanzarse debido a las altas tasas de crecimiento (Shiomi y Kitoh, 1987 citado por Forni *et al.*, 2001). Igualmente si se habla de crecimiento se puede relacionar con el aumento del contenido de clorofila, sacarosa y azúcares reductores, debido al incremento de la capacidad fotosintética (Mostafa y Hassan, 2006).

En el caso de la investigación con lagunas de *Azolla* en serie implementada en una estación productora de tilapia roja, la macrófita muestra un comportamiento creciente en el paso del efluente de la primera laguna a la siguiente como se observa en el grafico, este comportamiento es debido a que en este proceso inicial de crecimiento el efluente que proviene de la estación piscícola se encuentra con todos los nutrientes aportados por el proceso acuícola propio de la tilapia roja. Nutrientes como nitrógeno y fósforo que enriquecen el cuerpo de agua y evidentemente esto se ve reflejado en el crecimiento de *Azolla*.

La Figura 15 muestra como la tasa relativa de crecimiento disminuye considerablemente después de la primera laguna debido a la absorción de gran parte de estos nutrientes; este comportamiento decreciente podría estar influido por la cantidad de nutrientes que contiene el medio donde se desarrolla *Azolla*, puesto que en estas lagunas siguientes los nutrientes disminuyen considerablemente, esto puede ser soportado con el análisis de los parámetros fósforo, nitrógeno y materia orgánica los cuales son los más influyentes en el desarrollo de *Azolla*. La concentración de los parámetros estuvo por debajo de los requerimientos que la macrófita *Azolla* necesita para su óptimo crecimiento; así lo han demostrado estudios de la tasa relativa de crecimiento donde se afirma que *Azolla* puede crecer bien en las aguas residuales domésticas si hay suficiente fósforo (Costa *et al.*, 1999) este hecho hace que *Azolla* sea viable como alternativa para el tratamiento de aguas residuales por sus ventajas en comparación con otras herbáceas angiospermas (Brix y Schierup, 1989. Korner Vermaat, 1998; Lambers y Poorter, 1992. Citados por Forni *et al.*, 2001), bajo costo y fácil mantenimiento.

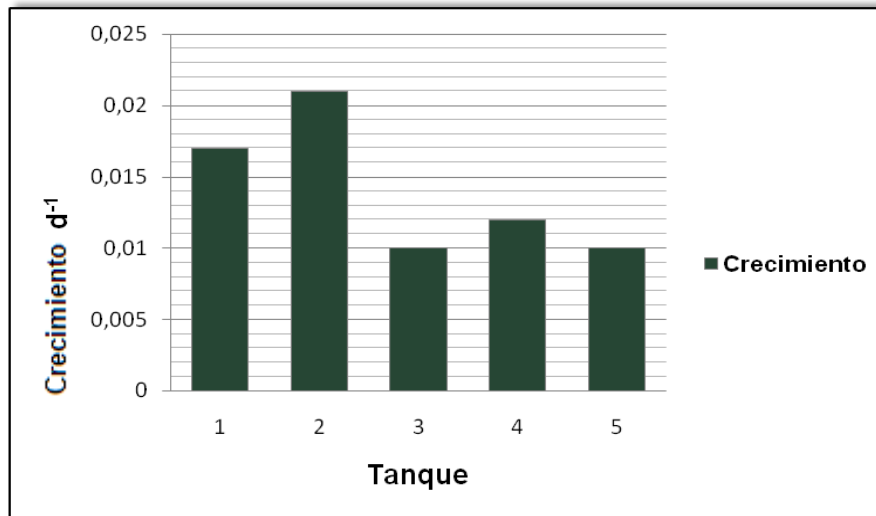


Figura 15. Tasas relativas de crecimiento de *Azolla*

En este estudio *Azolla* presentó bajas tasas relativas de crecimiento promedio (ver Anexo I TRC) en las diferentes lagunas de *Azolla* ($T^*1=0,017 d^{-1}$; $T^*2=0,021 d^{-1}$; $T^*3=0,010 d^{-1}$; $T^*4=0,012 d^{-1}$; $T^*5=0,010 d^{-1}$); esto se pudo deducir haciendo la comparación con la tasa de crecimiento obtenida por Pabby *et al.* (2001), quienes trabajaron con *Azolla Pinnata* y obtuvieron tasas relativas de crecimiento cercanas a $0.152 d^{-1}$. Como se mencionó anteriormente estos valores estuvieron influenciados por la baja disponibilidad de nutrientes en el efluente (Quintero y Ferrara 1998, 2000; citados por Espinoza y Gutiérrez, 2006), lo que interfiere en el óptimo progreso de crecimiento de *Azolla*, además de algunos factores ambientales importantes para el desarrollo de la macrófita.

En cuanto a la tasa de duplicación, *Azolla* tiene una característica aun más sobresaliente que es su relación simbiótica con el alga verde- azul *Anabaena azollae*, que bajo condiciones satisfactorias de campo, la combinación helecho-alga puede duplicar en peso entre 3 y 5 días (Van hove y López 1983; citados por FAO, 2000). En el caso de este trabajo de campo el tiempo de duplicación promedio (ver Anexo J) fue baja en los diferentes tanques de la planta piloto ($T^*1=14,3 d$; $T^*2=7,3 d$; $T^*3=16,6 d$; $T^*4=25,8 d$; $T^*5=18,3 d$), ya que *Azolla* necesitó de mas tiempo para duplicar su biomasa, esta característica también fue afectada por las condiciones ambientales y de nutrientes donde se sembró *Azolla*. El tiempo de duplicación que mejor se presentó fue en el segundo tanque (7.3 d), periodo que se acerca un poco a lo expuesto por Liu *et al.* (2007). Con la aplicación de la prueba estadística se realizó la prueba de homogeneidad de varianza pero para efectos de este caso se tuvo en cuenta la prueba de Tukey la

cual ratificó que los datos se ajustan a parámetros de normalidad en los cuales las medias marginales no difieren de tanque a tanque; el comportamiento de estos datos se observa en la Figura 16 que muestra el diagrama de cajas para crecimiento de biomasa de *Azolla*.

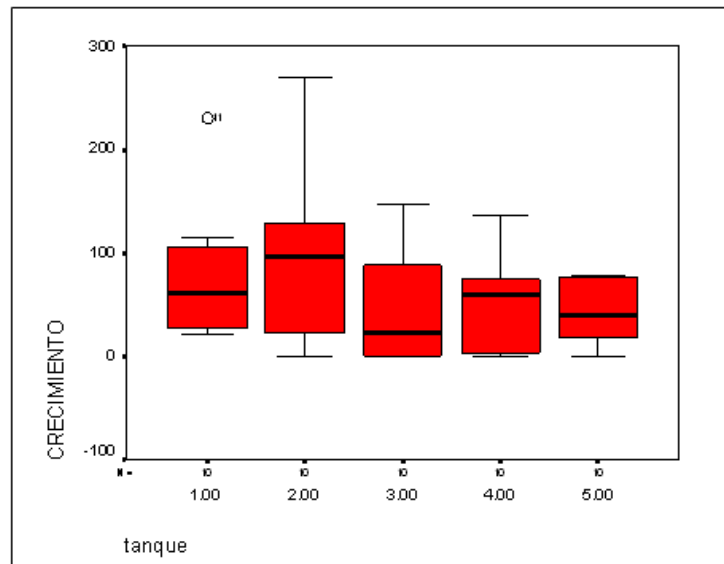


Figura 16. Diagrama de cajas para crecimiento de biomasa de *Azolla*

Teniendo en cuenta las condiciones ambientales presentadas durante la investigación con lagunas de *Azolla* para el tratamiento de efluentes provenientes de procesos acuícolas; es importante verificar que esta macrófita tuvo un crecimiento bajo por lo que al referirse a Liu *et al.* (2007) en su artículo estudios sobre el tratamiento de la orina por tratamiento biológico con *Azolla* y oxidación fotocatalítica afirman que *Azolla* se multiplica rápidamente aumentando su biomasa en 4 o 5 días con parámetros ambientales de temperatura de 25° C y un 80% de humedad relativa.

En el desarrollo del trabajo de campo se tuvo en cuenta el exceso de luz solar que en el área de influencia del proyecto se dio debido a las condiciones de verano intenso, lo que incidió en la presencia de una coloración rojiza sobre todo en las macrófitas de las últimas dos lagunas, que mostraron características que manifiestan deterioro en su estructura física, puesto que fueron las que estuvieron expuestas directamente durante más tiempo a la radiación solar ya que la cubierta puesta para evitar esta alta penetración de luminosidad no fue tan eficiente; este deterioro causado en *Azolla* debido a la alta luminosidad es mencionado por Ly

(2004) quien dice también que *Azolla* prefiere más un lugar sombreado que estar a plena luz solar.

Aparte de los nutrientes anteriormente mencionados, condiciones ambientales óptimas como temperatura, grado de luminosidad y humedad, entre otras influyen en el buen desarrollo de *Azolla*, ya que esta es sensible a la radiación solar como afirman Mostafa y Hossan (2006), además de otros factores determinantes en el desarrollo de la *Azolla* como la sequía y la salinidad los cuales también pueden inhibir su tasa de crecimiento (Mostafa y Hassan, 2006).

Bajo ciertas condiciones, también existe un pigmento de antocianina, que le confiere a *Azolla* un color entre rojiza y carmelita como se aprecia en la Foto 1; la coloración mencionada está asociada con la fertilización del reservorio acuático, mucha contaminación o también un exceso de luz solar. En estas condiciones de stress térmico y de falta de nutrientes la producción de antocianinas se eleva y la concentración de clorofila se reduce a medida que el fósforo disponible en el medio disminuye (Adalberto *et al.*, 2004). La explicación a esto es que *Azolla*, contiene pigmentos fotosintéticos clorofila a, clorofila b y carotenoides asociados a los cloroplastos; mientras que los filamentos de *Anabaena* presentan clorofila a, ficobiliproteínas y carotenoides.



Foto 1. Coloración de *Azolla* en el Último Tanque

El efecto de la coloración también fue citado por Carrapiço (2001) quien mencionó que *Azolla* en condiciones favorables, tales como temperaturas altas, caudal reducido y disponibilidad de nutrientes, especialmente el fósforo, se multiplica

rápida­mente dando origen a tapetes que cubren la superficie del agua normalmente de color verde-rojo. También es de gran importancia mencionar que esta suma de pigmentos fotosintéticos principales permite al organismo simbiótico ampliar el rango de utilización de la energía luminosa aprovechable y es probable que esta característica sea la responsable del crecimiento rápido y la gran acumulación de biomasa en períodos cortos (Lenti *et al.*, 2002).

En la Foto 2 se muestra que la planta piloto cuenta con una cobertura plástica transparente tipo invernadero que ayudó a que *Azolla* estuviera en condiciones ideales; este mecanismo permitió contrarrestar la incidencia de la luz solar directa sobre *Azolla*, pero para el caso de los dos tanques finales esta cubierta no fue tan eficiente, ya que los rayos solares incidieron de todas maneras por un periodo de tiempo mas largo sobre las macrófitas debido a la localización de los tanques.



Foto 2. Planta piloto estación piscícola “La Yunga”

Otro factor limitante en la tasa de crecimiento pudo haber sido el periodo de cosecha de la misma, que en algunos tanques se extendió debido al bajo aumento de la biomasa, sobretodo en los últimos dos tanques por las condiciones de stress luminoso anteriormente mencionadas; este factor le proporcionó a *Azolla* otras características, esta comenzó a secarse y presentar hojas retorcidas lo cual interfirió en su óptimo desarrollo y produjo una alta mortalidad de muchas de las macrófitas sembradas al inicio de la investigación. Este resultado coincide con otros autores, (Lumpkim y Plucknett, 1982; Forni *et al.*, 2001; citados por Da Silva,

2006). En la Foto 3 se aprecia la incidencia de los rayos solares sobre los dos últimos tanques en los cuales el crecimiento fue mas bajo.



Foto 3. Incidencia de la luminosidad sobre los tanques

A pesar de haber encontrado factores que interfirieron con el crecimiento de *Azolla*, también se encontraron características beneficiosas para el óptimo desarrollo de esta micrófita; siendo la temperatura un parámetro que se mantuvo dentro del margen que esta tolera y que además muestra un buen comportamiento para el efecto de la tasa de crecimiento relativa, esto se pudo corroborar con la literatura donde autores como Cary y Weerts (1992) quienes estudiaron dos especies de *Azolla*, *A. Filiculoides* y *A. Pinnata*, a temperaturas de 20 ° C a 25 ° C, manifestaron que ambas especies revelaron un buen desarrollo. Finalmente es de gran importancia recalcar lo mencionado por Araújo, 1987; citado por Da Silva, 2006), el cual afirma que *Azolla* crece bien en aguas eutróficas, aumentando la buena calidad de los efluentes y proporcionando un tratamiento natural de bajo costo.

El comportamiento de *Azolla* durante el periodo de muestreo fue variable pero finalmente después de aplicar estadísticas de promedio de crecimiento en general *Azolla* se comporta de mejor manera cuando la concentración de nutrientes es más alta y cuando los factores ambientales son los óptimos para su buen desarrollo

Los valores reportados en el periodo de muestreo fueron obtenidos en época de verano (Abril a Julio de 2009) y superan ampliamente las tasas de producción de biomasa medidas en el mismo efluente por Bazán y Alomía (2009) quienes reportaron valores mínimos de 6 g/m² día y máximos de 32 g/m² día para *Azolla pinnata* en época de Invierno (Octubre de 2008 a Enero de 2009)

De acuerdo con los resultados obtenidos sobre los parámetros fisicoquímicos evaluados en la planta piloto de la Yunga es importante afirmar que *Azolla* requiere todos los nutrientes esenciales para su crecimiento normal, ya que debido a su naturaleza acuática, estos elementos deben estar disponibles en el medio. La deficiencia de cualquiera de los elementos afecta de manera adversa su crecimiento y la fijación del Nitrógeno. En este caso, *Azolla* se comportó como un cultivo agrícola; con respecto a nutrientes, el fósforo fue un elemento clave y su deficiencia produjo como resultado un crecimiento bajo, una coloración rosada o rojiza, rizado de las raíces como se observó en la estación piscícola La Yunga; por otro lado se ha manifestado que en medios con altos niveles de nitrógeno el crecimiento es mayor (Mostafa y Hassan, 2006) aunque esta puede crecer en ausencia de este nutriente.

En el caso del fosforo total, autores como Seoanez (2005) en su libro Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo menciona que para que exista crecimiento de biomasa la concentración de este elemento debe ser mínimo de 1 mg/L; este valor está por encima de los encontrados en la planta piloto instaurada en la yunga debido a que el crecimiento de *Azolla* pudo influir en el comportamiento del fosforo total dentro del sistema; ya que *Azolla* depende del fosforo además de otros factores como la cantidad de *Azolla* que contenía cada tanque; ya que la densidad de estas macrófitas varió durante el tratamiento.

8. CONCLUSIONES

El sistema de tratamiento con *Azolla Pinatta* no removió nitrógeno, por el contrario lo incrementó en un 13.6%, situación que se puede considerar negativa, porque lo que se buscaba era mejorar la calidad del efluente piscícola con respecto a este parámetro.

En cuanto a fósforo total, cada laguna del sistema contribuyó a la remoción del mismo, lográndose una eficiencia global del 54.2% en condiciones de operación normal y 69.8% durante el evento de cosecha.

La remoción de DQO fue del 61% en etapa de funcionamiento normal y 28.5% durante el evento de cosecha; así mismo, se obtuvieron eficiencias de remoción de DBO₅ 57.5% y 44.6% en etapa de funcionamiento normal y evento de cosecha, respectivamente; remociones que aunque son aparentemente bajas, se pueden considerar buenas, ya que el efluente piscícola presenta altos niveles de dilución, lo que dificulta su tratamiento.

El valor promedio de oxígeno disuelto a la salida del sistema de tratamiento fue de 3.05 mg/L, por lo que se puede inferir que si se pensara en utilizar únicamente este efluente para fines de piscicultura, no se cumpliría con los valores óptimos para el cultivo de la tilapia roja, que como mínimo debe ser de 5 mg/L.

Azolla Pinnata creció en la estación piscícola "La Yunga" bajo los factores ambientales propios del lugar, por lo que se puede concluir que *Azolla* puede sobrevivir en otros sitios con características similares. Las tasas promedio de producción de biomasa fresca, oscilaron entre 42.7 y 100.7 g/m² d, presentando un comportamiento variable en cada uno de los tanques.

De acuerdo a los resultados obtenidos con la implementación de lagunas de *Azolla* para la eliminación de contaminantes en efluentes del cultivo de tilapia roja en la estación piscícola La Yunga, muestran que *Azolla* creció en la planta piloto removiendo favorablemente parámetros como fósforo, sólidos suspendidos totales y DBO₅. La remoción de nitrógeno no se da de manera positiva ya que *Azolla* actúa como una macrófita fijadora de este componente, influyendo en la calidad del agua.

9. RECOMENDACIONES

Es necesario hacer otros tipos de investigaciones referentes a tratamientos naturales de aguas residuales provenientes de estaciones piscícolas debido a que en Colombia la información es muy escasa y no existen datos de la utilización de macrófitas acuáticas para la eliminación de nutrientes.

Aunque la remoción en general fue aceptable con este tipo de tratamientos naturales (lagunas de *Azolla* en serie), se recomienda que el efluente del sistema no sea recirculado, dado que este no cumple con los requerimientos óptimos para el proceso productivo de la tilapia roja.

Debido a que el tratamiento con *Azolla* en la estación piscícola La Yunga no tuvo los mejores resultados, dado que incrementó los niveles de nitrógeno, se recomienda buscar otra alternativa de tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos productivos de tilapia roja.

Si se deseara reutilizar el efluente con fines piscícolas se podría realizar una combinación con un medio acuático que permita mejorar la calidad de agua.

BIBLIOGRAFÍA

ADALBERTO, Paulo. MASSABNI, Antonio. OULART, Antonio. MONTI, Rubens. LACAVA, Pedro. Efeito do fósforo na captação de minerais e pigmentação de *Azolla Caroliniana Willd* (Azollaceae). Revista Brasil. Bot. V.27. No. 3, Brasil. 2004. Pág.581-585

ARORA, Anju. SINGH, P.K. Comparison of biomass productivity and nitrogen fixing potential of *Azolla* SPP. National Centre for Conservation and Utilization of Blue Green Algae, Indian Agricultural Research Institute, India. September 2002. Pág.175-176

ARORA, Anju. SAXENA, Sudhir. Cultivation of *Azolla microphylla* biomass on secondary-treated Delhi municipal effluents. Centre for Conservation of Blue Green Algae, Indian Agricultural Research Institute, New Delhi, India. 2005. Pág. 61, 62.

BACCARIN, A. CAMARGO, A. Characterization and evaluation of the impact of feed management on the effluents of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture. Brazilian Archives of Biology and Technology, v.48, Brasil.2005. Pág. 81-90.

BAZÁN, S. ALOMÍA, A. Estudio comparativo de tratabilidad de efluentes piscícolas mediante lagunas duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) y helecho de agua (*Azolla Pinnata*): Tesis de pregrado. Universidad del Cauca. Programa de Ingeniería Ambiental, Popayán, 2009. 88 p.

BOLAÑOS, Sandra. CASAS, Juan Carlos. AGUIRRE, Néstor. Análisis comparativo de la remoción de un sustrato orgánico por las macrofitas *Pistia stratiotes* y *Egeria densa* en un sistema batch. Universidad de Antioquia. Revista Gestión y Ambiente. V.11. No. 2. Medellín, Colombia. 2008. Pág.39-41.

BOYD, Claude. Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. Aquaculture, v.226. Auburn, USA. 2003. Pág.101-112.

CARY, P. WEERTS, P. Growth and nutrient composition of *Pinnata* r. *Brown* and *Filiculoides Lamarck* as affected by water temperature, Nitrogen and Phosphorus supply, light intensity and pH. Aquatic Botanic. 1992. Pág. 163.

CARRAPICO, F. *Azolla* em Portugal. Instituto da água. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 2001. En línea: [http://azolla.fc.ul.pt/documents/Azolla Portugal.pdf](http://azolla.fc.ul.pt/documents/Azolla%20Portugal.pdf). Visitado Julio de 2009.

CASTILLO, Luis Fernando. Tilapia roja, una evolución de 20 años, de la incertidumbre al éxito. Doce años después. Colombia. 2001. Pág p 2-6, 45,46.

CASTILLO, Luis Fernando. La importancia de la tilapia roja en el desarrollo de la piscicultura en Colombia. Asociación Red Cauca, Alevinos del Valle. Cali, valle Colombia. 2006. Pág. 1, 2,13-16

CASTILLO, Luis Fernando. Tilapia Roja 2006 Una Evolución De 25 Años, De La Incertidumbre Al Éxito. Colombia. 2006. p 2,6-8,16.

CASTRO R, RODRÍGUEZ M , ÁLVAREZ G, GIL M, NOVO R, Y DÍAZ S. Efecto Del Uso de *Azolla* en los rendimientos de cultivos en condiciones de Organopónicos. Cultivos Tropicales, 2006, vol. 27, no. 1, p. 5-9

CASTRO, Luis. DELGADILLO, Julian. FERRERA, Ronald. ALARCON, Alejandro. Phenanthrene dissipation by *Azolla Caroliniana* utilizing bioaugmentation with hydrocarbonoclastic microorganisms. 2008. VOL. 33, Nº 8. pág. 60, 61.

COLPOS. Taller cultivo de tilapia en estanques rústicos. México. 2007. Pág. 7,9-11,13-16,19-21, 23,25-26.

COLOMBIA, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. La piscicultura en Colombia evolución histórica de la producción 1985-2006 comercio exterior 1997-2006 distribución geográfica de la producción piscícola nacional 2005 – 2006 estructura de la cadena y ley 811 de 2003. Dirección de cadenas. Coordinación cadenas acuícolas y pesca. Secretaría técnica nacional cadenas acuícolas. Mayo de 2007. Presentación: PowerPoint.

COLOMBIA, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005. Acuerdo de competitividad de la cadena de la piscicultura en Colombia. En: www.agrocadenas.gov.co/piscicultura/documentos/acuerdo_piscicultura.pdf visitado abril de 2009.

COLOMBIA. Los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 1594 de 1984 (Junio 26). Por el cual se reglamenta el Título I de la ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III – Libro II del Título III de la Parte II Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto al uso del agua y residuos líquidos. Diálogo oficial. Bogotá, D.C, 1984. N.º. 36700.

COLOMBIA. Los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 2115 de 2007 (Junio 22). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. por los Decretos-ley 205 de 2003 y 216 de 2003, los artículos 3º, 8º parágrafo 1º, 9º parágrafo 4º y 14 del Decreto 1575 de 2007. Diálogo oficial. Bogotá, D.C.2007.

CONSEJO NACIONAL DE POLITICA ECONOMICA Y SOCIAL (CONPES). Acciones Prioritarias y Lineamientos Para La Formulación Del Plan Nacional De Manejo De Aguas Residuales. Documento 3177. Bogotá DC. 2002.

COSTA Lourdes. SANTOS Conceição. CARRAPIÇO Francisco. Biomass characterization of *Azolla Filiculoides* grown in natural ecosystems and wastewater. Biology. Ecology and management of aquatic plants. Portugal. 1999. Pág. 323–327.

DA SILVA. José Américo. Fitotratamento de efluente de aquacultura com *Azolla Filiculoides*. Porto Alegre, Brasil.2006. Pág. 13-15,27, 30-32, 40.

DE LA CRUZ, Carlos Andrés y SALAZAR, Andrés Felipe. Caracterización y estudio de tratabilidad del efluente de estaciones piscícolas, Trabajo de grado Ingeniería Ambiental. Popayán: Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Ingeniería Ambiental. 2007. Pág. 1-2

DE OLIVEIRA, Cassiano. Eficiência De Leito De Macrófitas Como Unidade De Polimento De Efluente De Indústria De Aditivos Para Ração. Universidad Estadual De Campinas. Facultad De Ingeniería Agrícola. Brasil. 2005. Pág. 1, 5, 15, 17,22.

EPA. Manual. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Environmental Protection Agency. EPA/625/R-99/010. Ohio. 2000. Pág.12-20,30-50.

ESPINAL, Carlós. MARTÍNEZ, Héctor. GONZALES; Fredy. La cadena de la piscicultura en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica 1991 –

2005. Documento de trabajo no 72. Bogotá D.C. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agro cadenas Colombia. Bogotá. 2005. Pág. 2.

ESPINOZA Y, R. GUTIERREZ. Agronomic characterization of *Azolla* accessions from Venezuela. Revista de la Facultad de Agronomía. V.23 No 2 Caracas-Venezuela. 2006.

ESTRADA, Hilda. La piscicultura tiene un horizonte productivo muy amplio en el departamento del atlántico. Colombia. 2005. Pág. 2-5.

FAO. The state of world fisheries and aquaculture. food and agriculture organization of the united nations (FAO). Roma. 2007. Pág. 3, 9, 16, 29, 34, 36, 107,116.

FAO. The state of world fisheries and aquaculture. Public Health and Aquatic Life Concerns. Chapter Eight Public Health and Aquatic Life Concerns. Roma. 2000. Pág. 218,219.

FAO. El papel de la acuicultura en la mejora de la seguridad alimentaria y la nutrición. Comité de seguridad alimentaria mundial, 29º período de sesiones. Roma. 12-14 mayo 2003.

FARAHBAKHS AZAD, N. MORISON, G. SALATI, E. Nutrient removal in a vertical upflow wetland in Piracicaba. v.29. Brasil. 2000. Pág.74-77.

Federación Colombiana de Acuicultores, (FEDEACUA). Diagnóstico sectorial para el cultivo de la tilapia y cachama. Neiva, Huila. 2001. Pág. 1

FERDOUSHI, Zannatul. HAQUE, Farhana. KHAN, Saleha, HAQUE Mahfuzul. The effects of two aquatic floating macrophytes (*Lemna* and *Azolla*) as biofilters of nitrogen and phosphate in fish ponds. Turkish journal of fisheries and aquatic sciences 8. Bangladesh. 2008. Pág. 253-258.

FERNANDEZ, J. DE MIGUEL, E. DE MIGUEL, J. CURT, M. Manual de Fitodepuración, filtros de macrofitas en flotación. Nuevos filtros verdes de macrófitos en flotación para la cuenca mediterránea. Proyecto Life. Capítulo 5. Madrid. 2004. Pág.61-77.

FORNI, C. CHEN, J. TANCION, I. GRILLI, M. Evaluation of the fern *Azolla* for growth, Nitrogen and Phosphorus removal from wastewater. Fujian - China . 2001. vol. 35. no. 6. Pág. 1592–1598.

FORNI, Cinzia. CASCONE, Antonella. FIORI, Maurizio. MIGLIORE, Luciana. Sulphadimethoxine and *Azolla Filiculoides Lam.*: a model for drug remediation. Roma, Italia. 2002. Pág. 3398–3403.

FREIRE, Ninoschtka. Calidad del Agua. Demanda bioquímica de oxígeno. (DBO₅) Presentación Powerpoint. 2009. En línea:
<http://74.125.47.132/search?q=cache:4EDzGVDyfDAJ:www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/123456789/1/123456789.pdf> Visitada en mayo de 2009.

GARZÓN D. Luis, 2000. Mi Página Pecuaria. LA PISCICULTURA. COLOMBIA. En: <http://www.geocities.com/sanfdo/piscicul.html>. Visitada en Julio de 2009.

GONZAGA, Gustavo, SILVA, Henry, MONTEIRO, Fernando. Efficiency of aquatic macrophytes to treat Nile tilapia pond effluents. Departamento de Ingeniería de pesca, departamento de ecología. Piracicaba, Brasil. 2006. V.63, No.5, Pág.433-438.

GREENWAY, M. The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia. Ecological engineering, v.25, Australia. 2006. Pág.501-509.

HADAD, H. MAINE, M. BONETTO, C. Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment. Chemosphere, V.63. 2006. Pág.1744-1753.

HUSSAR, G., PARADELA, A. JONAS, T. RODRIGUES, J. Tratamiento da agua de escoamento de tanque de piscicultura a través de leitos cultivados de vazão subsuperficial: análise da qualidade física e química. Brasil: 2005. Vol. 2. No1. Pág 46-59.

KERN, Maria Andrea. *Azolla* as a technology to improve the nitrogen use efficiency of lowland rice. University of Bonn. Center for Development Studies. Bonn. 2007. Pág.21-23.

LAYMAN. Nuevos filtros verdes con Macrofitas en flotación "*Macrophytes*". 15 de Noviembre de 2005. Pág. 3,6.

LEAL, M. SOSA, R. DOMINGUEZ, P. MOLINET, Y. Una nota sobre la tecnología y construcción de estanque para plantas acuáticas. Instituto de Investigaciones Porcinas. Habana, Cuba. 1993. Pág 1-3.

LENTI, Javier. CALDERON, Abelardo. Evaluación de parámetros bioquímicos y morfogenéticos en la simbiosis *Azolla Filiculoides* – *Anabaena Azollae* como respuesta a la interacción de la calidad de luz y dos niveles de nitrógeno. Universidad Nacional Agraria La Molina. Ecología Aplicada. 2002 V. 1. No. 001. Perú. 2002. Pág. 89-94.

LIN, Y.F. JING, S.R. LEE, D.Y. CHANG, Y.F. CHEN, Y.M.; SHIH, K.C. performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate. *Aquaculture*, v.134, Pág.411-421, 2005.

LIU, Xiaofeng. CHEN, Min. BIAN, Zuliang. LIU, Chung-chu. Studies on urine treatment by biological purification using *Azolla* and UV photocatalytic oxidation. China.2007.Pàg. 783–786.

LÓPEZ, Carlos., CARVAJAL, Dewin., BOTERO, Mónica. Red tilapia (*Oreochromis spp*) masculinization by immersion using 17 alpha-methyltestosterone. Grupo de investigación en ciencias animales - GRICA. Escuela de producción agropecuaria, facultad de ciencias agrarias, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2007. Pág. 318-320.

LY, Julio. Macrófitas acuáticas flotantes en sistemas integrados de producción animal. Alimentación no convencional para monogástricos en el trópico. Habana, cuba. 2004. Pàg. 89-100.

MARTINEZ, Freddy. Parámetros importantes a controlar en un sistema de cultivo de peces. Curso de granjas integrales. Tecnología en conservación y manejo de suelos. Universidad del Valle. 2008. Presentación: Power Point. Santiago de Cali, Septiembre de 2008.

MASOOD, Amjad. SHAH, Nisar. ZEESHAN, Mohd. ABRAHAM, G. Differential response of antioxidant enzymes to salinity stress in two varieties of *Azolla* (*Azolla Pinnata* and *Azolla Filiculoides*) *Departamento de Botánica, Allahabad Agriculture Institute-Deemed University, Allahabad 211007, India.* 2005. Pág.217-219.

MONTAÑO. Mariano. Estudio de la aplicación de *Azolla Anabaena* como bioabono en el cultivo de arroz en el Litoral ecuatoriano. Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales (ICQA). Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Revista Tecnológica ESPOL, Vol. 18, N. 1. 2005. Guayaquil, Ecuador .Pág. 147-151.

MOSTAFA, E.M. HASSAN, A.M.A. Effect of Chilling on Growth and Nitrogen Assimilation in *Azolla Caroliniana*. Departamento de botánica. Facultad de ciencias. Universidad de Alexandria. Egipto. 2006. Pág. 641- 646.

NAVAS M, GUTIÉRREZ R, BISBAL E. Evaluation of several types of native *Azolla* in Venezuelan soils with vocation of use for rice cultivation. Registro científico nº 2596. *Simposio* nº:13A. 2000. Presentación: Poster.

NIMUKUNDA, F. BOTERO, R. YEOMANS, J. CORTÉS, G. Manual para la descripción y el mantenimiento del sistema de descontaminación productiva de las aguas residuales provenientes de las actividades pecuarias. Universidad Earth. Costa Rica.2005. Pág. 2,6-8,16.

OJEDA, E *et al.* Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia Recursos hídricos, agua Potable y saneamiento. (2000) Texto de internet disponible en : www.censat.org/Documentos/Agua/Remendar_Agua.pdf. Visitado Abril 2009.

PABBY, Anjuli. DUA, Saroj. SINGH, Amrik. Changes in ammonia-assimilation enzymes in response to different nitrate levels in *Azolla Pinnata* and *A. Microphylla*. Department of Botany. University Chandigarh. India.2001.Pàg. 899-903.

PARDO, Sandra. SUAREZ, Héctor. SORIANO, Eduardo. Tratamiento de efluentes: una vía para la acuicultura responsable. Revista MVZ, Córdoba, enero – junio. 2006, Vol. 11. Pág. 20-25.

PAEZ, Federico. MONTARO, Yovani. BOJORQUEZ, Humberto. Intercambio de agua, fósforo y material suspendido entre el sistema lagunar del puerto de Mazatlán y las aguas costeras adyacentes. México. Revista internacional. Contaminación ambiental .1990; 6:19-32.

PIEDRAHITA, R.H. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture*, V.226, Pág. 35-44, 2003.

POT. Plan de ordenamiento territorial municipio 2002-2012.Municipio de Popayán. Secretaria de planeación. Mapa de uso potencial del suelo. Cartografía rural.escala1:50000.elaborado octubre de 2001.plano R 31/56.

REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO (RAS – 2000). Sección II. Título E. Tratamiento de Aguas Residuales.

República de Colombia. Ministerio de desarrollo económico. Dirección de agua potable y saneamiento básico. Bogotá. 2000.

RODRÍGUEZ, Celia. DÍAZ, Miguel. GUERRA, Luis. HERNÁNDEZ, Julia. Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales. Centro de investigaciones hidráulicas. Facultad de Ingeniería Química. Instituto superior politécnico "José a. Echeverría. La habana, cuba.2001. Pág. 1,3.

SAAVEDRA, María Auxiliadora. Manejo del cultivo de tilapia. Managua-Nicaragua. 2006. Pág. 6,13.

SALAMANCA, G. OSORIO, M. HENAO, C. REYES, L Y BOTERO, C. Kamaboko como oferta nutricional de alto valor biológico a partir de cachama (*colossoma sp*) y tilapia (*oreochromis sp*). II congreso iberoamericano sobre seguridad alimentaria .v congreso español de ingeniería de alimentos. Barcelona, 5 a 7 de noviembre de 2008. España. 2008. Pág.2.

SEOÁNEZ, Mariano. Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo. Ingeniería del medio Ambiente. Ediciones Mundi-prensa. España. 2005. Pág. 79,103.107, 108, 216, 294, 321,439.

SPELLMAN, F.R. Coliforms in microbiology for water/wastewater operators, chapter 12. technomic publishing company, inc. Lancaster, Pennsylvania. 2002. Pág.163-167.

Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 20th, Edic. APAPH, AWWA, WEF. 1998.

STEPHENS, W. FARRIS, J.L. A biomonitoring approach to aquaculture effluent characterization in channel catfish fingerling production. Aquaculture, V. 241, 2004. Pág.319-330.

SOTO, D. AGUILAR. MANJARREZ, J. HISHAMUNDA, N. Building an ecosystem approach to aquaculture. FAO, Universitat de les Illes Balears Expert Workshop. Palma de Mallorca, Spain. 2007. Pàg. 218.

TANDON H Y ROY R. Integrated nutrient management - A glossary of terms. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura, la Alimentación y la Organización para el Desarrollo y Concertación en materia de Fertilizantes, Nueva Delhi, 2004. Pág. 175.

TEICHERT-CODDINGTON D, ROUSE D, POTTS A, BOYD C. Treatment of harvest discharge from intensive shrimp ponds by settling. *Aquacultural engineering* .1999. Pág. 147-161.

TRUE, B.; JOHNSON, W.; CHEN, S. Reducing phosphorus discharge flow through aquaculture I: facility and effluent characterization. *Aquacultural Engineering*. 2004. V. 32. Pág.129-144

WATANABE Iwao. Scenario de uso de *Azolla* grennmanure como el arroz el el norte de Vietnam en 1979. International Rice Research Institute. Publicado 2005. Pág. 10-16.

ZHANG, Xin. LIN, Ai-Jun. ZHAO, Fang-Jie. XU, Guo-Zhong. DUAN, Gui-Lan. ZHU, Yong-Guan. Arsenic accumulation by the aquatic fern *Azolla*: Comparison of arsenateuptake, speciation and efflux by *A. caroliniana* and *A. filiculoides* .Arsenic accumulation and efflux differ between strains of the aquatic fern *Azolla*. Departamento de estudios ambientales, ciencia e ingeniería. University of Chemical Technology, Beijing China. 2008. Pág. 1149 -1150.

ANEXOS

Anexo A Características del Efluente de la estación piscícola “La Yunga” (influyente)

MUESTRA No	O.D (mg/l)	pH (unid)	COND (μS/cm)	T (° C)	SST (mg/L)	PT (mg/L)	PO₄ (mg/L)	NT (mg/L)	NH₃.N (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
1	3,4	6,9	12,4	21	89,6	0,116	0,357	5,91	1,48	6,83	56
2	2,9	6,6	23,2	22,6	193	0,153	0,47	1,48	0,49	3,54	152
3	3,3	7,4	20	21,1	138,6	0,244	0,748	0,49	0,49	23,05	39
4	4,6	5,9	32,3	22,1	112	0,181	0,553	5,91	0,99	7,96	406
5	4,7	6	30,5	22,1	119,4	0,18	0,55	1,97	0,49	16,16	144
6	5,9	6,2	51	23	88,4	0,13	0,397	4,93	0,49	22,1	132
7	4,5	7,6	59,3	22,4	162,6	0,152	0,467	2,46	0,49	35,41	90
8	5,2	6,7	57,4	22,2	147	0,127	0,39	7,39	1,48	13,54	100
9	4,5	6,6	43,7	22,1	74,8	0,086	0,263	7,39	0,49	18,42	160
10	2,8	5,4	53,3	21	73,6	0,061	0,186	3,45	0,99	16,4	150
PROMEDIO	4,18	6,5	38,31	22,0	119,9	0,143	0,438	4,14	0,8	16,3	143
MAX	5,9	7,6	59,3	23	193	0,244	0,748	7,39	1,48	35,41	406
MIN	2,8	5,4	12,4	21	73,6	0,061	0,186	0,49	0,49	3,54	39

Anexo B Resultados de los parámetros tomados en el tanque 1

MUESTRA No	O.D (mg/L)	pH (unid)	COND (mS/cm)	T (° C)	SST (mg/L)	PT (mg/L)	PO₄ (mg/L)	NT (mg/L)	NH₃-N (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Producción de biomasa (g/m²d)
1	2.1	6.8	38.7	21.4	26.4	0.197	0.587	6.9	6.41	25.02	202	229.7
2	1	4.8	29.2	23.2	49.5	0.153	0.469	5.91	3.94	8.17	52	106.2
3	1.3	6.1	33.2	24.8	42.6	0.146	0.446	4.44	0.49	11.96	62	52.1
4	1.7	7.1	44.6	22.1	61.5	0.088	0.27	1.48	0.99	3.71	42	21.3
5	1.4	6	36.9	21.1	23	0.066	0.202	3.45	2.96	5.94	48	114.3
6	3.2	5.5	34.5	21.1	63.5	0.073	0.224	1.48	0.99	8.91	8	64
7	4.6	6.9	29.7	19.9	48	0.094	0.287	8.87	0.49	5.05	30	60.2
8	1.1	6.4	24.4	20.6	61	0.097	0.297	3.58	3.14	4.01	20	103.5
9	1.5	6.8	29.5	22.6	80	0.075	0.231	3.14	2.69	5.72	24	26.2
10	2.5	7.6	19.5	21.7	134.6	0.044	0.133	0.45	0.45	8.32	45	22.9
11	2.3	6.4	28.1	20.4	147.9	0.296	0.906	21.5	0.9	17.7	94	-
12	2.2	7.9	25.9	21	143.2	0.147	0.45	3.45	2.46	16.04	124	-
13	6.2	6.9	31.4	17.7	91.6	0.133	0.409	15.28	14.29	24.95	126	-
14	2.2	5.5	25.1	20.8	46	0.132	0.405	3.45	0.99	14.02	68	-
15	1.5	6.6	55.9	21.1	76.2	0.14	0.429	2.96	0.99	13.07	102	-
16	0.7	7.5	56.6	24.5	145.4	0.132	0.405	2.96	1.48	5.35	58	-
17	2.2	7.4	56.3	21.3	172.3	0.181	0.556	3.94	2.46	7.01	76	-
18	5.6	6.7	58.8	20.6	112.4	0.106	0.326	2.96	0.99	7.43	80	-
19	3	6.7	47.5	20.3	107.2	0.074	0.227	2.96	0	5.2	40	-
20	2.8	6.9	55.8	21.8	81	0.058	0.177	3.94	0.49	-	-	-
21	1.7	6.5	-	18.8	66	0.081	0.247	-	-	-	-	-
22	2.1	6.5	-	19.7	132	0.07	0.214	-	-	-	-	-
23	2.7	6.2	-	20.3	60.6	-	-	-	-	-	-	-
PROMEDIO	2.42	6.60	38.08	21.2	85.7	0.117	0.359	5.2	2.38	10.40	68.5	80.0
MÁX	6.2	7.9	58.8	24.8	172.3	0.296	0.906	21.5	14.29	25.02	202	229.7
MÍN	0.7	4.8	19.5	17.7	23	0.044	0.133	0.45	0	3.71	8	21.3

Anexo C Resultados de los parámetros tomados en el tanque 2

MUESTRA No	O.D (mg/L)	pH (unid)	COND (µS/cm)	T (° C)	SST (mg/L)	PT (mg/L)	PO₄ (mg/L)	NT (mg/L)	NH₃-N (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Producción de biomasa (g/m²d)
1	1,8	6,5	32,7	21,2	33,3	0,234	0,717	6,41	6,41	24,5	84	268,9
2	1,1	4,8	21,3	22,9	9,4	0,158	0,485	8,87	6,9	7,13	96	101,9
3	1,5	5,3	25,5	23,9	18,2	0,086	0,264	4,93	0,99	10,02	74	200,8
4	1,8	6,9	32,8	22	20,1	0,057	0,175	2,96	2,46	4,38	38	22,9
5	1,7	10	36,7	20,8	11,6	0,057	0,175	1,48	1,48	4,23	22	128,9
6	2,6	5,3	34,1	20,5	31,8	0,052	0,158	3,45	2,46	5,87	30	75,4
7	3,3	6,7	31,1	20,5	37,8	0,067	0,206	9,36	4,44	4,23	32	91,6
8	1	6,4	26,3	20,1	31,2	0,052	0,158	2,24	1,34	1,49	60	116,5
9	1,3	6,5	28,8	21,8	42,2	0,041	0,125	8,96	3,58	4,38	30	0
10	2,4	5,3	19,6	21	111,7	0,046	0,14	0,9	0,9	5,72	53	0
11	1,7	6,7	27	19,7	176,7	0,021	0,063	6,27	5,38	22,46	74	-
12	1,8	7,6	23,6	20,8	70,8	0,189	0,578	5,91	1,48	16,87	146	-
13	6	5,5	27,4	20,6	117	0,119	0,365	4,44	3,94	23,76	134	-
14	1,6	5,6	21,2	20,5	55,8	0,114	0,351	2,46	1,97	8,67	80	-
15	1,5	6,7	57,4	20,8	70,6	0,114	0,349	3,45	1,48	10,93	92	-
16	0,5	7,4	55,6	23,6	125,4	0,074	0,227	3,94	2,46	7,37	40	-
17	2,2	7,5	55,1	21,8	135,2	0,175	0,535	4,44	3,45	5,57	70	-
18	4,9	6,4	57,9	20,6	104,2	0,078	0,239	3,45	1,48	4,46	86	-
19	2,4	6,9	48,6	19,9	64	0,046	0,142	3,45	1,97	5,64	32	-
20	1,8	6,7	51,7	18,6	62,6	0,057	0,175	4,44	0,99	-	-	-
21	1,8	6,2	-	20,1	43,2	0,056	0,173	-	-	-	-	-
22	1,76	6,2	-	19,6	67,8	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	50,4	-	-	-	-	-	-	-
PROMEDIO	2,11	6,5	35,72	21,0	64,8	0,090	0,276	4,6	2,8	9,4	67	100,7
MÁX	6	10	57,9	23,9	176,7	0,234	0,717	9,36	6,9	24,5	146	268,9
MÍN	0,5	4,8	19,6	18,6	9,4	0,021	0,063	0,9	0,9	1,49	22	0

Anexo D Resultados de los parámetros tomados en el tanque 3

MUESTRA No	O.D (mg/L)	pH (unid)	COND (µS/cm)	T (° C)	SST (mg/L)	PT (mg/L)	PO4 (mg/L)	NT (mg/L)	NH₃-N (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Producción de biomasa (g/m²d)
1	1,6	6,8	30,5	21,6	19,3	0,216	0,663	4,93	3,45	22,8	88	91,6
2	1,2	4,8	22,2	23	10,3	0,152	0,467	10,35	3,94	7,13	72	0
3	2	6	25,2	24,1	3,8	0,07	0,214	6,41	0,49	8,99	48	87,8
4	2,3	6,8	28,8	22,1	18,1	0,059	0,181	3,94	3,45	4,6	22	0
5	2,1	5,8	35,2	20,8	23	0,051	0,156	0,99	0,49	2,97	16	30
6	3,3	5,2	32,6	20,6	41	0,039	0,121	4,93	2,96	4,6	52	0
7	4,3	6,7	29,4	20,6	37,7	0,059	0,181	9,86	5,91	0,74	24	57,5
8	1,5	6,4	25,4	20	45,3	0,031	0,094	1,79	1,79	1,41	70	146,2
9	1,3	6	28,6	21,7	43,2	0,031	0,094	9,86	4,48	2,38	36	9,4
10	2,2	6,6	18,5	20,7	106	0,04	0,123	1,34	0,45	4,23	72	14,3
11	1,8	6,9	25,7	19,5	136,8	0,029	0,088	12,99	3,14	18,42	64	-
12	1,8	6,6	26,3	20,7	82	0,198	0,607	3,45	1,97	14,26	162	-
13	4,2	5,3	26,9	20,4	130,8	0,124	0,38	3,94	1,97	17,7	114	-
14	2	5,3	19,8	20,6	45,8	0,115	0,353	3,45	0,49	4,75	14	-
15	1,6	5,3	56,8	20,7	63,4	0,102	0,311	1,97	1,48	10,22	82	-
16	0,4	7,2	54,7	22,8	89	0,048	0,146	5,91	1,97	4,75	74	-
17	2,5	7,2	55,1	21,3	77,8	0,177	0,541	2,46	1,97	5,12	66	-
18	5,2	6,5	54,6	20,5	94,4	0,054	0,166	1,97	0,99	3,71	58	-
19	3,3	6,8	48	21,1	58,2	0,046	0,142	3,94	2,46	4,08	20	-
20	1,8	6,2	52,1	18,8	54,8	0,066	0,202	4,44	1,97	-	-	-
21	2,1	6,1	-	20	38,2	0,051	0,156	-	-	-	-	-
22	2,5	6,1	-	19,7	48,8	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	41,4	-	-	-	-	-	-	-
PROMEDIO	2,32	6,2	34,82	21,0	56,9	0,084	0,256	4,9	2,3	7,5	61	43,7
MÁX	5,2	7,2	56,8	24,1	136,8	0,216	0,663	12,99	5,91	22,8	162	146,2
MÍN	0,4	4,8	18,5	18,8	3,8	0,029	0,088	0,99	0,45	0,74	14	0

Anexo E Resultados de los parámetros tomados en el tanque 4

MUESTRA No	O.D (mg/L)	pH (unid)	COND (μS/cm)	T (° C)	SST (mg/L)	PT (mg/L)	PO₄ (mg/L)	NT (mg/L)	NH₃-N (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Producción de biomasa (g/m²d)
1	2,4	6,6	26,4	21,6	32,6	0,218	0,67	4,93	3,45	23,76	76	88,3
2	2,8	4,9	20	22,9	30,7	0,133	0,409	6,9	3,45	6,53	34	54,3
3	3	6	22,8	24,1	15,4	0,066	0,204	8,38	0,49	6,53	58	73,8
4	2,9	6,8	25,3	22	19,8	0,045	0,137	2,96	2,96	4,53	52	71,6
5	3	6,6	33,2	20,8	18,4	0,052	0,158	0,99	0,99	3,12	12	62,4
6	3,3	6,1	30,9	21,2	36,2	0,043	0,131	3,94	3,45	3,86	44	0
7	4,9	6,8	27,9	22,4	39,6	0,047	0,144	8,87	4,93	4,6	32	0
8	2,2	6,4	24,9	20,3	37,1	0,031	0,096	0,9	0,45	3,27	40	137
9	2	6,7	27,9	21,8	36,4	0,033	0,102	11,65	4,93	0,3	42	29,4
10	2,6	7	18	20,8	96,4	0,071	0,216	4,48	1,34	5,79	64	3,5
11	1,5	6,7	26,5	19,5	152,8	0,001	0,003	4,93	4,03	15,92	32	-
12	1,8	7,4	27,9	20,8	71	0,182	0,558	4,44	2,46	13,31	14	-
13	4,3	5,2	27	20,5	136,2	0,102	0,311	4,44	0,99	14,26	178	-
14	2,3	5,4	19,2	20,8	43	0,11	0,336	5,91	1,97	9,03	52	-
15	1,6	6	54,6	21,1	68,6	0,175	0,537	4,93	3,45	6,06	50	-
16	0,4	7,1	53,2	22,3	64,8	0,152	0,465	3,94	2,96	3,09	72	-
17	4,8	6,4	54	20,4	51,3	0,066	0,202	3,45	1,97	5,05	52	-
18	2,1	6,8	54,3	19,8	78,8	0,048	0,146	1,48	1,48	6,39	34	-
19	4,6	6,5	47,4	20,8	53,8	0,042	0,129	3,94	1,48	2,97	16	-
20	2,2	6,6	49,2	18,9	44,2	0,048	0,148	4,93	1,97	-	-	-
21	2	6,2	-	20,1	32,6	0,042	0,129	-	-	-	-	-
22	1,6	6,4	-	20,2	45,6	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-	-	-
PROMEDIO	2,65	6,4	33,53	21,1	54,1	0,081	0,249	4,8	2,5	7,3	50	52,0
MÁX	4,9	7,4	54,6	24,1	152,8	0,218	0,67	11,65	4,93	23,76	178	137
MÍN	0,4	4,9	18	18,9	15,4	0,001	0,003	0,9	0,45	0,3	12	0

Anexo F Resultados de los parámetros tomados en el tanque 5

MUESTRA No	O.D (mg/L)	pH (unid)	COND (µS/cm)	T (° C)	SST (mg/L)	PT (mg/L)	PO₄ (mg/L)	NT (mg/L)	NH₃-N (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Producción de biomasa (g/m²d)
1	3,1	6,2	27,1	21	26,4	0,215	0,659	3,94	2,96	23,61	64	77,5
2	2,4	4,9	16,2	23,1	18,3	0,118	0,361	6,9	4,93	8,84	58	78,1
3	3,1	6,2	22,9	23,9	4,5	0,055	0,169	3,94	1,97	7,05	88	60,8
4	3,4	6,6	17,5	22,2	14	0,048	0,148	1,97	1,97	3,34	26	44
5	4,2	5,6	32,1	20,4	31,8	0,05	0,154	0,49	0,49	3,19	4	22,4
6	4,1	5,1	28,7	21	35,7	0,041	0,127	3,45	2,96	3,94	50	0
7	5,8	6,8	25,2	22	37	0,041	0,125	7,39	2,22	2,82	26	13,2
8	3,2	6,4	26,8	20,3	33,8	0,016	0,048	4,93	3,58	2,23	60	77
9	2,7	6,7	28	21,8	31,4	0,039	0,119	16,13	7,62	0,15	50	19,1
10	2,4	6,2	16,6	20,5	86,6	0,059	0,181	7,62	2,24	4,46	70	34,8
11	1,2	6,6	28,1	19,1	128,7	0	0,001	6,72	1,34	14,5	14	-
12	2	6,8	25,7	20,9	54,2	0,089	0,272	2,96	2,46	13,43	132	-
13	4,3	5,6	25,3	20,4	45	0,083	0,255	1,48	0,49	12,71	96	-
14	2,1	5,3	18,9	20,2	30,6	0,108	0,332	0,49	0,49	5,94	42	-
15	1,6	6,1	52,3	20,9	67,4	0,046	0,142	4,93	1,97	8,32	60	-
16	3,1	7,1	52	21,3	69	0,148	0,452	5,42	2,46	5,7	46	-
17	4,8	6,2	53,7	20,2	49,8	0,048	0,146	4,44	1,48	2,26	70	-
18	1,9	6,3	53,2	19,3	71,6	0,029	0,09	2,96	2,96	4,6	96	-
19	3,7	6,4	44,5	21	49,8	0,052	0,16	2,96	1,97	4,9	16	-
20	2,2	6,4	47,6	18,8	28	0,023	0,069	5,42	1,48	-	-	-
21	2,8	6,4	-	22,3	37,8	0,215	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	41,2	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	22,4	-	-	-	-	-	-	-
PROMEDIO	3,05	6,2	32,12	21,0	44,1	0,073	0,201	4,73	2,4	6,9	56.2	42,7
MÁX	5,8	7,1	53,7	23,9	128,7	0,215	0,659	16,13	7,62	23,61	132	78,1
MÍN	1,2	4,9	16,2	18,8	4,5	0	0,001	0,49	0,49	0,15	4	0

Anexo G Estadísticos descriptivos de los parámetros analizados en la planta piloto de la estación piscícola la Yunga

	N	Mínimo	Máximo	Media Global	Desv. típ.
Nitrógeno Total	110	,45	21,50	4,7831	3,34073
Oxígeno Disuelto	120	,40	6,20	2,6438	1,30095
pH	120	4,80	10,00	6,3933	,75512
Conductividad	110	12,40	59,30	35,1682	13,37143
Temperatura	120	17,70	24,80	21,1058	1,28523
Sólidos	125	3,80	193,00	65,8504	42,42105
Fosforo Total	116	,00	,30	,0939	,05996
Fosfatos	115	,00	,91	,2844	,18099
Nitrógeno Amoniacal	110	,00	14,29	2,3100	1,94689
DBO	105	,15	35,41	9,0656	7,00997
DQO	105	4,00	406,00	68,3714	52,38692
CRECIMIENTO	50	,00	268,90	63,8260	60,06416
N válido (según lista)	50				

Anexo H Producción de biomasa de *Azolla*

MUESTRA No	Tanque 1 (g/m ² día)	Tanque 2 (g/m ² día)	Tanque 3 (g/m ² día)	Tanque 4 (g/m ² día)	Tanque 5 (g/m ² día)
1	229,7	268,9	91,6	88,3	77,5
2	106,2	101,9	0,0	54,3	78,1
3	52,1	200,8	87,8	73,8	60,8
4	21,3	22,9	0,0	71,6	44,0
5	114,3	128,9	30,0	62,4	22,4
6	64,0	75,4	0,0	0,0	0,0
7	60,2	91,6	57,5	0,0	13,2
8	103,5	116,5	146,2	137,0	77,0
9	26,2	0,0	9,4	29,4	19,1
10	22,9	0,0	14,3	3,5	34,8
PROMEDIO	80,0	100,7	43,7	52,0	42,7

Anexo I Tasa relativa de crecimiento de *Azolla* (TRC)

MUESTRA No	Tanque 1 (d⁻¹)	Tanque 2 (d⁻¹)	Tanque 3 (d⁻¹)	Tanque 4 (d⁻¹)	Tanque 5 (d⁻¹)
1	0,043	0,048	0,021	0,020	0,018
2	0,023	0,023	0,000	0,013	0,018
3	0,013	0,039	0,020	0,017	0,014
4	0,005	0,006	0,000	0,017	0,011
5	0,025	0,027	0,008	0,015	0,006
6	0,015	0,017	0,000	0,000	0,000
7	0,014	0,021	0,014	0,000	0,003
8	0,023	0,025	0,030	0,029	0,018
9	0,007	0,000	0,002	0,007	0,005
10	0,006	0,000	0,004	0,001	0,009
PROMEDIO	0,017	0,021	0,010	0,012	0,010

Anexo J Tiempo de duplicación de *Azolla* (TD)

MUESTRA	Tanque 1 (d)	Tanque 2 (d)	Tanque 3 (d)	Tanque 4 (d)	Tanque 5 (d)
1	3,8	3,4	8,0	8,2	9,2
2	7,0	7,3	0,0	12,6	9,1
3	13,1	4,2	8,2	9,6	11,4
4	30,1	28,1	0,0	9,8	15,2
5	6,6	6,0	21,8	11,1	28,7
6	10,9	9,4	0,0	0,0	0,0
7	11,5	8,0	12,0	0,0	47,9
8	7,2	6,5	5,4	5,7	9,2
9	24,8	0,0	66,6	22,2	33,4
10	28,1	0,0	44,4	178,9	18,9
PROMEDIO	14,3	7,3	16,6	25,8	18,3

Anexo K Cálculo del Peso Seco de *Azolla*

MUESTRA No	Tanque 1 (g)	Tanque 2 (g)	Tanque 3 (g)	Tanque 4 (g)	Tanque 5 (g)
1	15,5016	15,5016	15,5016	15,5016	15,5016
2	30,7944	33,408	21,6	21,384	20,664
3	22,572	22,284	15,12	19,116	20,7
4	18,972	28,872	21,348	20,412	19,548
5	16,92	17,028	15,228	20,268	18,432
6	23,112	24,084	17,496	19,656	16,992
7	19,764	20,52	15,48	14,76	14,868
8	19,512	21,6	19,332	14,652	16,38
9	22,392	23,256	25,236	24,624	20,628
10	17,244	15,336	16,128	17,46	16,776
PROMEDIO	17,028	15,336	16,452	15,732	17,82

Anexo L Promedios generales de los parámetros medidos en cada tanque

TANQUE	O.D (mg/L)	pH (unid)	COND (mS/cm)	T (° C)	SST (mg/L)	PT (mg/L)	PO₄ (mg/L)	NT (mg/L)	NH₃-N (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Producción de biomasa (g/m²d)
0*	4.18	6.53	38.31	21.96	119.9	0.143	0.4381	4.138	0.788	16.341	142.9	
1	2.42	6.60	38.08	21.17	85.73	0.12	0.36	5.16	2.38	10.40	68.47	80.04
2	2.11	6.50	35.72	20.97	64.83	0.09	0.28	4.59	2.78	9.35	67.00	100.69
3	2.32	6.21	34.82	20.97	56.92	0.08	0.26	4.95	2.29	7.52	60.74	43.68
4	2.65	6.39	33.53	21.05	54.14	0.08	0.25	4.82	2.46	7.28	50.21	52.03
5	3.05	6.19	32.12	20.98	44.13	0.07	0.20	4.73	2.40	6.95	56.21	42.69
PROMEDIOS	2.79	6.40	35.43	21.18	70.94	0.10	0.30	4.73	2.18	9.64	74.26	63.83

Anexo M Resumen de las pruebas estadísticas realizadas

PARAMETRO	TANQUE 0*	TANQUE 1	TANQUE 2	TANQUE 3	TANQUE 4	TANQUE 5	PRUEBA PARAMÉTRICA	PRUEBA NO PARAMÉTRICA	GRADO DE SIGNIFICANCIA
O.D (mg/L)	0.438	0.002	0	0.033	0.115	0.712	-	Prueba de Kruskal-Wallis	P=0
pH (unid)	0.937	0.599	0.013	0.196	0.08	0.076	PRUEBA DE TUKEY	-	P>0.05
COND. (mS/cm)	0.419	0.028	0.008	0.003	0.002	0.005	-	Prueba de Kruskal-Wallis	P=.0380
T (° C)	0.132	0.307	0.122	0.183	0.557	0.632	PRUEBA DE TUKEY	-	P>0.05
SST (mg/L)	0.256	0.134	0.065	0.158	0.001	0.035	PRUEBA DE TUKEY	-	P>0.05
PT (mg/L)	0.937	0.011	0.006	0.001	0.008	0.005	PRUEBA DE HOMOGENIEDAD DE VARIANZA	-	P>0.05
PO ₄ (mg/L)	0.93	0.011	0.006	0.001	0.007	0.005	PRUEBA DE HOMOGENIEDAD DE VARIANZA	-	P>0.05
NT (mg/L)	0.415	0	0.129	0.018	0	0.003	-	Prueba de Kruskal-Wallis	P=0.873
NH ₃ -N (mg/L)	0.001	0	0.009	0.16	0.33	0.003	-	Prueba de Kruskal-Wallis	P=0.06
DBO (mg/L)	0.721	0.005	0.001	0.003	0.003	0.006	-	Prueba de Kruskal-Wallis	P=0.013
DQO (mg/L)	0.004	0.044	0.107	0.073	0	0.738	-	Prueba de Kruskal-Wallis	P= 0.009
TRC	-	0.041	0.447	0.056	0.395	0.249	PRUEBA DE HOMOGENIEDAD DE VARIANZA	-	P>0.05

ANEXO N. Fotos estación piscícola La Yunga y planta piloto



Foto 4. Tilapia Roja.



Foto 5. Estanque abastecedor



Foto 6. Vista frontal Planta piloto



Foto 7. Luminosidad en Tanque 4 y 5

