

**EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE REMOCION DE BACTERIAS
COLIFORMES DE UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO
SUB- SUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE
UNA TRUCHIFACTORIA**

DIANA MERCEDES MORA

SANDRA MILENA BARCO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

POPAYÁN

**EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE REMOCION DE BACTERIAS
COLIFORMES DE UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO
SUB- SUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE
UNA TRUCHIFACTORIA**

POR

DIANA MERCEDES MORA

SANDRA MILENA BARCO

DIRECTOR

Mg. GERARDO I. NAUNDORF SANZ

PROFESOR DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

**Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al Título de Biólogo**

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

POPAYÁN

NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y los jurados han
revisado este documento
escucharon la sustentación del
mismo por sus autores y lo
encontraron satisfactorio

Mg. Gerardo Naundorf Sanz

Sandra Morales

Sandra Rivas Z.

Popayán, 20 de Marzo de 2009

*A mis padres por su apoyo infinito,
A mi hermano por estar siempre pendiente de mi y
colaborándome en lo que necesitara.*

Sandra

*A mis padres y a mi familia por brindarme
siempre su apoyo y a ayuda incondicional,
A mi esposo y a mi hija por su amor,
y todos aquellos que me colaboraron
para cumplir esta meta.*

Diana

AGRADECIMIENTOS

Muchas personas e instituciones han contribuido, de una u otra forma, a la elaboración de este trabajo. A todas ellas queremos expresar nuestros más sincero agradecimientos:

De forma especial, a nuestro Director Mg. Gerardo Naundorf Sanz, profesor Universidad del Cauca por su constante apoyo, ayuda y orientación.

Al Mg. Javier Fernández, ingeniero ambiental Universidad del Cauca y Director del Proyecto Efluentes Piscícolas por su apoyo en la realización del proyecto.

A Andrés Salazar, ingeniero ambiental Universidad del Cauca y Coordinador del Proyecto Efluentes Piscícolas por su ayuda y colaboración.

A Hugo Nelson Arcila, estudiante de maestría en Recursos Hidrobiológicos Continentales por su ayuda y colaboración.

A la Universidad del Cauca, por los servicios prestados en el laboratorio de Microbiología del Departamento de Biología y al Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria del Departamento de Ingeniería Ambiental y a sus respectivos funcionarios de laboratorio.

Al Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca (Crepic) por su apoyo y financiación a través de la ejecución del proyecto aprobado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en la convocatoria de investigación de cadenas productivas año 2006.

Por último, queremos resaltar el apoyo de todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la realización del presente trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	15
1. JUSTIFICACION	18
2. OBJETIVOS	19
3. MARCO TEORICO	20
3.1. SISTEMA DE HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS	20
3.2. PRINCIPIOS GENERALES PARA CREAR HUMEDALES	22
3.3. SELECCIÓN DEL SITIO	23
3.4. COMPONENTES DEL HUMEDAL	23
3.4.1. AGUA	23
3.4.2. SUBSTRATOS, SEDIMENTOS Y RESTOS DE VEGETACIÓN	23
3.4.3. VEGETACION	24
3.4.4. MICROORGANISMOS	27
3.4.4.1. BACTERIAS	28
3.5. METODO DE MUESTREO	29
4. ANTECEDENTES	31
4.1. HISTORIA DE LA CONTAMINACIÓN	31
4.2. EXPERIENCIA PREVIA	32
5. METODOLOGIA	35
5.1. AREA DE ESTUDIO	35
5.2. CARACTERÍSTICAS DEL SEDIMENTADOR	36
5.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS HUMEDALES	37

5.3.1. OPERACION Y MANTENIMIENTO	39
5.3.2. VEGETACION	39
5.4. TECNICAS PARA ANALISIS MICROBIOLOGICAS	40
5.5. TRATAMIENTO ESTADISTICOS DE LOS DATOS	40
6. RESULTADOS Y DISCUSION	41
6.1. CARACTERIZACION MICROBIOLOGICA	41
6.1.1. COLIFORMES TOTALES	43
6.1.2. COLIFORMES FECALES	49
6.2. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA	54
7. CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFIA	62
ANEXOS	66

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Promedios de remoción de bacterias coliformes totales y fecales.	42
Tabla 2. Porcentajes de remoción de bacterias coliformes totales y fecales.	43
Tabla 3. Promedios de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoria	55
Tabla 4. Porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoria	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Hedychium coronarium</i> .	25
Figura 2. <i>Phragmites australis</i>	26
Figura 3. Fotografía satelital de la truchifactoría El Diviso.	35
Figura 4. Vista general del sedimentador.	36
Figura 5. Vista del perfil general y dimensiones de cada humedal	37
Figura 6. Fotografía de los humedales de flujo subsuperficial	38
Figura 7. Correlación entre las concentraciones de coliformes totales en sedimentador y caja de distribución.	45
Figura 8. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H1	47
Figura 9. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H2	48

Figura 10. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H3	49
Figura 11. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H1	51
Figura 12. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H2	52
Figura 13. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H3	53

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Muestreo 29/04/08.	66
Anexo B. Muestreo 09/05/08	67
Anexo C. Muestreo 13/05/08	67
Anexo D. Muestreo 16/05/08	68
Anexo E. Muestreo 20/05/08	68
Anexo F. Muestreo 06/06/08	69
Anexo G. Muestreo 10/06/08	69
Anexo H. Muestreo 17/06/08	70
Anexo I. Muestreo 24/06/08	70
Anexo J. Muestreo 04/07/08	71
Anexo K. Muestreo 08/07/08	72
Anexo L. Muestreo 11/07/08	72
Anexo M. Muestreo 15/07/08	73
Anexo N. Muestreo 18/07/08	73
Anexo Ñ. Muestreo 22/07/08	74
Anexo P. Muestreo 26/07/08	74

Anexo Q. Muestreo 29/07/08	75
Anexo R. Muestreo 01/08/08	75
Anexo S. Muestreo 05/08/08	76
Anexo T. Muestreo 12/08/08	76
Anexo U. Muestreo 15/08/08	77
Anexo V. Muestreo 22/08/08	77
Anexo W. Muestreo 26/08/08	78
Anexo X. Muestreo 29/08/08	78
Anexo Y. Muestreo 02/09/08	79
Anexo Z. Muestreo 05/09/08	79

EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE REMOCION DE BACTERIAS COLIFORMES DE UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUB- SUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA TRUCHIFACTORIA

RESUMEN

Con el fin de avanzar en la solución de la problemática de contaminación de las aguas por efectos del vertimiento de los residuos de la actividad piscícola, se propuso el montaje de una planta piloto del tipo humedales de flujo subsuperficial en la truchifactoría El Diviso, localizada en el corregimiento de Quintana, Municipio de Popayán. Los sistemas de flujo subsuperficial se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado para mejorar la calidad de los efluentes para tal efecto se utilizó el grupo de microorganismos coliformes como indicador de contaminación bacteriana, además se incluyó el uso de macrofitas como el *Hedychium coronarium* y *Phragmites australis* como variable de comparación. El objetivo principal fue estimar la capacidad de remoción de bacterias coliformes del sistema de tratamiento. Se encontró que la remoción de la contaminación biológica fue de 99.99% para los humedales en general, tanto para coliformes totales y fecales. Aunque no se encontró diferencias estadísticas, el *H. coronarium* mostró mejor eficiencia para el sistema, con un periodo de retención hidráulica de cuatro días como una variante adicional a este estudio.

La eficiencia de remoción de bacterias en el sistema de tratamiento mostro diferencia significativa estadísticamente ($p=0.000$), observándose una disminución en el número de coliformes totales y fecales, concluyéndose que el humedal contribuyo a mejorar la calidad del agua del efluente. Se recomienda el seguimiento y continuidad de este tipo de estudios, dado que los resultados obtenidos son preliminares.

Palabras claves: humedales, truchifactoria El Diviso, Flujo subsuperficial, macrofitas , coliformes totales, coliformes fecales.

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF REMOVAL OF BACTERIA COLIFORMS OF AN ARTIFICIAL WETLAND OF SUB-SURFACE FLOW TO THE WASTEWATER TREATMENT OF A TROUTFACTORY

ABSTRACT

In order to advance in solving the problem of water pollution cause by the effects of the dumping of waste from piscicultural farming, it was suggested the creation of a pilot plant subsurface flow wetlands type constructed in The Diviso troutfactory, located in Quintana, in the municipality of Popayán. Subsurface flow systems are designed to provide secondary or advanced treatment to improve the quality of effluent was used for this purpose the group of coliform organisms as an indicator of bacterial contamination, it was also includes the use of macrophytes as *Hedychium coronarium* and *Phragmites australis* as a variable for comparison. The main objective was to estimate the capacity of removal of coliform bacteria in the treatment system. It was found that the removal of biological contamination was 99.99% for wetlands in general, both for total and faecal coliforms. Although no statistical differences were found, *H. coronarium* showed a better efficiency for the system with a hydraulic retention period of four days as an additional option in this study.

The removal efficiency of bacteria in the treatment system showed statistically significant difference ($p = 0.000$), showing a decrease in total and faecal coliforms, concluded that the wetland helps to improve the water quality of effluent. It is recommended the monitoring and continuity of this type of studies, since the obtained results are preliminary.

Keywords: wetlands, The Diviso troutfactory, subsurface flow, macrophytes, total coliforms, faecal coliforms.

INTRODUCCION

Las aguas naturales poseen una amplia y diversa microbiota, compuesta por bacterias, protozoos, algas, hongos y virus, con funciones ecológicas de gran importancia para los ecosistemas acuáticos. Las poblaciones microbianas presentan numerosas interacciones biológicas, que mantienen regulado el número de individuos de cada población y facilitan los procesos homeostáticos de los ecosistemas acuáticos. La incorporación de nutrientes y de poblaciones microbianas no naturales altera el equilibrio biológico del sistema y determinan la pérdida de elementos valiosos de la diversidad y la imposibilidad de usar un cuerpo de agua como fuente para el recurso vital (Fernández, 2006).

Entre las numerosas actividades que contaminan las aguas, se destaca la piscicultura intensiva, alternativa importante para la producción de alimentos, que genera altas cargas de contaminación orgánica y biológica por factores tales como la alta densidad de especímenes en cultivo y los sistemas de alimentación, basados en concentrados alimenticios con altos contenidos proteicos y minerales como calcio y magnesio.

Para el estudio de la contaminación microbiana, y específicamente la bacteriana, se ha utilizado el grupo de bacterias conocidas como coliformes, por ser habitantes normales de la porción intestinal de diversos animales. Los coliformes designan a un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importantes como indicadores de contaminación del agua y los alimentos. El grupo coliforme está formado por todas las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gramnegativas, no formadoras de esporas, de forma bacilar, que fermentan la lactosa, produciendo gas y ácido láctico entre otros. Están siempre presentes en la flora intestinal y, aunque algunas especies están ampliamente distribuidas en la naturaleza, su presencia indica la contaminación de las aguas por materiales fecales de origen animal. Generalmente, las bacterias

coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo.

Tratar los efluentes generados en la producción piscícola no solamente es un problema técnico, también es un problema de manejo. Existen muchas tecnologías para procesar y hasta reciclar los desechos de las granjas piscícolas con el fin de alcanzar las metas de estándares de efluentes, pero los costos son un factor limitante (Gianluigi, 2000). El grado de contaminación que presentan estos efluentes puede considerarse como diluido, sin embargo, si bien estos efluentes no causan un impacto como lo generan las aguas residuales domésticas y las industriales, si limita el uso de las fuentes superficiales donde son vertidas sin tratamiento (Hellowell, 1989) (Fernández, 2006).

Con el fin de contribuir a la solución de problemáticas de contaminación por la actividad piscícola en el Departamento del Cauca, el Grupo de Estudios en Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca, desarrollo un estudio experimental utilizando el sistema de humedales de flujo subsuperficial para el control de la contaminación en una estación productora de trucha, denominada El Diviso, al oriente del Municipio de Popayán en el corregimiento de Quintana.

El éxito del cultivo de la trucha depende de varios factores como son la cantidad y calidad del agua, la densidad de siembra, la uniformidad en los tamaños, el manejo y la alimentación. La cantidad y la calidad del agua son los factores más importantes a tener en cuenta para el cultivo de la trucha. En esta truchifactoría el agua es tomada del río Las Piedras, desviando una porción del caudal para la producción piscícola. Es importante señalar que este río constituye la principal fuente de agua para consumo humano en la ciudad de Popayán, razón por la cual es necesario realizar estudios pertinentes para conocer la calidad del recurso que ofrece y para el establecimiento de medidas de descontaminación.

Los efluentes de la truchifactoría El Diviso tienen un control previo realizado por un sedimentador, para finalmente descargar las aguas al río Las Piedras. El sistema

de tratamiento montado a manera de planta piloto, consta de tres humedales, cuyas características se reseñan posteriormente.

1. JUSTIFICACION

La contaminación de las aguas superficiales que sirven como fuente de abastecimiento para las poblaciones, constituye un factor de preocupación para la salud, pues se incrementan los riesgos de transferencia de enfermedades, máxime cuando no se cuenta con sistemas de tratamiento de las aguas residuales previos al suministro de agua potable. Como se indicó, las aguas residuales de la truchifactoría son vertidas al río Las Piedras, fuente de consumo para la ciudad de Popayán, lo cual exige adelantar estudios técnicos para establecer las cargas contaminantes y alternativas de tratamiento de estas aguas residuales.

Con el fin de avanzar en la solución de la problemática de contaminación de las aguas por efectos del vertimiento de los residuos de una actividad piscícola, se ha propuesto el montaje de una planta piloto del tipo humedales de flujo subsuperficial en la truchifactoría El Diviso, localizada en el corregimiento de Quintana, Municipio de Popayán. Para establecer la eficiencia en la descontaminación de un sistema como el propuesto, es necesario medir entre otros aspectos como se comportan las comunidades microbianas, en cuanto al número poblacional, antes y después del sistema de tratamiento, aspecto sobre el cual centrará el presente estudio.

Este trabajo quiere contribuir al conocimiento de aquellas actividades industriales consideradas como una de las fuentes de contaminación de los recursos hídricos como son las piscifactorías, por el vertimiento de los residuos sin ningún tratamiento, aportando en sus descargas a las fuentes naturales un gran contenido de materia orgánica y que significan un riesgo sanitario, tanto para la población servida por el río Las Piedras como para los animales que se desarrollan en este medio como ganado, aves y organismos acuáticos.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Estimar la capacidad de remoción de bacterias coliformes de un sistema de tratamiento de aguas residuales del tipo humedales artificiales de flujo subsuperficial originados por la truchifactoría El Diviso, municipio de Popayán.

2.2 ESPECIFICOS

- Identificar y cuantificar los indicadores de contaminación biológica como coliformes totales y fecales por medio de la técnica estándar de filtración de membrana.
- Evaluar la eficiencia de remoción de bacterias coliformes por parte de un sistema de humedales de flujo subsuperficial de las aguas residuales provenientes de la truchifactoría El Diviso.

3. MARCO TEORICO

3.1. SISTEMA DE HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener estas condiciones. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm, con plantas emergentes como *Typha latifolia*, *Phragmites australis* y *Scirpus lacustris*. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la absorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar.

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales, las cuales se presentan a continuación:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica
- Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los organismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de agua residual: Sistemas a Flujo Libre (FWS) y Sistemas de Flujo Subsuperficial (SFS). Los sistemas de flujo subsuperficial se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado y consisten en canales o zanjas excavadas y rellenos de material granular, generalmente grava en donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie de grava.

El concepto de SFS tiene varias ventajas. El lecho de grava tiene mayores tasas de reacción y por lo tanto puede tener un área menor. Como el nivel del agua está por debajo de la superficie del medio granular no está expuesto, con lo que se evitan posibles problemas de mosquitos que pueden llegar a presentarse en otro tipo de sistema. Tampoco se presentan inconvenientes con el acceso de público, así como se evitan problemas en climas fríos, ya que esta capa presta una mayor protección térmica.

En cuanto al rendimiento de los humedales, se puede decir que pueden tratar con eficiencia niveles altos de Demanda Biológica de Oxígeno -DBO, Sólidos Suspendidos – SS y nitrógeno (rendimientos superiores al 80%), así como niveles significativos de metales, trazas orgánicas y patógenas. No ocurre lo mismo con la eliminación de fósforo que es mínima en estos sistemas (Lara, 1999. Fernández *et al.*, 2000).

Los humedales artificiales consisten normalmente en un monocultivo o policultivo de plantas superiores (macrófitas) dispuestas en lagunas, tanques o canales poco profundos. El efluente, normalmente después de recibir un pre-tratamiento, pasa a través del humedal durante el tiempo de retención. El efluente es tratado a través de varios procesos físico-químicos y bacteriológicos. El oxígeno necesario para estos procesos es suministrado por las propias plantas, que lo producen por fotosíntesis o lo toman del aire e inyectan hasta la zona radicular. La transferencia de oxígeno hacia la zona radicular por parte de estas plantas acuáticas es un requisito imprescindible para que la eliminación microbiana de algunos contaminantes se realice con eficacia, estimulando además la degradación de materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes. Los mecanismos que tienen lugar para la depuración de contaminantes constituyen una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos. Las plantas juegan un papel fundamental en estos sistemas siendo sus principales funciones:

- Airear el sistema radicular y facilitar oxígeno a los microorganismos que viven en la rizosfera
- Absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo)
- Eliminación de contaminantes asimilándolos directamente en sus tejidos
- Filtración de los sólidos a través del entramado que forma su sistema radicular.

La selección de las especies vegetales se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de las mismas al clima local, su capacidad de transportar oxígeno desde las hojas hasta la raíz, su tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes, su capacidad asimiladora de los mismos, su tolerancia a condiciones climáticas diversas, su resistencia a insectos y enfermedades y su facilidad de manejo (Lara, 1999. Fernández *et al.*, 2000).

3.2. PRINCIPIOS GENERALES PARA CREAR HUMEDALES

- Diseñar el sistema para mantenimiento mínimo.
- Diseñar sistemas que funcionen con energía natural.
- Diseñar sistemas acorde con las condiciones ecológicas, hidrológicas, topográficas y climáticas del sitio.
- Diseñar el sistema con el fin de cumplir objetivos múltiples.
- Diseñar el sistema como un ecotono.
- Tener en cuenta el tiempo de adaptación de los componentes para la optimización del sistema.
- El diseño dependerá de la función.
- No se debe saturar el sistema con obras de ingeniería (Mitsch *et al.*, 1999).

3.3. SELECCIÓN DEL SITIO

- Tener en cuenta el uso del entorno y de los planes futuros para el aprovechamiento del mismo.
- Realizar un estudio hidrológico en el sitio para determinar la oferta de agua.
- Tener una oferta de agua de manera frecuente.
- Determinar la textura, permeabilidad y estratificación del sustrato.
- Asegurarse de tener el material necesario y adecuado para la construcción (Mitsch *et al.*, 1999)

3.4. COMPONENTES DEL HUMEDAL

3.4.1. AGUA. Es probable que se formen humedales en donde se acumule una pequeña capa de agua sobre la superficie del terreno y donde exista una capa del subsuelo relativamente impermeable que prevenga la filtración del agua en el subsuelo. Estas condiciones pueden crearse para construir un humedal casi en cualquier parte modificando la superficie del terreno para que pueda recolectar agua y sellando la cubeta para retener el agua.

3.4.2. SUBSTRATOS, SEDIMENTOS Y RESTOS DE VEGETACIÓN. Los sustratos en los humedales construidos incluyen suelo, arena, grava, roca, y materiales orgánicos como el compost. Sedimentos y restos de vegetación se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas.

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

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.

- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- El sustrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos, y es una fuente de carbono, que es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal.

Las características físicas y químicas del suelo y otros sustratos se alteran cuando se inundan. En un sustrato saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos en los poros y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible y aunque se presenta dilución de oxígeno de la atmósfera, puede darse lugar a la formación de un sustrato anóxico, lo cual será importante para la remoción de contaminantes como el nitrógeno y metales.

3.4.3. VEGETACIÓN. Las macrófitas acuáticas están representadas por la vegetación que crece en la zona litoral de los lagos, embalses y ríos; ya sea en la zona de interfase agua-tierra, sobre la superficie del agua o totalmente sumergida (Roldan, 1992).

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escurrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.

- Toman el carbono, nutrientes, y elementos de traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del substrato.
- El tallo y los sistemas radiculares dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.
- Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

Cuando se diseñan sistemas que buscan conseguir un tratamiento adecuado del agua residual, usualmente se incluyen una gran variedad de plantas, especialmente emergentes como elementos que actúan como filtradores, por tal razón se pretende evaluar la eficiencia que tienen las macrófitas, descritas a continuación:

Figura 1. *Hedychium coronarium* K. D. Koenig.



Fuente: [http:// es.wikipedia.org/wiki/Hedychium_coronarium](http://es.wikipedia.org/wiki/Hedychium_coronarium)"

Es una planta de bellas flores blancas, amarillas o salmón, muy perfumadas. Su nombre genérico, *Hedychium*, significa fragante nieve. Como el jengibre, pertenece a la familia Zingiberaceae. Es nativa de Asia oriental tropical, en las regiones montañosas de la India y Nepal. Es la flor nacional de Cuba, donde se ha

naturalizado en los sitios húmedos de las serranías, también se encuentra en áreas abiertas como en los bordes de caminos y de ríos.

Hedychium coronarium es una planta herbácea con dos tipos de tallos. Unos son subterráneos rizomatosos gruesos. Saliendo de éstos, los otros son aéreos, finos, rectos, rígidos. Los tallos aéreos tienen hojas grandes, de más de 25 cm, lanceoladas, envainadoras, cuyos peciolos envuelven el tallo alternándose a cada lado. El tallo aéreo puede llegar de 60 a 180 cm de alto y su desarrollo termina con una espiga floral cubierta de espigas u hojas modificadas que protegen los capullos de flores.

Figura 2. *Phragmites australis*



Fuente: [http:// es.wikipedia.org/wiki/Phragmites](http://es.wikipedia.org/wiki/Phragmites)

Son anuales y altos con un rizoma perenne extenso. Logran un muy buen cubrimiento en un año con separación de 0.6 m. Crece formando grupos apretados, con abundantes hojas lineares dispuestas de forma conspicua en dos hileras a lo largo de los tallos. Se han usado carrizos en Europa y han sido la planta acuática emergente más extendida. Sistemas que utilizan carrizos pueden ser más eficaces en la transferencia de oxígeno porque los rizomas penetran verticalmente, y más profundamente que los de las espadañas pero menos que los juncos 0.4 m. Son muy usados para humedales artificiales porque presentan la

ventaja de que tienen un bajo valor alimenticio y por tanto no se ven atacadas por animales como otros tipos de plantas

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

Los microorganismos no están distribuidos regularmente en el suelo pues hay un mosaico discontinuo de microambientes, aquéllos favorables para el desarrollo microbiano se caracterizan por su limitada extensión en el tiempo y en el espacio. La dispersión de los microorganismos, con excepción de los fotosintetizantes, sigue la distribución vertical de los nutrientes pero es alterada por varios factores como la composición de la atmósfera del suelo, el pH, la humedad, la cantidad de minerales asimilables, la presencia de sustancias antimicrobianas. Por lo tanto se puede decir, que los microorganismos:

- Transforman un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- Alteran las condiciones de potencial redox del substrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal.
- Están involucrados en el reciclaje de nutrientes

La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias toxicas, como pesticidas y metales pesados, y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadena tróficas en concentraciones perjudiciales.

A continuación se describen algunos grupos recomendados como indicadores de la calidad del agua en un ecosistema acuático importantes para su valoración en términos sanitarios y ecosistémicos:

3.4.4.1. Bacterias. Las bacterias que se encuentran más frecuentemente en el agua son las bacterias entéricas que colonizan el tracto gastrointestinal del hombre y son eliminadas a través de la materia fecal. Debido a que su detección y recuento a nivel de laboratorio son lentos y laboriosos, se ha usado el grupo de las bacterias coliformes como indicadores, ya que su detección es más rápida y sencilla (Pulido *et al.*, 2005).

El grupo de microorganismos coliformes es adecuado como indicador de contaminación bacteriana debido a que estos son componentes comunes del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente, están presentes en el tracto gastrointestinal en grandes cantidades, permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas y se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección. Entre los microorganismos que conforman el grupo de los coliformes totales; *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwardsiella* y *Citrobacter*, los cuales viven como saprófitos independientes o como bacterias intestinales; los coliformes fecales (*Escherichia*) son de origen intestinal. Todos pertenecen a la familia Enterobacteriaceae, son bacilos Gram negativos, anaerobios facultativos, no esporulantes, fermentadores de lactosa con producción de gas; constituyen aproximadamente el 10% de los microorganismos intestinales de los seres humanos y otros animales (Pulido *et al.*, 2005).

Las bacterias del tracto intestinal no suelen sobrevivir en el medio acuático, están sometidas a un estrés fisiológico y pierden gradualmente la capacidad de producir colonias en medios diferenciales y selectivos. Su velocidad de mortalidad depende de la temperatura del agua, los efectos de la luz solar, las poblaciones de otras bacterias presentes, y la composición química del agua. La presencia de

coliformes en el agua indica la contaminación bacteriana reciente y constituye un indicador de degradación de los cuerpos de agua (Pulido *et al.*, 2005).

Las coliformes fecales se denominan termotolerantes por su capacidad de soportar temperaturas más elevadas. La capacidad de reproducción de los coliformes fecales fuera del intestino de los animales homeotérmicos es favorecida por la existencia de condiciones adecuadas de materia orgánica, pH, humedad, etc. Estas bacterias son de interés clínico, ya que pueden ser capaces de generar infecciones oportunistas en el tracto respiratorio superior e inferior, además de bacteremia, infecciones de piel y tejidos blandos, enfermedad diarreica aguda y otras enfermedades severas en el ser humano (Pulido *et al.*, 2005).

Según la Resolución 2115 de 2007, las características microbiológicas del agua para consumo humano deben enmarcarse dentro de los valores máximos aceptables desde el punto de vista microbiológico, los cuales han establecido que la presencia de coliformes totales debe interpretarse de acuerdo con el tipo de aguas: deben estar ausentes en 85% de las muestras de aguas potables tratadas y el valor máximo aceptable será de 0 UFC /100mL para la técnica de filtración por membrana. En aguas tratadas, los coliformes totales funcionan como un alerta de que ocurrió contaminación, sin identificar el origen, indicando fallas en el tratamiento. (Pulido *et al.*, 2005).

3.5. METODO DE MUESTREO

Un método para establecer la calidad higiénica de las aguas se basa en la determinación de bacterias coliformes como indicadores de contaminación fecal. La norma colombiana recomienda entre otros, la técnica de filtración por membrana -FM, la cual se basa en la capacidad de bacterias coliformes y otros patógenos bacterianos de desarrollar colonias de color rojo oscuro; con brillo metálico; cuando se incuban en medio m-Endo, durante 24 horas, a $35 \pm 0,5$ °C. La enumeración de coliformes totales y fecales por FM se realiza en una etapa, filtrando un volumen adecuado de muestra por un filtro de membrana estéril con

un tamaño de poro de 0,45 micrones e incubando luego el filtro en ambiente húmedo en el medio de cultivo EMB (eosina azul de metileno) el cual es indicado para este tipo de bacterias. Un recuento ideal de muestra es el que proporciona alrededor de 50 colonias de coliformes y no más de 200 colonias de todos los tipos. Los resultados se expresan como colonias de coliformes totales por 100 ml. El agua que contenga bacterias de ese grupo se considera potencialmente peligrosa, pues en cualquier momento puede llegar a transmitir bacterias patógenas.

4. ANTECEDENTES

4.1. HISTORIA DE LA CONTAMINACIÓN

La preocupación por el suministro de agua potable y recolección de aguas negras alcanzaron niveles muy avanzados en los imperios mesopotámicos de Asia y Babilonia. En minas descubiertas cerca de Bagdad se han encontrado evidencias de letrinas y alcantarillas que datan desde 2500 años antes de Cristo. Situaciones similares se han descubierto en la India en la misma época (Roldán, 1992).

La civilización prehelénica en la isla de Creta (300 a 1000 años antes de Cristo) transportaba agua bajo presión y recolectaba sus desechos mediante sistemas de alcantarillas. Partes de estos sistemas aún operan en el lugar. Las llamadas cloacas romanas fueron diseñadas principalmente para canalizar agua superficial y subterránea. En Londres (1815), Boston (1833) y Paris (1880) se dictaron leyes respecto a la disposición de aguas negras.

A pesar de estos intentos por sanear las aguas, el acelerado desarrollo industrial y agrícola a fines de siglo pasado y principios y mediados del presente y la explosión demográfica de las últimas décadas, agravó de tal manera el problema, que los países más industrializados han comenzado a desarrollar soluciones prácticas para el control de la contaminación. Ríos como el Sena en Francia y el Támesis en Inglaterra, son un ejemplo de como un ecosistema puede ser recuperado ecológicamente (Roldan, 1992).

4.2 EXPERIENCIA PREVIA

Los primeros trabajos con plantas de tratamiento, en Colombia, se hicieron en asocio con TECNOSKANDIA, empresa de origen sueco, radicada en Bogotá, la que aportó sus conocimientos y experiencias utilizando la planta *Phragmites communis*, ó *Phragmites australis*, como principal elemento para acción filtrante.

Así, con esta técnica y con estas plantas se realizaron varias plantas de tratamiento en Cali, entre ellas:

- Planta piloto para 10 (P/E) (personas equivalentes)
- Colegio Encuentros
- Planta para 300 estudiantes = 100 (P/E) (personas equivalentes)
- Varias Plantas de Tratamiento en Residencias Particulares en Cali
- Varias Plantas de Tratamiento a Instituciones Públicas y Privadas.
- Planta de Tratamiento Universidad del Cauca Facultad de Ciencias Agropecuarias
- Planta de Tratamiento matadero municipal Popayán, Cauca.
- Plantas de Tratamiento municipales en Ecuador.
- Planta de Tratamiento - Casa Perafán Simonds, Pino Pardo.
- Planta de Tratamiento Parcelación la Cordillera.
- Planta de Tratamiento - Casa Castrillón, Luna Blanca.
- Planta de Tratamiento - Casa Sarzosa Varona.
- Planta de Tratamiento - Casa Duque Muñoz.
- Planta de Tratamiento - Estadero Caballo de Copas.
- Planta de Tratamiento - Granja Maria Auxiliadora.
- Planta de Tratamiento - Granja FEDAR
- Planta de Tratamiento - Escuela San Felipe Neri Pasto (N).
- Planta de Tratamiento - El Crucero, municipio de Caldon.
- Planta de Tratamiento - Nueva Esperanza, municipio de Piendamó.

- Planta de Tratamiento - Casa Rebolledo Manzano, Los Robles.
- Planta de Tratamiento - Casa Paredes Muñoz, La Variante.

Las plantas emergentes que frecuentemente se encuentran en la mayoría de los humedales para aguas residuales incluyen espadañas, carrizos, juncos, y juncos de laguna. Los juncos de laguna y las espadañas o una combinación de estas dos especies, son las dominantes en la mayoría de los humedales artificiales en los Estados Unidos. También existen algunos sistemas con carrizos, siendo esta especie la dominante en los humedales artificiales europeos.

Investigaciones en Santee, California, con sistemas de flujo subsuperficial (SFS), han estudiado la contribución de la vegetación a la eliminación de bacterias coliformes en humedales artificiales. Cada lecho del humedal consistió en una impermeabilización plástica y una excavación de 18,5 m de largo x 3,5 m de ancho y 0,76 m de profundidad, con vegetación emergente que crece en arena gruesa. El flujo del afluente era agua residual municipal primaria. Los niveles de coliformes totales en el afluente eran de $6,75 \times 10^7$ NMP/100 ml y se redujeron a $5,77 \times 10^6$ NMP/100 ml (99% de reducción). El tiempo de residencia hidráulico era 5,5 días. El declive de la población de coliformes es debido a la sedimentación, filtración, y absorción. La luz del sol ha demostrado tener un efecto letal en los coliformes.

En California, donde la legislación es estricta respecto a los humedales naturales, los humedales artificiales presentan algunas ventajas sobre los naturales, ya que los efluentes finales pueden tratarse con cloro. La desinfección con cloro de efluentes de humedales artificiales puede producir aguas que se pueden reutilizar sin restricción, siempre que los niveles de coliformes totales puedan reducirse a < 2 NMP/100 ml (legislación referente a reutilización de aguas del estado de California) o $< 1000/100\text{ml}$ en el 80% de las muestras (recomendación de la Organización Mundial de la Salud). Hay una tendencia creciente de no usar cloro como un desinfectante en casos donde la formación de trihalometanos (THM) es

probable. La desinfección del efluente del humedal con ultravioleta (UV) u ozono puede ser una alternativa ya que no produce THM.

El uso de los filtros en grava se encuentra bien documentado y su aplicación en Colombia ha sido desarrollada como sistemas de pre-tratamiento para filtros lentos en arena, tecnología que es usada para la potabilización del agua (Fernández *et al.* 1998).

Algunos estudios han sido desarrollados con otros tipos de material filtrante diferente a la grava, con el propósito de evitar las obstrucciones y facilitar la operación y mantenimiento. Se han reportado experiencias de la Corporación Autónoma Regional del Valle de Cauca - CVC, tratando desechos del beneficio del café, con filtros anaeróbicos de flujo ascendente usando guadua, puesta en forma desordenada, como material filtrante: Se han obtenido remociones superiores al 90% en términos de DQO y 75% en SST, aplicando una carga de 12.3 Kg DQO/m³.día y un tiempo de retención hidráulico de 2 días. Después de 18 meses de operación el sistema no presentó problemas de taponamiento. Experiencias del grupo de investigación en agua y saneamiento de la Facultad de Ciencias Ambientales (Castaño y Paredes, 2002) han demostrado que con la utilización de aros de guadua de cinco centímetros de longitud, es posible obtener las mismas eficiencias que las obtenidas con el medio tradicional (grava), con la ventaja adicional de que los costos de inversión inicial pueden reducirse entre un 10 y 35%, dependiendo del tamaño del sistema

Una experiencia con el uso de sedimentadores es reportada por Puentes (2005), en la piscifactoría El Diviso, localizada en el Departamento del Cauca en Colombia. Los sedimentadores operan con un tiempo de retención de 90 a 120 min. Aunque no se reportan los valores de eficiencia de remoción en sólidos y materia orgánica, el documento indica que su eficiencia es alta, pero que requiere de un seguimiento que permita definir su eficiencia real.

5. METODOLOGÍA

5.1. ÁREA DE ESTUDIO.

El estudio se llevó a cabo en la truchifactoría El Diviso (Fig.3), localizada en el corregimiento de Quintana, región del río las Piedras, al oriente del municipio de Popayán y que incluye las veredas San Juan y San Ignacio, en una zona de vida definida como bosque húmedo montano bajo (bmh –MB) y una temperatura media anual de 10°C.

En esta truchifactoría se llevo a cabo un ensayo con una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la actividad piscícola, del tipo humedales con flujo de aguas subsuperficial. El sistema cuenta con un pretratamiento del agua que incluye un sedimentador antes de ser enviada a una caja de distribución que alimenta los tres humedales en ensayo. El agua tratada se descarga en el Río las Piedras, el cual es el suministro primario de la ciudad de Popayán.

Figura 3. Truchifactoria, El Diviso



Fuente: Google earth.

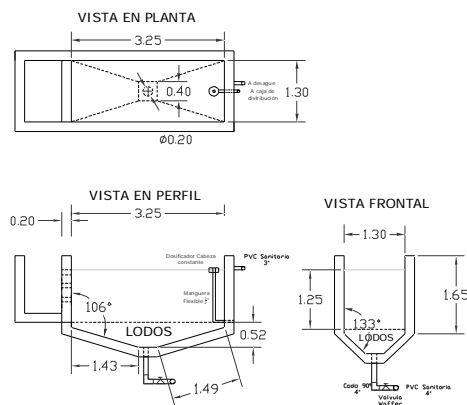
5.2. CARACTERISTICAS DEL SEDIMENTADOR

Los tanques de sedimentación disminuyen la velocidad de las aguas a parámetros mucho menores. La unidad de tratamiento que va después del desarenador, es la unidad de sedimentación y/o flotación, su nombre mas normal es el de decantador, dado que sirve para decantar y sedimentar el agua residual. Por ser una unidad del sistema primario de depuración se le denomina decantador primario.

- Dimensiones del sedimentador: 3.25m de largo x 1.30m de ancho x 1.65m de profundidad. El sistema recibe el agua directamente de la piscícola y posee dos salidas, una para lodos y otra que va directamente a la caja de distribución (Fig.4).

Figura 4. A) Vista general del sedimentador, B) Vista de la estructura de entrada y salida del agua en el sedimentador.

A)



B)

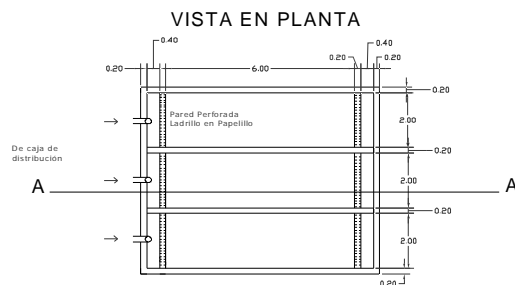
5.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS HUMEDALES

El sistema de tratamiento consta de un sistema de tres humedales con las siguientes características:

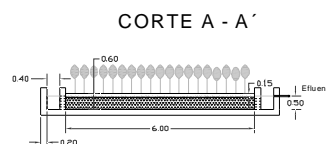
- Dimensiones del humedal: 6m de largo x 2m de ancho x 60cm de profundidad (Fig. 5).
- Sustrato de fijación: Grava de diferente calibre (gruesa y delgada).
- Vegetación predominante
- Surcos: 4 surcos con capacidad para 52 plantas cada uno.

Figura 5. A) Vista del perfil general y dimensiones de cada humedal, B) Corte transversal de la estructura de entrada y salida de aguas en el humedal

A)



B)



Las macrófitas acuáticas se sembraron en estado de plántulas con 20 cm de alto. La siembra se hizo en los dos surcos centrales, los dos restantes, cada uno en un costado sirvió como borde libre. Se dejó un espacio de 15 cm entre planta y

planta. Se estableció trabajar con una población de 52 plantas por humedal (Fig.6).

El tiempo de retención hidráulica fue una de las variables a ensayar en la capacidad de remoción de la contaminación. El sistema opero con un tiempo de retención de cuatro días, pero la eficiencia de descontaminación del sistema se ensayará para otros tiempos de retención hidráulica. El presente estudio sobre la remoción de contaminantes biológicas se hizo para cuatro días.

Se tomaron muestras de agua en cada uno de los humedales, la caja de distribución y el sedimentador. Uno de los humedales tenia la especie vegetal *H. coronarium*, el segundo actuó como control y no tenía ningún tipo de macrófita acuática implantada, y el tercero con *P. australis*. La frecuencia de muestreo fue de 2 veces por semana durante 172 días. Las cinco muestras recogidas se preservaron en frío y se trasladaron inmediatamente al laboratorio de microbiología del Departamento de Biología, donde se analizaron por duplicado.

Figura 6. Fotografía de los humedales de flujo subsuperficial



5.3.1. Operación y Mantenimiento

Se enfocó a los factores más importantes para el rendimiento del tratamiento:

- Proporcionar un amplio contacto del agua, con la comunidad microbiana, con la capa de residuos de vegetación y con el sedimento.
- Asegurar que el flujo alcance todas las partes del humedal.
- Mantener un ambiente propicio para los microbios.
- Mantener un crecimiento vigoroso de la vegetación.

La hidrología se verificó constantemente con el nivel del agua, para que no se estuviera desarrollando flujo en la superficie.

5.3.2. Vegetación

El manejo del nivel del agua es la clave para el éxito de la vegetación. Mientras las plantas del humedal puedan tolerar cambios temporales en la profundidad del agua, debe tenerse cuidado de no exceder los límites de tolerancia de las especies usadas durante periodos largos de tiempo, pues lo más importante en los humedales FWS es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degraden y se conviertan en lo que hemos llamado restos de vegetación, que sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de gran parte del proceso de purificación del agua que ocurre en este tipo de sistemas.

La vegetación debe ser inspeccionada regularmente y deben quitarse las especies invasoras. Los herbicidas no deben usarse excepto en circunstancias extremas.

5.4 TECNICAS PARA ANALISIS MICROBIOLOGICOS

Las técnicas empleadas para la determinación del número de bacterias fueron:

- Detección y cuantificación de coliformes fecales: técnica filtración por membrana, de acuerdo con el método estándar No. 9222 B. Métodos para la determinación de aguas y aguas residuales (APHA) (1999).
- Detección y cuantificación de coliformes totales: técnica filtración por membrana, de acuerdo con el método estándar No. 9222 D. Métodos para la determinación de aguas y aguas residuales (APHA) (1999).

5.5 TRATAMIENTO ESTADISTICOS DE LOS DATOS

Los datos obtenidos en cuanto al número de bacterias, se analizaron estadísticamente para establecer si existen diferencias significativas en número de colonias obtenidas por 100 mL, durante el tratamiento

Igualmente, se pretendió establecer estadísticamente, cual fue el humedal que presentó la mayor remoción de bacterias coliformes. Para tales efectos, se realizaron pruebas de normalidad, análisis de varianza y pruebas no para métricas de Kruskal- Wallis y Spearman, utilizando el software de procesamiento estadístico SPSS, versión académica 11.0

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1. CARACTERIZACION MICROBIOLOGICA

La Tabla 1 muestra los promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales, expresadas como UFC x 10³/100mL, en los cuales se tuvo en cuenta los valores mínimos y máximos de los diferentes sitios en el tiempo de duración del muestreo, teniéndose para Coliformes Totales en H1 una variación entre 4.5 y 515 con un promedio de 168.68 UFC x 10³/100mL, para H2 entre 7.5 y 397 con un promedio de 131.58 UFC x 10³/100mL, para H3 entre 8 y 564.5 con un promedio de 121.27 UFC x 10³/100mL, para Sedimentador entre 302500 y 85050000 con un promedio de 16252000 UFC x 10³/100mL y para Caja de distribución entre 167000 y 101150000 con un promedio de 17652307.69 UFC x 10³/100mL.

Para Coliformes Fecales en H1 una variación entre ± 6.5 con un promedio de 2.66 UFC x 10³/100mL, para H2 entre 0 y 21.5 con un promedio de 4.83 UFC x 10³/100mL, para H3 entre 0 y 49 con un promedio de 7.36 UFC x 10³/100mL, para Sedimentador entre 0 y 2450000 con un promedio de 625027.78 UFC x 10³/100mL y para Caja de distribución entre 0 y 2950000 con un promedio de 642472.22 UFC x 10³/100mL.

Los valores relativamente altos en el sedimentador se debieron principalmente a que existió cierta acumulación de sólidos sedimentables que no se removieron totalmente, pues con este tipo de sistemas se busca solo la remoción de sólidos, sin buscar remoción de materia orgánica disuelta. El resultado de este proceso contribuye a que con una mayor circulación de agua en la caja de distribución se presenten altos registros de UFC x 10³/100mL por el contenido de carga orgánica.

Tabla 1. Promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales (UFC x 10³/100mL).

		H1	H2	H3	SEDIMENTADOR	CAJA DE DISTRIBUCION
COLIFORMES TOTALES	PROMEDIO	168.68	131.58	121.27	16252000	17652307.69
	DESVIACION	4.5 - 515	7.5 - 397	8 – 564.5	302500 - 85050000	167000 – 101150000
COLIFORMES FECALES	PROMEDIO	2.66	4.83	7.36	625027.78	642472.22
	DESVIACION	0 - 6.5	0 - 21.5	0 - 49	0 - 2450000	0 – 2950000

Fuente: Anexos A – Z

La tabla 2, muestra los valores mínimos y máximos del porcentaje de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales para lo cual se tuvo en cuenta el promedio de los datos originales, teniéndose para coliformes totales en H1 una variación entre 99.96% y 100%, H2 entre 99.88% y 100%, H3 entre 99.89% y 100%. La remoción global, estimada sobre los valores de todos los humedales, fue del 100%.

El porcentaje de remoción de bacterias Coliformes Fecales en H1, H2 y H3 no presento cambio, por lo tanto se considera que hubo un 100% de efectividad en este proceso. Según Lara (1999), estudios realizados en Canadá removieron coliformes fecales en aproximadamente un 90% cuando se opero con un tiempo de retención de 6 a 7 días.

Tabla 2. Porcentajes de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales.

		HUMEDAL H1	HUMEDAL H2	HUMEDAL H3
COLIFORMES	Remoción (%)	100	100	100
TOTALES	Desviación (%)	99.96-100	99.88-100	99.89 -100
COLIFORMES	Remoción (%)	100	100	100
FECALES	Desviación (%)	100 - 100	99.99 -100	99.98 -100

Fuente: Anexos A - Z

6.1.1. ANALISIS PARA COLIFORMES TOTALES

Se utilizó el software de procesamiento estadístico SPSS, versión académica 11.0, para el tratamiento estadístico de los datos.

Dado que los datos no cumplieron con las pruebas de normalidad, pero si con homogeneidad de varianza, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis

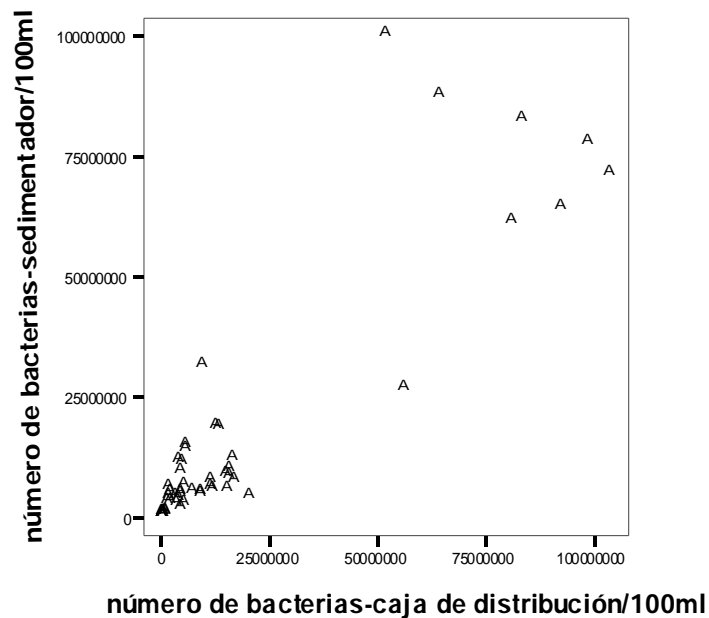
para comparar la eficiencia de los humedales, en cuanto a la remoción de bacterias coliformes en el sistema propuesto de humedales artificiales, para los cinco sitios de muestreo.

Con esta prueba se reportó que no existe diferencia significativa ($p=0.052$) entre los humedales y por lo tanto la remoción fue prácticamente igual independientemente de la planta utilizada como complemento del sistema de tratamiento. Según Garcia (2004), los humedales artificiales remueven entre 25 y 40% más de materia orgánica, sólidos suspendidos y coliformes totales que las lagunas de estabilización. Además, los humedales construidos disminuyen los requerimientos de calidad del afluente y permiten tener un mayor control sobre el régimen hidráulico en el sistema, en comparación con los humedales naturales.

Durante el tiempo de muestreo se presentaron diversas situaciones en cuanto al desarrollo de las plantas, debido a que no tuvieron una adecuada maduración ni un buen desarrollo de rizomas, que podría haber afectado la operación de los humedales. Además al haber poco contacto del agua residual con las raíces no se logra el contacto suficiente con los microorganismos y por lo tanto el proceso de descontaminación no se reportó como significativo.

Se realizó el análisis para los sitios de muestreo del sedimentador y la caja de distribución para observar como es la remoción de bacterias del grupo coliformes al pasar el agua de un sitio a otro. Para la comparación entre los sitios sedimentador y la caja de distribución, a los datos se les realizó la prueba paramétrica de Mann-Whitney, obteniéndose un valor de prueba no significativa ($p=0.884$). Adicionalmente, se aplicó el análisis de correlación para variables bivariadas, para identificar asociación o dependencia entre los datos, encontrándose una correlación positiva entre el número de UFC/100ml del sedimentador y la caja de distribución (Fig. 7). El resultado demuestra que ambos sitios son semejantes, en cuanto al comportamiento de remoción de contaminantes.

Figura 7. Correlación entre las concentraciones de coliformes totales en sedimentador y caja de distribución.



Para identificar la eficiencia de la remoción de bacterias coliformes en el sistema de tratamiento para aguas residuales, se realizó la comparación entre el humedal H1 y el sedimentador, se tomo el humedal H1 como referencia debido a que presento una mayor variación en los resultados con referencia a los demás humedales. Para tal análisis se aplicó la prueba T para una muestra y se concluyo que la diferencia es significativa estadísticamente ($p=0.000$), es decir que cuando se pasa del sedimentador al humedal H1 se encuentra una gran disminución en el número de coliformes totales, igualmente sucedió lo mismo para los humedales H2 y H3, mostrando que el sistema es eficiente en el tratamiento para mejorar la calidad del agua.

Otro variable importante que se tuvo en cuenta fue el tiempo de operación de los humedales cuya duración fue de 4 meses y medio con un periodo de retención

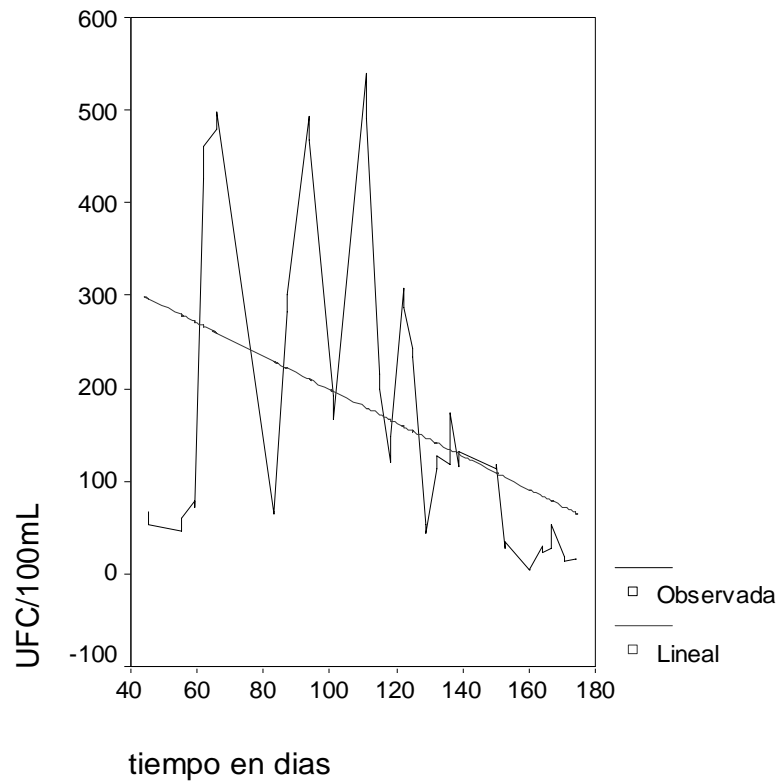
hidráulica de 4 días, fijado con referencia a los cambios propuestos en el proyecto general teniendo en cuenta los diferentes tiempos de retención a evaluar.

Se comparó la remoción observada en los humedales con el tiempo transcurrido del muestreo. Para este efecto se aplicó un análisis de correlación no paramétrico de Spearman con un valor de significancia de 0.000, mostrando una correlación significativa. Se evidencia que el sistema, con el transcurrir del tiempo, muestra una tendencia a disminuir el número de bacterias, es decir que se vuelve eficiente en la remoción de coliformes totales.

- Eficiencia del humedal H1

Se aplicó el análisis de correlación no paramétrica de Spearman con una significancia: 0.000, el cual muestra una tendencia a disminuir el número de bacterias coliformes con el transcurso del tiempo (Fig.8).

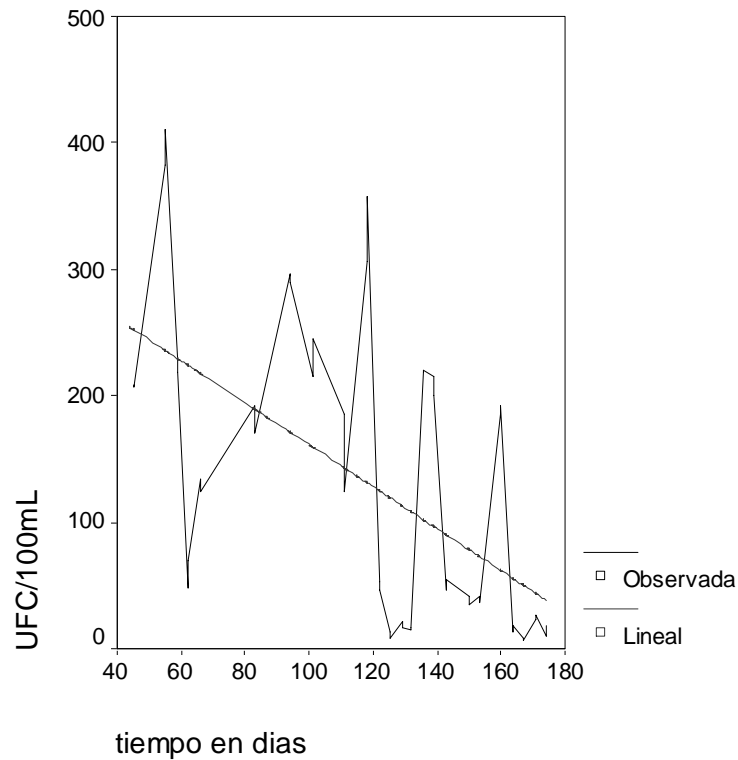
Figura 8. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H1.



- Eficiencia del humedal H2

Se aplicó el análisis de correlaciones de Spearman con una significancia: 0.000, cuyo resultado muestra que el humedal H2 presenta una tendencia de disminución con el paso del tiempo en el número de bacterias (Fig.9).

Figura 9. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H2.



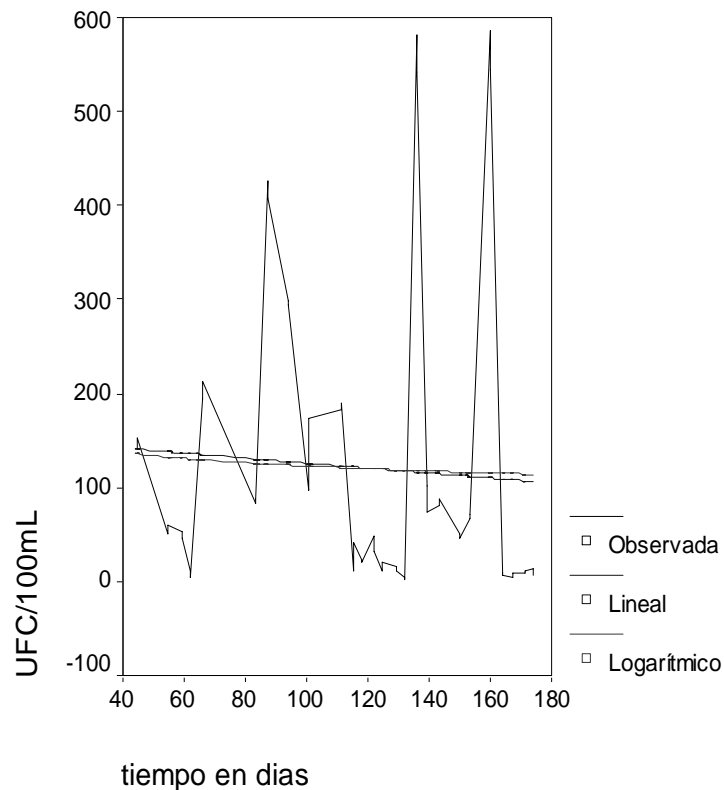
- Eficiencia del humedal H3

Se aplicó el análisis de correlación no paramétrico de Spearman con una significancia: 0.015, el cual también muestra una tendencia a disminuir el número de bacterias coliformes con el paso del tiempo.

El humedal H3, obtuvo una diferencia significativa ($p=0.015$), es decir que hubo una eficiencia en la remoción para este sitio con el transcurrir del tiempo. Se observa un descenso notable entre los días 160 a 180 (Fig.10), debido a que el sistema radicular del *Hedychum* ofrece una mejor protección para las bacterias proporcionando un mayor número de

nutrientes en comparación con el *Phragmites* el cual resultado desplazado por esta especie más competitiva y mejor adaptada a medios alterados.

Figura 10. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H3.



6.1.2. COLIFORMES FECALES

Para el análisis de los datos se realizó la comparación entre los humedales para determinar cual presentó mejor eficiencia en la remoción de coliformes fecales. Dado que los datos no cumplen con distribución normal (prueba de normalidad), pero si con homogeneidad de varianza, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal- Wallis. Los resultados reportan que la prueba es no significativa ($p=0.070$), con lo cual se concluye que no hay diferencia significativa

estadísticamente entre los humedales, debido a que los tres humedales presentan un comportamiento casi similar en la remoción de coliformes fecales.

Se realizó la comparación en el número de UFC/100ml del sedimentador con la caja de distribución, aplicando la prueba no paramétrica de Mann-Whitney y un análisis de correlación, para identificar asociación o dependencia entre los datos. Se observó una correlación positiva entre el número de UFC/100ml del sedimentador y la caja de distribución. La prueba de Mann-Whitney reporta una significancia: 0.977, la cual muestra que la prueba es no significativa. Se concluye que no hay diferencia significativa entre el sedimentador y la caja de distribución, es decir que el número de bacterias se presentan de una forma similar en ambos sitios.

Para determinar la eficiencia en la remoción de coliformes fecales para el sistema de tratamiento, se realizó la comparación entre el humedal H1 y el sedimentador por medio del programa estadístico. Se aplicó la prueba T para una muestra dando como resultado que la diferencia es significativa estadísticamente, es decir que cuando se pasa del sedimentador al humedal H1 se encuentra una gran disminución en el número de coliformes fecales, con lo que se concluye que el sistema presenta eficiencia en la remoción de microorganismos. Se demostró en un estudio realizado con cinco humedales a escala real (Morató, 2004) que existe una menor inactivación de coliformes fecales en sistemas que operan con un menor tiempo de retención hidráulica. Además, se observó como la mayor eliminación de bacterias fecales se produjo en el humedal con material fino.

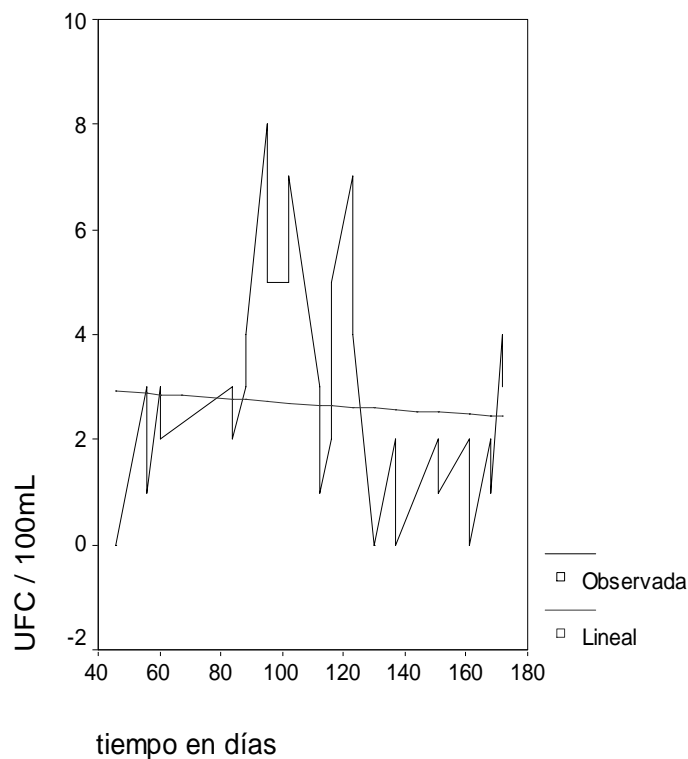
Se realizó también el análisis para observar la eficiencia de los humedales con el paso del tiempo, teniendo en cuenta la duración del muestreo de 172 días. Para esto se comparó los humedales H1, H2, H3 con el tiempo transcurrido del muestreo, aplicándose un análisis de correlación no paramétrico de Spearman con

un valor de significancia: 0.600. Se concluye que el sistema con el transcurrir del tiempo no muestra cambio en la remoción de coliformes fecales, a diferencia de lo que se reporto en el análisis de coliformes totales.

- Eficiencia del humedal H1

Se aplicó el análisis de correlación no paramétrica de Spearman con una significancia: 0.600, concluyendo que el resultado es estadísticamente no significativo lo cual muestra que los datos tienen una tendencia muy variable (Fig.11).

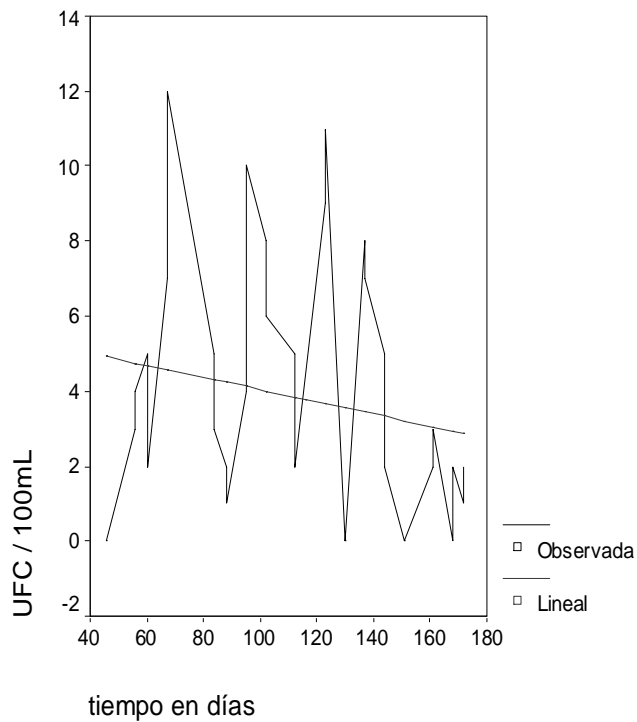
Figura 11. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H1.



- Eficiencia del humedal H2

Se aplicó el análisis de correlaciones de Spearman con una significancia: 0.237, cuyo resultado muestra que el humedal H2 no presenta mucho cambio con el transcurso del tiempo por la gran variabilidad de los resultados (Fig. 12).

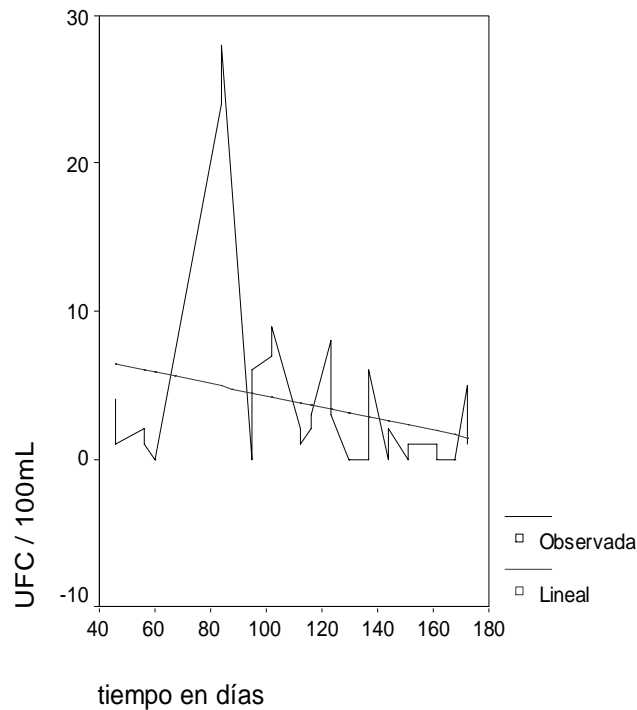
Figura 12. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H2.



- Eficiencia del humedal H3

Se aplicó el análisis de correlación no paramétrica de Spearman dando como resultado una significancia: 0.097, concluyéndose que no hay una tendencia a disminuir el número de bacterias coliformes con el paso del tiempo, debido a que el sistema de tratamiento aun se encuentra en condiciones de maduración (Fig. 13).

Figura 13. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H3.



En general, se puede expresar que los humedales realizan una remoción importante de las bacterias coliformes, pero aun el rendimiento no es el adecuado, debido a que se presenta poca maduración del sistema reflejado en el bajo crecimiento de las macrófitas y de sus rizomas de corta profundidad. Debido a que es un sistema de reciente construcción, el sistema de humedales contribuyó a mejorar la calidad del agua del efluente, aunque la remoción de materia orgánica y de las bacterias coliformes de los humedales, aún no es el deseable.

Se destaca que durante el tiempo de realización del estudio, se presentaron diversos inconvenientes de operación y mantenimiento, como falta de limpieza en los sistemas de alimentación y conducción del afluente al humedal, taponamiento del sedimentador con lodos, lo que producía por ende el cierre del caudal.

Aunque los análisis estadísticos indican similitud en la operación, se observó en cuanto a eficiencia de las plantas utilizadas en el sistema de tratamiento que se presentó una mejor acción por parte del *Hedychium coronarium*. Para el tiempo de retención hidráulica de 4 días, la remoción se atribuyó fundamentalmente a los fenómenos de precipitación - adsorción. La precipitación química se reforzó por el metabolismo del humedal, sobre todo de las algas que reducen los niveles de CO₂ disueltos y aumentan el pH (Lara, 1999. Fernández *et al.*, 2000).

El proceso de eliminación de coliformes en humedales artificiales, se ha relacionado con factores ambientales como el tiempo de retención hidráulica, el tipo de medio granular y el tipo de vegetación utilizado. No obstante, diferentes investigadores muestran resultados contradictorios, hecho que se atribuye a la gran variabilidad en la concentración bacteriana, especialmente en los afluentes (Morató, 2004).

La remoción de materia orgánica y de las bacterias coliformes de los humedales, aún no es la deseable, debido a que por ser sistemas de reciente construcción, aún les falta madurar. Rivera y colaboradores (1993, 1997), encontraron que en países como México, el tiempo mínimo para que el sistema de humedales se estabilice es de un año, a diferencia de países como Alemania y el Reino Unido en los que el sistema se estabiliza en más tiempo debido a que la temperatura ambiental es menor (Findlater *et al.*, 1990; Nuttall *et al.*, 1997).

6.2. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA

Paralelamente, durante el tiempo de estudio se realizaron análisis físico químicos al afluente y efluente, para establecer la remoción de otros contaminantes en las aguas de la truchifactoría. Para tales efectos, se analizaron los parámetros de oxígeno disueltos, nitrógeno amoniacal, Sólidos Suspendidos Totales, fósforo, DBO y DQO, que presentan gran incidencia en el comportamiento de los microorganismos.

Los resultados correspondientes a la remoción del medio poroso para los parámetros antes mencionados, con un tiempo de retención hidráulico de cuatro días aparecen representados en la tabla 3.

Tabla 3. Promedios de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoría.

PARAMETROS mg/L	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
SST	898,80	113,70	8,85	10,30	9,85
Oxígeno Disuelto	3.76	2.9767	3.3241	3.44	3.333
Fosforo	18.75	4,64	1,22	0,99	0,83
Nitrógeno amoniacal	3,50	1,13	0,56	0,61	0,58
DBO	433,22	76,59	4,58	4,22	3,93
DQO	1315,39	177,97	32,12	24,85	20,89

La tabla 4. Indica los porcentajes de variación en los componentes físico químicos analizados.

Tabla 4. Porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoría.

PARAMETROS mg/L	Afluyente	H1	H2	H3	REMOCION GLOBAL
SST	87.34%	92.21%	90.94%	91.33%	98.904%
Oxígeno Disuelto	20.83%	11.67%	15.56%	11.96%	11.35%
Fosforo	75.25%	73.7%	78.6%	99.99%	95.573%
Nitrógeno amoniaco	67.7%	50.44%	46.01%	48.67%	83.42%
DBO	82.32%	94.02%	94.5%	94.8%	99.09%
DQO	86.47%	79.14%	86.03%	88.26%	98.41%

Los valores relativamente bajos de **oxígeno**, en los humedales con macrófitas, se pudo deber al mayor consumo de microorganismos aerobios que requieren oxígeno para desarrollarse y a la poca producción de este por parte de las plantas. Algunos autores indican que el oxígeno transferido se iguala al respirado, y que por tanto no habría una ganancia neta.

La eficiencia de tratamiento esperada para la eliminación de **nitrógeno amoniacal** fue prácticamente del 83.42% (Tabla 4.) el cual es un valor mayor de lo esperado. Una razón probable es que la eliminación de este compuesto pudo deberse a la absorción directa de las macrófitas y a procesos de nitrificación-desnitrificación, que se ven favorecidos por la existencia de zonas aerobias y anaerobias que lo absorbieron por vía radicular y lo utilizaron para formar sus proteínas.

La remoción de **fosfatos** fue de 95.573%, dato que supera el valor esperado de 60 a 80%, por lo cual la eficiencia obtenida se encuentra fuera del rango teórico. Se considera que existe una alta capacidad de inmovilización en el sustrato/sedimento del fósforo. Esta disminución se produce también por fenómenos de adsorción sobre los componentes del suelo, además de la acción bacteriana al transformar formas insolubles de fósforo a formas solubles fácilmente asimilables por las plantas (biomasa).

La eliminación de los **SST** fue de 98.9%, la cual es muy buena ya que la remoción esperada varía entre 70% y 80% para este parámetro (Rivas, 1997) principalmente, por fenómenos de sedimentación, floculación y adsorción, a través del conjunto que forman el sustrato y las raíces.

El porcentaje de remoción de **DBO** total es prácticamente del 99.09%, el cual es bastante bueno considerando que se esperaría remover entre un 70 y un 80% de materia orgánica. La mayor eliminación de materia orgánica se realizó por filtración del medio y por digestión de la fracción carbonada en forma anaerobia. (Davila, 2003).

Se espera que la variación en la DBO por acción biológica debe mejorar con el transcurso de los meses, cuando se alcance una cobertura vegetal total en el humedal, y por lo tanto, una densidad de raíces mucha más amplia para favorecer

el crecimiento de microorganismos que degraden la materia orgánica y favorezcan su mineralización ofreciendo estos minerales para el consumo de las plantas.

La **DQO** obtenida es casi tres veces mayor en el sedimentador que el de la DBO, lo que indica que el total de agua residual tiene un componente bastante grande de compuestos no orgánicos, provenientes de la piscícola. La eficiencia de remoción de DQO esperada varía entre 70 y 80 % (Rivas, 1997); la obtenida varió entre 86 y 87 %. En la zona aerobia se produce la mayor parte de remoción de la DQO, debido a que en esta zona el O₂ es aprovechado por los microorganismos para producir CO₂ y agua durante la degradación de la materia orgánica.

7. CONCLUSIONES

La utilización de tecnologías como humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales es una técnica que se recomienda como una alternativa de descontaminación de afluentes para el desarrollo de actividades piscícolas, aunque se consideran sistemas de alto costo son eficientes en la remoción de contaminantes que son perjudiciales para las aguas superficiales.

La remoción de la contaminación biológica fue de 99.99% para los humedales en general, tanto para coliformes totales y fecales. Aunque no se encontró diferencias estadísticas, el lirio mostró mejor eficiencia para el sistema.

Al comparar el sedimentador y la caja de distribución, se encontró que no hay diferencia significativa ($p > 0.05$), es decir que el número de coliformes totales y fecales se presentan de una forma similar en ambos sitios.

La eficiencia de remoción de bacterias en el sedimentador al sistema de humedales mostro diferencia significativa estadísticamente ($p=0.000$), observándose una disminución en el número de coliformes totales y fecales.

El análisis de correlación no paramétrica de Spearman evaluó la eficiencia de cada humedal en referencia al tiempo de muestreo, obteniéndose una diferencia significativa para coliformes totales, lo cual mostro una tendencia en la disminución de bacterias, por el contrario para coliformes fecales se tuvo resultados no significativos, no detectándose cambio alguno con el transcurso del tiempo.

El humedal contribuyo a mejorar la calidad del agua del efluente a pesar de que la remoción de materia orgánica y de las bacterias coliformes de los humedales, aún no es la deseable, por ser sistemas de reciente construcción, aún les falta madurar

y esto se ve reflejado en el poco crecimiento de las macrófitas y de sus rizomas de corta profundidad.

El desarrollo y propagación del *Phragmites australis* y *Hedychium coronarium* en los humedales artificiales, fue lenta después de cuatro meses y medio de sembrado, con un incompleto desarrollo radicular en el suelo, lo que puede afectar el crecimiento de microorganismos alrededor de las raíces de las plantas y por lo tanto no lograr una diferencia entre las plantas utilizadas en el sistema.

La alta eficiencia en la remoción de los sólidos con un valor de 98.904% y DBO de 99.09% refleja que el medio poroso desempeña un papel fundamental en los sistemas de flujo subsuperficial en la retención de materia orgánica por procesos de sedimentación, floculación y filtración del medio.

La remoción del fósforo con un valor de 95.573% en el humedal artificial se debió principalmente por una buena capacidad de absorción del medio filtrante, principalmente por su composición química.

La eliminación de patógenos pudo haberse dado por diferentes mecanismos en los humedales H1 – H3 tales como: la adsorción sobre las partículas del sustrato, la toxicidad que sobre los organismos patógenos ejercen los antibióticos producidos por las raíces de las plantas y la acción depredadora de bacteriofagos y protozoos.

Los Humedales de Flujo Subsuperficial tienen la ventaja de ofrecer un menor contacto de personas y animales, con las aguas residuales debido a que en ellos se realizan unos determinados procesos que mejoran la calidad del agua.

RECOMENDACIONES

Es necesario el seguimiento con mejores controles para el mantenimiento y operación del sistema, en cuanto al flujo de agua para prevenir el cierre del caudal y obstrucción en tuberías a causa de acumulación de lodos.

Se propone la identificación de microorganismos presentes en el agua residual de actividades piscícolas debido a que sus afluentes son usados en diferentes actividades humanas, además deben realizarse otros estudios posteriores con este tipo de sistemas de control de contaminación del agua.

Debe recalcarse, que los resultados obtenidos son preliminares, y corresponden con el primer tiempo de retención de 4 días, por lo que habrán de ser contrastados en estudios a más largo plazo.

BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION –APHA. 1998. Standard methods for the determination of water and wastewater. APHA, Washington, D.C.
- CASTAÑO, J.M. Paredes, D. Criterios sobre diseño, operación y mantenimiento de filtros anaeróbicos de flujo ascendente. Revista Scientia et Technica. 2002
- DAVILA, Daniel. (2003) Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, región Ancash, Perú; usando tecnologías de humedales artificiales.
[URL:www.unmsm.edu.pe/iigeo/lacabamba/documentos/revista_ILGEO_SEMA.pdf](http://www.unmsm.edu.pe/iigeo/lacabamba/documentos/revista_ILGEO_SEMA.pdf) -
- DÍAZ, D. C. Sistema de recirculación de agua para cría de Alevín de Trucha Arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) y carpa común (*Cyprinus carpio*); en. Agua Potable para Comunidades Rurales: Reuso y Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Domesticas. Edición electrónica: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/contenido/capitulo07.html>. Colombia. 2000.
- ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre subsuperficial. URL: www.epa.gov/owmitnet/mtb/cs_00_019.pdf

- ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. Method 1604: Total Coliforms and *Escherichia coli* in Water by Membrane Filtration Using a Simultaneous Detection Technique (MI Medium). URL: www.epa.gov/nerlcwww/1604sp02.pdf
- FERNANDEZ, J. E. Una producción piscícola ambientalmente sostenible, documento borrador, propuesta doctoral en ingeniería con énfasis en ambiental y sanitaria. Universidad del Valle. Colombia. 2006.
- FINDLATER, B.C., Hobson, J. A. y Cooper, P.F. (1990). Reed bed treatment systems: Performance evaluation. En: Constructed Wetlands in water Pollution Control. Cooper, P.F. y Findlater, B.C. Editors. Pergamon Press. Great Britain.
- GARCÍA, Joan, MORATÓ, Jordi y BAYONA, Josep. Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Politécnica de Catalunya. Centro de Investigación y Desarrollo de Barcelona, CSIC. 2004.
- GUZMÁN, Carolina, CAMPOS, Claudia. Indicadores de contaminación fecal en biosólidos aplicados en agricultura. Revista de la Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana. Vol. 9, N° 1: 59-67. URL: www.javeriana.edu.co/universitas_scientiarum/vol9n1/articulo%207.pdf
- Humedales artificiales. Tecnologías Print. URL: depuranat.itccanarias.org/index2.php?option=com_tecnologias&func=ver&id=8 - 10k
- LARA, Jaime Andrés. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Barcelona, 1999.

- LOVERA, Daniel. Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, Perú; usando tecnologías de humedales artificiales. URL:www.unmsm.edu.pe/iigeo/lacabamba/documentos/revista_IIGEO_SEMA.pdf
- MITSCH, W. Gosselink, J. Wetlands. 3ª ed. USA. Ed. Wiley. 1998. p. 653 – 686.
- MORATÓ, Jordi. Eliminación de microorganismos y dinámica del biofilm en humedales construidos de flujo subsuperficial. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona. 2004.
- NUTTALL, P.M., Boon, A.G. y Rowell, M.R. (1997). Review of the design and management of constructed wetlands. Report 180. Construction Industry Research and Information Association. Great Britain.
- OJEDA, E. Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Colombia, Recursos Hídricos, Agua Potable y Saneamiento. URL: www.censat.org/Documentos/Agua/Remendar_Agua.pdf. Colombia. 2000.
- OJEDA, Arturo, PACHECO, Mario y ORTIZ, Diana. Identificación y Conteo de Huevos de Helminthos y Coliformes en lodos crudos y tratados anaerobicamente. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. URL: mail.femisca.org/publicaciones/Xcongreso/XCNIS046.pdf
- PLATA C. Extracción y manejo de lodos provenientes de los estanques en la cría industrial de la trucha. Charla presentada en Encuentro Piscícola Medellín Abril 15 de 2005.

- PULIDO, Mireya. Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. 2005
- REINOSO, Roberto. Mecanismos de eliminación de patógenos microbianos en humedales construidos. Universidad de León. URL: www.tecspar.org/Documentos/workshop%20%20Terrassa/03-07-02/05FReinoso.pdf –
- RIVAS, H. A. Lechos de plantas acuáticas (LPA) para el tratamiento de aguas residuales. Ingeniería Hidráulica en México. 1997
- ROLDÁN, G. Fundamentos de limnología neotropical. 1ª ed. Colombia. Editorial Universidad de Antioquia. 1992.

ANEXOS

DETECCION Y CUANTIFICACION DE COLIFORMES

En los anexos A-Z, se detallan las concentraciones de coliformes totales y fecales de acuerdo a los diferentes sitios muestreados.

Anexo A. Muestreo 29/04/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
COLIFORMES FECALES	Humedal H3	4	1	2,5
	Sedimentador	81	49	65000
	Caja de Distribución	229	179	204000
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	68	52	60
	Humedal H2	209	207	208
	Humedal H3	140	153	146,5
	Sedimentador	324	281	302500
	Caja de Distribución	153	181	167000

Anexo B. Muestreo 09/05/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
	Humedal H1	3	1	2
	Humedal H2	3	4	3,5
COLIFORMES FECALES	Humedal H3	2	1	1,5
	Sedimentador	427	364	395500
	Caja de Distribución	772	683	727500
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	46	59	52,5
	Humedal H2	383	411	397
	Humedal H3	51	61	56
	Sedimentador	543	566	554500
	Caja de Distribución	623	530	576500

Anexo C. Muestreo 13/05/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
	Humedal H1	3	2	2,5
	Humedal H2	5	2	3,5
COLIFORMES FECALES	Humedal H3	0	0	0
	Sedimentador	219	261	240000
	Caja de Distribución	380	286	333000
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	78	72	75
	Humedal H2	228	219	223,5
	Humedal H3	52	45	48,5
	Sedimentador	800	890	845000
	Caja de Distribución	1124	1009	1066500

Anexo D. Muestreo 16/05/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	426	460	443
	Humedal H2	48	69	58.5
	Humedal H3	11	5	8
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100mL
	1	2		
	Sedimentador	62	53	57.5
Caja de distribución	52	74	63	

Anexo E. Muestreo 20/05/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	845	778	811,5
	Humedal H2	7	12	9,5
	Humedal H3	51	47	49
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	>400	>400	489
	Humedal H2	134	125	129,5
	Humedal H3	195	214	204,5
COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
	1	2		
	Sedimentador	14	9	11,5
	Caja de Distribución	0	6	3
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	60	74	67
	Caja de Distribución	116	114	115

Anexo F. Muestreo 06/06/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	3	2	2,5
	Humedal H2	5	3	4
	Humedal H3	24	28	26
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	64	68	66
	Humedal H2	192	271	231,5
	Humedal H3	83	87	85
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Sedimentador	16	21	18,5
	Caja de Distribución	27	32	29,5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	827	874	850,5
	Caja de Distribución	832	643	737,5

Anexo G. Muestreo 10/06/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	3	4	3,5
	Humedal H2	2	1	1,5
	Humedal H3	1	49	25
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	283	300	291,5
	Humedal H2	1023	1134	
	Humedal H3	425	408	416,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Sedimentador	19	30	24,5
	Caja de Distribución	3	2	2,5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	778	714	746
	Caja de Distribución	986	1037	1011,5

Anexo H. Muestreo 17/06/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	8	5	6,5
	Humedal H2	4	10	7
	Humedal H3	0	6	3
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	493	469	481
	Humedal H2	297	290	293,5
	Humedal H3	298	294	296
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Sedimentador	4	2	3
	Caja de Distribución	6	3	4,5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	612	641	626,5
	Caja de Distribución	812	921	866,5

Anexo I. Muestreo 24/06/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	5	7	6
	Humedal H2	8	6	7
	Humedal H3	7	9	8
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	191	166	178,5
	Humedal H2	215	245	230
	Humedal H3	98	173	135,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Sedimentador	5	4	4,5
	Caja distribución	7	6	6,5

COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	82	96	89
	Caja de Distribución	156	159	157,5

Anexo J. Muestreo 04/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10³/100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES				
	Humedal H1	3	1	2
	Humedal H2	5	2	3,5
	Humedal H3	2	1	1,5
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	539	491	515
	Humedal H2	186	125	155,5
	Humedal H3	182	189	185,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10⁸/100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES				
	Sedimentador	6	4	5
	Caja de Distribución	1	3	2
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	1000	264	632
	Caja de Distribución	519	560	539,5

Anexo K. Muestreo 08/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES				
	Humedal H1	2	5	3,5
	Humedal H2	21	22	21,5
	Humedal H3	2	3	2,5
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	216	198	207
	Humedal H2			DNPSC
	Humedal H3	11	41	26
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES				
	Sedimentador	5	3	4
	Caja de Distribución	2	3	2,5
COLIFORMES TOTALES				
	Sedimentador	147	137	142
	Caja de Distribución	58	55	56,5

Anexo L. Muestreo 11/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES				
	Humedal H1	121	149	135
	Humedal H2	306	357	331,5
	Humedal H3	24	21	22,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES				
	Sedimentador	29	39	34
	Caja de Distribución	13	19	16

Anexo M. Muestreo 15/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	7	4	5,5
	Humedal H2	9	11	10
	Humedal H3	8	3	5,5
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	308	286	297
	Humedal H2	53	46	49,5
	Humedal H3	48	32	40
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Sedimentador	8	10	9
	Caja de Distribución	4	6	5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	20	27	23,5
	Caja de Distribución	45	52	48,5

Anexo N. Muestreo 18/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	244	234	239
	Humedal H2	13	9	11
	Humedal H3	11	20	15,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	44	312	178
	Caja de Distribución	93	94	93,5

Anexo Ñ. Muestreo 22/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	0	0
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	54	43	48,5
	Humedal H2	21	16	18,5
	Humedal H3	15	12	13,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Sedimentador	0	0	0
	Caja de Distribución	0	2	1
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	61	50	55,5
	Caja de Distribución	18	23	20,5

Anexo P. Muestreo 26/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	113	128	120,5
	Humedal H2	15	16	15,5
	Humedal H3	5	3	4
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	41	36	38,5
	Caja de Distribución	33	40	36,5

Anexo Q. Muestreo 29/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES				
	Humedal H1	2	0	1
	Humedal H2	8	7	7,5
	Humedal H3	0	6	3
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	118	173	145,5
	Humedal H2	218	221	219,5
	Humedal H3	582	541	561,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES				
	Sedimentador	3	5	4
	Caja de Distribución	5	29	17
COLIFORMES TOTALES				
	Sedimentador	46	49	47,5
	Caja de Distribución	47	46	46,5

Anexo R. Muestreo 01/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES				
	Humedal H1	116	132	124
	Humedal H2	215	200	207,5
	Humedal H3	102	74	88
COLIFORMES TOTALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
	Sedimentador	182	185	183,5
	Caja de Distribución	133	126	129,5

Anexo S. Muestreo 05/08/2008

COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100mL
		1	2	
	Humedal H1	135	128	131,5
	Humedal H2	5	2	3,5
	Humedal H3	0	2	1
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	823	925	874
	Humedal H2	46	54	50
	Humedal H3	80	87	83,5
COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100mL
		1	2	
	Sedimentador	7	6	6,5
	Caja de Distribucion	8	9	8,5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	73	55	64
	Caja de Distribucion	169	153	161

Anexo T. Muestreo 12/08/2008

COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100mL
		1	2	
	Humedal H1	2	1	1,5
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	1	0,5
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	113	117	115
	Humedal H2	41	34	37,5
	Humedal H3	50	47	48,5
COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100mL
		1	2	
	Sedimentador	9	11	10
	Caja de Distribucion	14	9	11,5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	31	27	29
	Caja de Distribucion	23	38	30,5

Anexo U. Muestreo 15/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	28	35	31,5
	Humedal H2	41	36	38,5
	Humedal H3	67	72	69,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100mL
		1	2	
	Sedimentador	87	41	64
Caja de distribución	152	204	178	

Anexo V. Muestreo 22/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100mL
		1	2	
COLIFORMES FECALIS	Humedal H1	2	0	1
	Humedal H2	2	3	2,5
	Humedal H3	1	0	0,5
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	5	4	4,5
	Humedal H2	186	192	189
	Humedal H3	585	544	564,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100mL
COLIFORMES FECALIS		1	2	
	Sedimentador	0	0	0
	Caja de Distribucion	0	0	0
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	3	5	4
	Caja de Distribucion	6	4	5

Anexo W. Muestreo 26/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Humedal H1	2	1	1,5
	Humedal H2	0	2	1
	Humedal H3	0	0	0
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	29	24	26,5
	Humedal H2	14	19	16,5
	Humedal H3	8	7	7,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Sedimentador	0	1	0,5
	Caja de Distribución	2	3	2,5
COLIFORMES TOTALES				
	Sedimentador	56	49	52,5
	Caja de Distribución	118	93	105,5

Anexo X. Muestreo 29/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	27	54	40,5
	Humedal H2	9	6	7,5
	Humedal H3	4	9	6,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100mL
	1	2		
	Sedimentador	4	7	5,5
	Caja de distribución	2	3	2,5

Anexo Y. Muestreo 02/09/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Humedal H1	4	3	3,5
	Humedal H2	1	2	1,5
	Humedal H3	5	1	3
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	18	13	15,5
	Humedal H2	23	26	24,5
	Humedal H3	9	11	10
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 mL
		1	2	
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Sedimentador	6	3	4,5
	Caja de Distribución	5	9	7
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	114	120	117
	Caja de Distribución	41	164	102,5

Anexo Z. Muestreo 05/09/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100mL
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	16	15	15,5
	Humedal H2	10	19	14,5
	Humedal H3	13	7	10
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100mL
	1	2		
	Sedimentador	110	93	101,5
	Caja de distribución	51	46	48,5

