

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



**CLAUDIA XIMENA LEMOS OLAVE  
OSCAR FELIPE JIMENEZ BELALCAZAR**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA  
POPAYÁN  
2009**

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

**CLAUDIA XIMENA LEMOS OLAVE  
OSCAR FELIPE JIMENEZ BELALCAZAR**

**DIRECTOR**

**MSc. 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  
2009**

A Dios por darme la vida e iluminarme el camino que debía seguir,  
A mis padres por su apoyo absoluto, cariño y comprensión,  
A mis hermanos por acompañarme, escucharme y aconsejarme,  
A toda mi familia pilar fundamental de los logros que hoy alcanzo,  
A mis amigos por estar a mi lado incondicionalmente,  
A mis compañeros de estudio por su constante colaboración y a todas  
las personas que contribuyeron en mi formación académica y personal.

Claudia Ximena

A mis padres y hermanos por darme su apoyo y ayuda absoluta,  
A Magaly, mi novia, por su académico afecto,  
A mi tía y primos por su incondicional colaboración  
Y a mis amigos, compañeros y demás personas que hicieron posible  
alcanzar este objetivo que sin duda es uno de los más importantes en mi vida.

Oscar

## **AGRADECIMIENTOS**

De forma muy especial, a nuestro director Msc. Gerardo Naundorf Sanz por su calidad humana, su tiempo, colaboración y orientación.

Al Msc. Javier Fernández, Ingeniero Ambiental de la Universidad Del Cauca y director del Proyecto Efluentes Piscícolas por su ayuda y colaboración.

A Andrés Salazar, Ingeniero Ambiental de la Universidad Del Cauca y coordinador técnico del proyecto efluentes piscícolas por su apoyo en la realización del proyecto.

A Carlos Andrés De La Cruz, Ingeniero Ambiental de la Universidad Del Cauca y coordinador técnico del proyecto efluentes piscícolas por su apoyo en la realización del proyecto.

A Hugo Nelson Arcila, Estudiante de Maestría en Recursos Hidrobiológicos Continentales por su 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 financiamiento 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.

Finalmente, queremos agradecer a todas las personas que de una u otra manera colaboraron en la cristalización de este trabajo.

**Nota de Aceptación**

---

---

---

**Director:** \_\_\_\_\_

**MS.c GERARDO NAUNDORF SANZ**

**Jurado:** \_\_\_\_\_

**MS.c CLARA INES GIRALDO A.**

**Jurado:** \_\_\_\_\_

**MS.c SANDRA CARLINA RIVAS Z.**

**Fecha de Sustentación: Popayán, 21 de Octubre de 2009**

## CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
INTRODUCCION	22
1. JUSTIFICACION	26
2. OBJETIVOS	28
3. MARCO TEORICO	29
3.1 SISTEMA DE HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS	29
3.2 PRINCIPIOS GENERALES PARA CREAR HUMEDALES	31
3.3 SELECCIÓN DEL SITIO	32
3.4 COMPONENTES DEL HUMEDAL	32
3.4.1 AGUA	32
3.4.2 SUBSTRATOS, SEDIMENTOS Y RESTOS DE VEGETACION	32
3.4.3 VEGETACION	33
3.4.4 MICROORGANISMOS	38
3.4.4.1 BACTERIAS	39
3.4.4.2 PATOGENOS	40
3.4.4.3 PARASITOS	41
4. ANTECEDENTES	43

4.1 HISTORIA DE LA CONTAMINACIÓN	43
4.2 EXPERIENCIA PREVIA	44
5. METODOLOGIA	48
5.1 ÁREA DE ESTUDIO.	48
5.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	49
5.2.1 Diseño	49
5.2.2 Contratación	50
5.2.3 Construcción	51
5.2.4 Ejecución	51
5.3 CARACTERISTICAS DEL SEDIMENTADOR	51
5.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS HUMEDALES	53
5.4.1 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	54
5.4.2 VEGETACION	55
5.4.3 CAUDAL	55
5.5 MÉTODO DE MUESTREO	56
5.6 TRATAMIENTO ESTADISTICOS DE LOS DATOS	57
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
6.1 CARACTERIZACION MICROBIOLOGICA	59

6.1.1 ANALISIS PARA COLIFORMES TOTALES	64
6.1.2. COLIFORMES FECALES	74
6.2 CARACTERIZACION FISICOQUIMICA	86
7. CONCLUSIONES	96
RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFIA	103
ANEXOS	111

## LISTA DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1. <i>Hedychium coronarium</i>	36
Figura 2. <i>Phragmites australis</i> .	37
Figura 3. Imagen Google Earth de la Truchifactoria El Diviso.	49
Figura 4. Vista general de los humedales.	51
A) Vista general del sedimentador.	52
B) Vista de la estructura de entrada y salida del agua en el sedimentador.	52
C) Vista del perfil general y dimensiones de cada humedal.	52
D) Corte transversal de la estructura de entrada y salida de aguas en el humedal.	52
Figura 5. Fotografía de los humedales de flujo subsuperficial.	54
Figura 6. Correlación entre las concentraciones de coliformes totales en sedimentador y caja de distribución con tiempo de retención de 2 días.	66
Figura 7. Correlación entre las concentraciones de coliformes totales en sedimentador y caja de distribución con tiempo de retención de 1 día.	67

Figura 8. Variación en la remoción de coliformes totales en los humedales con tiempo de retención de 2 días.	69
Figura 9. Variación en la remoción de coliformes totales en los humedales con tiempo de retención de 1 día.	69
Figura 10. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H1 con tiempo de retención de 2 días.	70
Figura 11. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H1 con tiempo de retención de 1 día.	71
Figura 12. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H2 con tiempo de retención de 2 días.	72
Figura 13. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H2 con tiempo de retención de 1 día.	72
Figura 14. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H3 con tiempo de retención de 2 días.	73
Figura 15. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H3 con tiempo de retención de día.	74
Figura 16. Correlación entre las concentraciones de coliformes fecales en sedimentador y caja de distribución con un tiempo de retención hidráulica de 2 días.	76

Figura 17. Correlación entre las concentraciones de coliformes fecales en sedimentador y caja de distribución con un tiempo de retención hidráulica de 1 día.	77
Figura 18. Variación en la remoción de coliformes fecales en los humedales con tiempo de retención de 2 días.	79
Figura 19. Variación en la remoción de coliformes fecales en los humedales con tiempo de retención de 1 día.	79
Figura 20. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H1 con tiempo de retención de 2 días.	80
Figura 21. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H1 con tiempo de retención de 1 día.	81
Figura 22. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H2 con tiempo de retención de 2 días.	82
Figura 23. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H2 con tiempo de retención de 1 día.	82
Figura 24. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H3 con tiempo de retención de 2 días.	83
Figura 25. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H3 con tiempo de retención de 1 día.	84

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales (UFC x 10 <sup>3</sup> /100mL) con un tiempo de retención de 2 días.	59
Tabla 2. Promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales (UFC x 10 <sup>3</sup> /100mL) con un tiempo de retención de 1 día.	60
Tabla 3. Porcentajes de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales con tiempo de retención de 2 días.	62
Tabla 4. Porcentajes de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales con tiempo de retención de 1 día.	63
Tabla 5. Promedios de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoria con tiempo de retención de 2 días.	87
Tabla 6. Porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoria con tiempo de retención de 2 días.	88
Tabla 7. Promedios de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoria con tiempo de retención de 1 día.	90

Tabla 8. Porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoria con tiempo de retención de 1 día.

## ANEXOS

### A. Resultado de los análisis microbiológicos

Datos microbiológicos con tiempo de retención hidráulica de 2 días

	Pág.
Tabla 9. Muestreo 10/10/2008	111
Tabla 10. a). Muestreo 17/10/2008	112
Tabla 10. b). Muestreo 17/10/2008	112
Tabla 11. a). Muestreo 21/10/2008	113
Tabla 11. b). Muestreo 21/10/2008	113
Tabla 12. Muestreo 24/10/2008	114
Tabla 13. a). Muestreo 28/10/2008	114
Tabla 13. b). Muestreo 28/10/2008	115
Tabla 14. Muestreo 31/10/2008	115
Tabla 15. a). Muestreo 07/11/2008	116
Tabla 15. b). Muestreo 07/11/2008	116
Tabla 16. a). Muestreo 11/11/2008	117

Tabla 16. b). Muestreo 11/11/2008	117
Tabla 17. Muestreo 14/11/2008	118
Tabla 18. a). Muestreo 21/11/2008	118
Tabla 18. b). Muestreo 21/11/2008	119
Tabla 19. Muestreo 25/11/2008	119
Tabla 20. a). Muestreo 05/12/2008	120
Tabla 20. b). Muestreo 05/12/2008	120
Tabla 21. a). Muestreo 12/12/2008	121
Tabla 21. b). Muestreo 12/12/2008	121
Tabla 22. Muestreo 19/12/2008	122
Tabla 23. a). Muestreo 23/12/2008	122
Tabla 23. b). Muestreo 23/12/2008	123
Tabla 24. a). Muestreo 30/12/2008	123
Tabla 24. b). Muestreo 30/12/2008	124
Tabla 25. a). Muestreo 20/01/2009	124
Tabla 25. b). Muestreo 20/01/2009	125
Tabla 26. Muestreo 22/01/2009	125
Tabla 27. a). Muestreo 27/01/2009	126

Tabla 27. b). Muestreo 27/01/2009	126
Tabla 28. Muestreo 29/01/2009	127
Tabla 29. a). Muestreo 03/02/2009	127
Tabla 29. b). Muestreo 03/02/2009	128
Tabla 30. Muestreo 05/02/2009	128
Tabla 31. Muestreo 10/02/2009	129
Tabla 32. a). Muestreo 12/02/2009	129
Tabla 32. b). Muestreo 12/02/2009	130
Datos microbiológicos con tiempo de retención hidráulica de 1 día.	
Tabla 33. a). Muestreo 24/02/2009	130
Tabla 33. b). Muestreo 24/02/2009	131
Tabla 34. Muestreo 26/02/2009	131
Tabla 35. a) Muestreo 03/03/2009	132
Tabla 35. b) Muestreo 03/03/2009	132
Tabla 36. Muestreo 05/03/2009	133
Tabla 37. Muestreo 10/03/2009	133
Tabla 38. a). Muestreo 12/03/2009	134

Tabla 38. b). Muestreo 12/03/2009	134
Tabla 39. a). Muestreo 27/03/2009	135
Tabla 39. b). Muestreo 27/03/2009	135
Tabla 40. Muestreo 31/03/2009	136
Tabla 41. a). Muestreo 02/04/2009	136
Tabla 41. b). Muestreo 02/04/2009	137
Tabla 42. a). Muestreo 14/04/2009	137
Tabla 42. b). Muestreo 14/04/2009	138
Tabla 43. a). Muestreo 16/04/2009	138
Tabla 43. b). Muestreo 16/04/2009	139
Tabla 44. Muestreo 21/04/2009	139
Tabla 45. Muestreo 23/04/2009	140
Tabla 46. Muestreo 30/03/2009	140
Tabla 47. Muestreo 04/05/2009	141
Tabla 48. Muestreo 07/05/2009	141
Tabla 49. a). Muestreo 12/05/2009	142
Tabla 49. b). Muestreo 12/05/2009	142
Tabla 50. Muestreo 14/05/2009	143

## **B. Resultado datos fisicoquímicos**

Datos fisicoquímicos con tiempo de retención de 2 días

Tabla 51. CAUDAL	144
Tabla 52. TEMPERATURA	144
Tabla 53. Ph	144
Tabla 54 y tabla 55. OXIGENO DISUELTO	145
Tabla 56. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	145
Tabla 57. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	146
Tabla 58. DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	146
Tabla 59. DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	146
Tabla 60. SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	147
Tabla 61. NITROGENO TOTAL	147
Tabla 62. NITROGENO AMONIACAL	147
Tabla 63. FOSFORO TOTAL	148
Datos fisicoquímicos con tiempo de retención de 1 día	
Tabla 64. CAUDAL	148
Tabla 65. TEMPERATURA	148
Tabla 66. pH	149

Tabla 67 y tabla 68. OXIGENO DISUELTO	149
Tabla 69. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	150
Tabla 70. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	150
Tabla 71. DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	150
Tabla 72. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	151
Tabla 73. SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES	151
Tabla 74. NITROGENO TOTAL	151
Tabla 75. NITROGENO AMONIACAL	152
Tabla 76. FOSFORO TOTAL	152

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

**RESUMEN**

Se analizó comparativamente la eficiencia de remoción de bacterias coliformes en un sistema de humedales de flujo subsuperficial con diferentes tiempos de retención hidráulica, instalados para el tratamiento de las aguas residuales de una truchifactoria ubicada en el corregimiento de Quintana, Municipio de Popayán. El sistema de humedales constó de tres filtros, dos a manera de filtros fitopedológicos con las plantas *Hedychium coronarium* y *Phragmites australis*; el tercero no tenía plantas, constando de un sistema filtrante de gravas y arenas solamente.

Los análisis bacteriológicos se realizaron con base en la técnica de filtración por membrana para coliformes totales y fecales, según los métodos estándar No. 9222 B y D para la determinación de aguas y aguas residuales (APHA, 1999). Se tomaron muestras en cinco puntos diferentes del sistema: salida de cada uno de los humedales, sedimentador y caja de distribución.

Se concluye que el humedal con *Phragmites australis* presentó el mejor porcentaje de remoción de bacterias coliformes totales con un tiempo de retención de un día (99,961%) y de dos días para bacterias coliformes fecales (99,964%); por otra parte el humedal con *Hedychium coronarium* presento el mayor porcentaje de remoción de bacterias coliformes totales para un tiempo de retención de dos días (99,871%) y de un día para coliformes Fecales (99,999%).

**Palabras claves:** Bacterias coliformes, Humedales de flujo subsuperficial, Truchifactoria, Retención Hidráulica, Rio Las Piedras.

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

**ABSTRACT**

The efficiency of removing of coliform bacteria in a subsurface wetland system with different hydraulic retention times for the treatment of wastewater from a trout factory was comparatively analyzed. The treatment system is located in the Quintana region of Popayán city. The wetland system consisted of three filters; two of the filters contain the plants *Hedychium coronarium* and *Phragmites australis*, the third had no plants, consisting just of a system of gravel and sand filter. The bacteriological analyses were done by the membrane filtration technique for total and fecal coliforms, according to standard methods No. 9222 B and D for the determination of water and wastewater (APHA, 1999). Samples were taken at five different points of the system: at the output for each of the wetlands, the sedimentation chamber and the distribution box. It is concluded that the wetland with *Phragmites australis* has the best rate of removing total coliform bacteria with a retention time of a day (99.961%) and two days for fecal coliform bacteria (99.964%). The filter with *Hedychium coronarium* showed the highest removal percentage coliform bacteria for a retention time of two days (99.871%) and one day for fecal coliform (99.999%)

**Keywords:** Coliforms Bacteria, Subsurface Flow Wetlands, Hydraulic Retention, Troutfactory, Las Piedras River.

## INTRODUCCIÓN

El agua ha sido y será de gran importancia a nivel biológico y social, pues además de ser un constituyente vital es requerida para el desarrollo social y económico. Es necesario que se realicen procesos para la conservación de la calidad fisicoquímica de esta, pues por sus características físicas y químicas (disolvente universal, polaridad, cohesión, adhesión, tensión superficial, acción capilar, calor específico, temperatura de fusión y evaporación, densidad, cristalización, entre otras) tiende de forma natural a generar un hábitat que agrupa una amplia y diversa microbiota, compuesta principalmente 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 hídricos. 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 en actividades de carácter biológico y antrópico. (Fernández, 2006).

Entre las numerosas actividades que contaminan las aguas, se destaca la piscicultura intensiva, alternativa importante para la producción de alimentos, que genera elevadas cargas de contaminación por densidades altas de cultivo y sistemas de alimentación, basados en alimentos concentrados con gran contenido proteico y minerales como calcio y magnesio. (Barco & Mora, 2009).

Por otra parte, la observación y detección de microorganismos indicadores causantes de enfermedades es muy importante para la microbiología sanitaria. Las bacterias del tracto intestinal en general no sobreviven en el medio acuático, están sometidas a estrés fisiológico y gradualmente pierden su capacidad para formar colonias en medios de cultivo adecuados (Prescott *et al*, 1996).

Su mortalidad depende de la temperatura del agua, los efectos de la radiación solar, la presencia de poblaciones bacterianas no naturales y la composición química del agua. En el laboratorio se intenta “resucitar” estos coliformes estresados para identificarlos y cuantificarlos usando medios selectivos y diferenciales. (Prescott *et al*, 1996).

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. (Castro, 2007).

El grupo de los coliformes se define como todas las bacterias Gram negativas en forma bacilar que fermentan la lactosa a temperatura de 35 a 37°C, produciendo ácido y gas (CO<sub>2</sub>) en 24 horas, aerobias o anaerobias facultativas, son oxidasa negativa, no forman esporas y presentan actividad enzimática de la B-galactosidasa (Ministerio de salud, 1998). Entre ellos se encuentran los diferentes géneros *Citrobacter*, *Enterobacter* y *Klebsiella*.y la especie *Escherichia coli*, (Organización Panamericana de la Salud, 1987; Camacho *et al*, 2009).

Los coliformes fecales también denominados coliformes termotolerantes, llamados así porque soportan temperaturas hasta de 45°C, comprenden un grupo muy reducido de microorganismos los cuales son indicadores de calidad, ya que son de origen fecal. En su mayoría están representados por el microorganismo *E .coli*

pero se pueden encontrar entre otros menos frecuentes, *Citrobacter freundii* y *Klebsiella pneumoniae* estos últimos hacen parte de los coliformes termotolerantes, pero su origen se asocia normalmente con la vegetación y solo ocasionalmente aparecen en el intestino. (Hayes, 1993; Munn, 2004)).

Los coliformes fecales integran el grupo de los coliformes totales, pero se diferencian de los demás microorganismos que hacen parte de este grupo, en que son indol positivo, su rango de temperatura óptima de crecimiento es muy amplio (hasta 45°C) y son mejores indicadores de higiene en alimentos y en aguas, la aparición de estos indica presencia de contaminación fecal de origen humano o animal, ya que las heces contiene dichos microorganismos, presentes en la flora intestinal y de ellos entre un 90% y un 100% son *E. coli* mientras que en aguas residuales y en muestras de aguas residuales este porcentaje disminuye hasta un 59%. (Gómez *et al*, 1999).

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, desarrolló 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, ubicada al oriente del Municipio de Popayán en el corregimiento de Quintana, cuenca del Río Las Piedras.

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. (Merino, 2006). En esta truchifactoria el agua es tomada del río Las Piedras, desviando una porción del caudal para la producción piscícola, para finalmente entregarla nuevamente al río. Es importante señalar que este río constituye la principal fuente de abastecimiento

de agua para el Municipio de Popayán, razón por la cual fue necesario realizar estudios pertinentes para conocer la calidad del recurso que ofrece y para el establecimiento de medidas de descontaminación.

Aunque los efluentes de la truchifactoría El Diviso tienen un tratamiento previo realizado por el sedimentador antes de la descarga al río Las Piedras, fue necesario desarrollar un sistema de tratamiento secundario de esta agua con el fin reducir los potenciales riesgos de contaminación de la fuente hídrica de la ciudad de Popayán. Para estos efectos, se evaluó un sistema de tratamiento montado a manera de planta piloto, el cual 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 anteriormente, las aguas residuales de la truchifactoría son vertidas al río Las Piedras, fuente de abastecimiento del acueducto para la ciudad de Popayán, lo cual exige adelantar estudios técnico-científicos 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 montado 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 aspectos como el comportamiento de las comunidades microbianas en cuanto al número poblacional, antes y después del sistema de tratamiento, aspecto sobre el cual se 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 en este caso 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 de microorganismos patógenos asociados a vectores de muchas enfermedades transmitidas por el agua y que significan un riesgo sanitario, tanto para la población servida por el río Las Piedras como para la biota presente en este medio y sus alrededores.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 GENERAL**

Estimar la capacidad de remoción de bacterias coliformes en 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**

- Establecer los niveles de contaminación biológica, medida como coliformes totales y fecales, por medio de la técnica estándar de filtración de membrana de las aguas residuales provenientes de la truchifactoría El Diviso.
- Evaluar la eficiencia de remoción de la contaminación biológica por parte del sistema de humedales de flujo subsuperficial de las aguas residuales provenientes de la truchifactoría El Diviso.
- Comparar la eficiencia de la remoción de bacterias coliformes entre diferentes tiempos de retención hidráulica.

### **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 espadañas, carrizos y juncos. 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 (Lara, 1999).

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. (Lara, 1999).

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 esta por debajo de la superficie del medio granular no está expuesta, con lo que se evitan posibles problemas de mosquitos y otros vectores que pueden llegar a presentarse en otro tipo de sistema. Tampoco se presentan inconvenientes con el acceso de público; igualmente, se evitan problemas en climas fríos ya que esta capa presta una mayor protección térmica. (Carrero, 2008).

En cuanto al rendimiento de los humedales, se puede decir que pueden tratar con eficiencia niveles altos de DBO, SST y nitrógeno (rendimientos superiores al 80%), así como niveles significativos de metales, trazas orgánicas y patógenos. No ocurre lo mismo con la eliminación de fósforo que es mínima en estos sistemas. (Lara, 1999).

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. (Fernández, 2006). Los mecanismos que tienen lugar para la depuración de contaminantes constituyen una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos. (Acevedo *et al*, 2007).

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 rizósfera.
- 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 (Fernández, 2006).

### **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 ( remoción de contaminantes biológicos)

- No se debe saturar el sistema con obras de ingeniería. (*Mitsch & Gosselink, 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 & Gosselink, 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. (Lara, 1999).

**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 substrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del substrato.
- El substrato 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 substratos se alteran cuando se inundan. En un substrato 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 substrato anóxico, lo cual será importante para la remoción de contaminantes como el nitrógeno y metales. (Lara, 1999).

**3.4.3. VEGETACIÓN.** Las macrofitas 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 substrato 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 sustrato.
- El tallo y los sistemas radiculares que dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.
- Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación. (Lara, 1999).

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:

***Hedychium coronarium*** K. D. Koenig.

**Nombre científico:** *Hedychium coronarium* Köern.

**Familia:** Zingiberaceae.

**Género:** *Hedychium*

**Especie:** *Hedychium coronarium*

Las plantas que incluye la familia Zingiberaceae, son herbáceas aromáticas, distribuidas principalmente en el Sureste de Asia. *Hedychium coronarium* K. Es nativa del Himalaya, fue introducida y cultivada en diferentes regiones tropicales del mundo, donde se ha naturalizado.(Santos, 2005). La planta se distribuye en altitudes desde el nivel del mar hasta los 1250 m.s.n.m. Las condiciones más importantes del clima para esta especie son temperatura y precipitación anual, seguidas de la humedad y el viento. (Medina, 1999).

Según estudios realizados en México y Brasil, temperaturas promedio de crecimiento, que varían entre 9 y 26 °C, con precipitaciones entre 1400 y 1600 mm de lluvias anuales, favorecen las mayores densidades de Población. (Santos, 2005).

El nombre del género *Hedychium* posiblemente le fue dado por el agradable perfume de sus flores. Los miembros de este género son plantas herbáceas, con rizomas horizontales, tuberosos y robustos. Las flores están dispuestas en panículas o en espigas terminales con brácteas, son grandes, vistosas, tubulosas, blancas y olorosas. Este género comprende 40 especies nativas del sur de Asia y de las Indias Orientales (León, 1946).

En un estudio sobre la fenología y la ecología de la planta, Santos encontró que *H. coronarium* crece entre 117, 1 y 181,4 cm de altura, dependiendo de las condiciones de humedad, radiación solar y temperatura. Así, el autor reporta las menores tasas de crecimiento para las plantas con máxima exposición solar y las mayores tasas de crecimiento las presentan las especies ubicadas en sitios sombreados húmedos. (Santos, 2005). *H. coronarium* fue catalogada por Calderón como: especie invasora, perjudicial para los ecosistemas y las especies nativas, y, por lo tanto, requiere atención y estudio. (Calderón, 2003).

**Figura 1. *Hedychium coronarium***



Fuente: <http://www.watergarden.org/s.nl/it.A/id.604/f>

***Phragmites australis.***

**Familia:** Poaceae

**Subfamilia:** Arundinoideae

**Tribu:** Arundineae

**Género:** *Phragmites*

**Especie:** *Phragmites australis*

Neófito de gran tamaño, perenne y provisto de un gran rizoma leñoso cubierto con vainas coriáceas semejantes a escamas. Tallo de 80 – 350 (1000) x 0.5 – 1.2 cm, verde grisáceas, aplanadas, que se adelgazan progresivamente hacia un largo ápice; vainas lisas, glabras, cubriendo los nudos y la lígula formada por una línea de pelos. La inflorescencia es una panícula laxa de 20 – 10 flores, la mayoría hermafroditas pero las inferiores masculinas o estériles. Glumas lanceoladas, tan

largas como las flores, membranosas y con 3 – 5 venas; son desiguales, siendo la inferior mitad a dos tercios de larga que la superior. Lemas estrechamente lanceoladas, agudas o acuminadas, con 3 – venas y largos pelos en la mitad proximal del dorso no geniculados. Raquis glabra. Anteras de hasta 2 mm de longitud. (Menéndez, 2005).

Son anuales y altos con un rizoma perenne extenso. Logran un muy buen cubrimiento en un año con separación de 0.6 m. 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. (Lara, 1999).

**Figura 2. *Phragmites australis***



Fuente: [http://luirig.altervista.org/schedeit/pz/phragmites\\_australis.htm](http://luirig.altervista.org/schedeit/pz/phragmites_australis.htm)

**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. (Lara, 1999).

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 fotosintetizadores, sigue la distribución vertical de los nutrientes pero es alterada por varios factores: la composición de la atmósfera del suelo, el pH, la humedad, la cantidad de minerales asimilables, la presencia de sustancias antimicrobianas. (Carrillo, 2003).

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. (Lara, 1999).

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. (Lara, 1999).

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. (Arcos *et al*, 2005).

El grupo de microorganismos coliformes es adecuado como indicador de contaminación bacteriana debido a que estos son contaminantes 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. (Arcos *et al*, 2005).

Los microorganismos que conforman el grupo de los coliformes; *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwardsiella* y *Citrobacter*, viven como saprófitos independientes o como bacterias intestinales. (Canosa, 1995). 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 (Prescott *et al*, 1996), 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. (Fernández *et al*, 2001).

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. (Prescott *et al*, 1996). 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. (Moore *et al*, 2002).

La presencia de coliformes totales debe interpretarse de acuerdo con el tipo de aguas: el agua potable no debe contener en ningún caso microorganismos considerados patógenos y debe estar libre de bacterias indicadoras de contaminación fecal (OPS, 1997). No debe contener sustancias o cuerpos extraños de origen biológico, orgánico, inorgánico o radiactivo en cantidades tales que la hagan peligrosa para la salud. (Resolución 2115, 2007).

En cuanto a microorganismos indicadores, ninguna muestra de agua podrá contener coliformes totales y *E. coli* en 100 mL, independientemente del tipo de análisis utilizado. (Resolución 2115, 2007). En aguas tratadas, los coliformes totales funcionan como una alerta de que ocurrió contaminación, sin identificar el origen. Indican que hubo fallas en el tratamiento o en la distribución. (Harwood *et al*, 2005).

**3.4.4.2 Patógenos.** En lo referente a las aguas superficiales que recibirán la descarga del efluente del humedal artificial, los patógenos de interés en los sistemas de tratamiento acuáticos son bacterias, y virus. Generalmente no es una preocupación la contaminación del agua subterránea, ni la transmisión a otros lugares vía aerosoles. El agua subterránea no se contaminará en sistemas que estén sellados por una arcilla impermeable o por una barrera de material sintético. (Lara, 1999).

La investigación se ha dirigido a la transmisión de enfermedades parasitarias a los animales y el hombre por medio de la aplicación al terreno de aguas residuales municipales y lodos de depuradora. Estudios significativamente completos indican que los parásitos no aumentan en el ganado que ha estado en contacto con pastos regados por agua residual. Los resultados son consistentes en varias regiones del mundo, como Estados Unidos, Polonia y Australia. Estos estudios, aunque no han sido realizados en sistemas de humedales artificiales, indican que el potencial de problemas serios no parece estar presente. (Lara, 1999).

Una de las bacterias que mas frecuentemente afecta a los cultivos de trucha, es la bacteria *Flavobacterium psychrophilum* la cual es el agente etiológico de la enfermedad denominada “cold water disease” (CWD) que afecta a salmones y truchas en las piscifactorías de todo el mundo. La patología causada por esta bacteria Gram negativa, aerobia estricta y psicotrofa, es recurrente y causa un alto grado de mortalidad entre alevines de trucha y salmón con la consiguiente pérdida económica. (Álvarez *et al*, 2002)

**3.4.4.3 Parásitos.** Los parásitos que son patógenos para el hombre se clasifican en dos grupos: los protozoos y los helmintos. Los protozoos son organismos unicelulares cuyo ciclo de vida incluye una forma vegetativa (trofozoito) y una forma resistente (quiste). El estado de quiste de estos organismos es relativamente resistente a la inactivación por medio de los sistemas de tratamiento convencional de agua residual. (Arcos *et al*, 2005).

Los huevos de helminto son un grupo de organismos que incluye los nemátodos, trematodos y cestodos. Las características epidemiológicas que hacen de los helmintos patógenos entéricos causantes de infección por contacto con agua contaminada, son su alta persistencia en el medio ambiente, la mínima dosis infecciosa, la baja respuesta inmune y la capacidad de permanecer en el suelo por largos periodos de tiempo. El estudio de los huevos de helminto a nivel ambiental

ha hecho necesaria la selección de un parásito indicador debido a las limitaciones en la detección a nivel de laboratorio. *Ascaris lumbricoides* se ha sugerido como un buen indicador del comportamiento de los huevos de helminto, sus ventajas son:

- Persiste en el medio ambiente por muchos meses, pero no se multiplica.
- Se puede identificar fácilmente.
- El índice de parasitismo a nivel mundial es muy alto.

El riesgo de transmisión es alto, debido a la elevada concentración de huevos que se puede encontrar. (Arcos *et al*, 2005).

## **4. ANTECEDENTES**

### **4.1 HISTORIA DE LA CONTAMINACIÓN**

La preocupación por el suministro de agua potable y recolección de aguas residuales 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. (Roldán, 1992).

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 para el tratamiento de agua con humedales 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.

Entre los sistemas de tratamiento similares montados se destacan:

- 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 Caldonó.
- Planta de Tratamiento - Nueva Esperanza, municipio de Piendamó.

- Planta de Tratamiento - Casa Rebolledo Manzano, Los Robles.
- Planta de Tratamiento - Casa Paredes Muñoz, La Variante.
- Planta de Tratamiento - Minoa, New York.
- Planta de Tratamiento - Aeropuerto de Edmonton, Alberta Canadá.

La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales FS incluye las espadañas y aneas (*Typha* spp.), los juncos (*Scirpus* spp.) y los carrizos (*Phragmites* spp.). En Europa los *Phragmites* son las plantas preferidas para esta aplicación. Esta planta tiene varias ventajas debido a que se trata de una planta durable de rápido crecimiento que no es una fuente alimenticia para aves o la vida silvestre. Sin embargo, en algunas partes de los Estados Unidos el uso de *Phragmites* no está permitido porque esta es una planta de crecimiento agresivo, por lo cual se tiene la preocupación de que invadir humedales naturales. En estos casos las espadañas y los juncos pueden ser utilizados. (Environmental Protection Agency EPA, 2000).

Investigaciones en Santee, California, con sistemas de flujo subsuperficial (SFS), han estudiado la contribución de la vegetación a la eliminación de bacterias de 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. (Lara, 1999).

En un estudio en humedales de flujo libre (FWS) en Listowel, Ontario, Canadá, los coliformes fecales fueron removidos en aproximadamente 90% cuando se operó con un tiempo de residencia de entre 6 y 7 días. Se han encontrado eficiencias en la remoción de coliformes totales de entre el 93 y el 99% durante el invierno y de 66 a 98% durante el verano con tiempos de retención de 7,5 días en humedales de flujo libre en Arcata, California. (Lara, 1999).

Midiendo la proporción de inactivación de bacterias de coliformes en bolsas selladas con incubación *in situ* debajo de la superficie de la arena gruesa de un humedal tipo SFS, el resultado que se produjo en la proporción de inactivación a través del sistema del humedal fue dos veces mayor comparado con un humedal sin contacto con la vegetación. La diferencia indica que la mitad de la degradación se debe a la acción que la vegetación efectúa. (Lara, 1999).

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 <1000/100ml 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. (Lara, 1999).

Los virus en la mayoría de los sistemas del tratamiento son más resistentes a la inactivación que las bacterias. Se probó la eficacia de remoción de un sistema de SFS en Santee, California, con un indicador de polución viral (MS-2 bacteriófago)

se informó un 98.3% en escala de demostración (800 m<sup>2</sup>) con un lecho de juncos y un tiempo de detención de 5,5 días. Esto involucró la plantación en el agua residual afluyente de virus MS-2 y el estudio de la eficacia de remoción subsecuente. El virus MS-2 se escogió porque es un bacteriófago de ARN casi de igual tamaño que los entovirus y es más resistente a los rayos UV el calor y la desinfección que la mayoría de los virus entéricos. (Lara, 1999).

El humedal artificial del tipo (SFS) en Santee, California recibió agua residual municipal que se cargó con cobre, zinc y cadmio. Con un tiempo de retención hidráulico de 5,5 días, las eficiencias de remoción fueron respectivamente 99, 97, y 99%. La remoción se atribuyó a los fenómenos de precipitación - adsorción. La precipitación química es reforzada por el metabolismo del humedal, sobre todo de las algas que reducen los niveles de CO<sub>2</sub> disuelto y aumentan el pH (Lara, 1999).

El humedal artificial de flujo subsuperficial de la Truchifactoria El Diviso fue evaluado previamente con un tiempo de retención de 4 días obteniéndose porcentajes de remoción para coliformes totales de 99,96% para H1 (humedal con *Phragmites australis*), 99,86% para H2 (humedal control) y de 99.89% para H3 (humedal con *Hedychium coronarium*) y coliformes fecales de 100% para H1, de 99,99% para H2 y de 99,98 % para H3. La remoción se atribuyo principalmente a los fenómenos de sedimentación, filtración /adsorción. (Barco & Mora, 2009).

## **5. METODOLOGÍA**

Este trabajo de grado hace parte del proyecto “Desarrollo y Adaptación de Tecnología para el Tratamiento de Efluentes Piscícolas” desarrollado por la Universidad del Cauca y el Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca (CREPIC) al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. En su fase inicial se realizó el análisis microbiológico y fisicoquímico con un tiempo de retención hidráulico de 4 días, posteriormente los autores de este documento realizaron los mismos análisis con tiempos de retención de 2 y 1 día.

### **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, con una altura de 2167 m.s.n.m., y una temperatura media anual de 10°C, en una zona de vida definida como bosque húmedo montano bajo (bh –MB) (Holdridge, 1967).

En dicha truchifactoría se está llevando 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 agua subsuperficial. El sistema cuenta con un pretratamiento del agua que incluye un desarenador, un sistema de floculación y una trampa de grasas, antes de ser enviada a una caja de distribución que alimenta los humedales en ensayo. El agua tratada se descarga en el Río las Piedras, el cual es el suministro primario de agua a la ciudad de Popayán.

**Figura 3.** Imagen tomada de Google Earth de la Truchifactoría El Diviso.



## **5.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO**

### **5.2.1 Diseño**

El diseño de la planta piloto para el tratamiento del efluente de la piscifactoría El Diviso, consta de un sedimentador, lecho de secado de lodos, caja de distribución y un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, en los cuales se evaluaron algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

El Humedal consta de 3 unidades en paralelo para evaluar dos especies de macrófitas. Tiene una relación W: L de 1:3, con dimensiones de 6m de largo y 2m de ancho cada una, con pantalla de distribución de flujo con ladrillo perforado. Dos humedales con especies vegetales para comparar la remoción de materia orgánica y macronutrientes y un humedal sin plantas (control), que sirve como

punto de comparación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos a evaluar.

El humedal fue diseñado para construirse con paredes exteriores en ladrillo tizón, paredes internas con ladrillo en soga. Todas las paredes internas con impermeabilización o repello. La losa de fondo, lleva una parrilla sencilla con concreto para básicamente impermeabilizar la estructura del suelo. La entrada y salida están compuestas de una pared en ladrillo perforado para distribuir el flujo a lo ancho del humedal.

El sedimentador, se diseño con una relación W: L de 1:2,5, con dimensiones de 3,25 m de largo, 1,3 m de ancho y 1,65m de profundidad de la columna de agua, con un borde libre de 25 cm.

Esta estructura tiene una capacidad para almacenar 5,28 m<sup>3</sup> teniendo en cuenta que el caudal promedio que sale del barrido es de 23 L/s, entonces el tiempo que se necesita para llenarse es 3,83 min. La tolva de lodos tiene un volumen de 4,6 m<sup>3</sup> para almacenamiento y posterior evacuación de los sólidos sedimentados.

El sedimentador tiene una pantalla para distribuir el flujo a través de la estructura con orificios de 4". La parte estructural es en concreto con doble parrilla.

### **5.2.2 Contratación**

Para la fase de construcción de la planta se hicieron tres cotizaciones con maestros de obra, de las cuales, se escogió finalmente la propuesta del Sr. Víctor Pablo Córdoba, técnico en sistemas constructivos livianos, basándose en el conocimiento del tema y experiencia que tiene en este tipo de instalaciones hidráulicas. Además fue el que arrojó un mejor índice de costo/beneficio para la obra y tuvo un costo total de 16'500.497 pesos, con un periodo de construcción de 45 días calendario.

### **5.2.3 Construcción**

La fecha de iniciación de la obra fue el 8 de noviembre de 2007 y la fecha de finalización fue el 23 de Diciembre de 2007.

### **5.2.4 Ejecución**

El día 13 de marzo de 2008 se implantaron las macrófitas en los 2 humedales a evaluar dando inicio a la etapa de muestreo y análisis fisicoquímico y microbiológico con un tiempo de retención hidráulica de 4 días.

## **5.3 CARACTERISTICAS DEL SEDIMENTADOR**

Los tanques de sedimentación disminuyen la velocidad de las aguas a parámetros 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. (Muñoz, 2008).

- 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.** Vista general de los humedales

**A)** Vista general del sedimentador

**B)** Vista de la estructura de entrada y salida del agua en el sedimentador.

**C)** Vista del perfil general y dimensiones de cada humedal

**D)** Corte transversal de la estructura de entrada y salida de aguas en el humedal



#### **5.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS HUMEDALES DE LA TRUCHIFACTORIA EL DIVISO**

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

- Dimensiones del humedal: 1.9m de largo x 80cm de ancho x 60cm de profundidad (Fig. 4).
- Sustrato de fijación: Grava de diferente calibre (gruesa y delgada).
- Vegetación predominante.
- Surcos: 4 surcos con capacidad para 13 plantas cada uno, para un total de 52 plantas por humedal.

Las macrófitas acuáticas se sembraron en estado de plántulas con 20cm de alto. La siembra se hizo en los cuatro surcos centrales, los dos restantes, cada uno en un costado sirve 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.

El tiempo de retención hidráulica fue una de las variables a ensayar en la capacidad de remoción de la contaminación. Previamente, el sistema fue operado con un tiempo de retención de cuatro días, pero para el presente estudio, se ensayó una disminución en el tiempo de retención hidráulica a dos (2) días y un (1) día, con el fin de avanzar en la recopilación de información técnica que permita establecer los mejores u óptimos criterios de funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales.

**Figura 5.** Fotografía de los humedales de flujo subsuperficial



#### **5.4.1 Operación y Mantenimiento**

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

- Proporcionar un amplio contacto del agua con la comunidad microbiana, la capa de residuos de vegetación y con el sedimento.
- Asegurarse que el flujo alcance todas las partes del humedal.
- Mantener un ambiente propicio para los microbios.
- Mantener un crecimiento vigoroso de la vegetación. (Lara, 1999).

La hidrología se verificó constantemente, en especial el nivel del agua para evitar que se este desarrollando flujo en la superficie.

### **5.4.2 Vegetación**

El manejo del nivel del agua es clave para el éxito de la vegetación utilizada en el sistema. En el humedal se tuvo mucho cuidado de no exceder los límites de tolerancia de las plantas, pues lo más importante en los humedales SSF es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degraden y se conviertan en restos de vegetación, que sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana que es la responsable en gran parte del proceso de purificación del agua que ocurre en este tipo de sistemas. (Carrero, 2008).

La vegetación fue inspeccionada regularmente y se eliminaron las especies invasoras. Se recomienda usar herbicidas solo en circunstancias extremas. (Carrero, 2008)

### **5.4.3 Caudal**

Las variaciones del caudal afluente al sistema de producción están en un orden del 2.7% lo cual es relativamente bajo, registrando un promedio de 421.98 L/s, mientras que en el efluente las variaciones son del 1.13% con un promedio de 418.13 L/s. La disminución de caudal en el efluente correspondiente a un 0.91 %, es decir, 3.98 L/s en promedio. El caudal que pasa por cada línea de producción está alrededor de 52.7 L/s en promedio. Con base en el caudal en la línea y el volumen del estanque se estimó el recambio de agua, el cual se determinó en 3.5 min aproximadamente por el método en canales de cemento con flujo de agua constante, denominados raceways. Este valor parece ser un nivel alto, ya que según Blanco (1984), el recambio óptimo para la cría de trucha arco iris en estructura tipo raceway es de 5 a 6 recambios por hora, mientras que en planta de El Diviso es de 17 aproximadamente, lo que significa que para la producción se garantiza el flujo de oxígeno disuelto que exige este tipo de cultivo súper intensivo. La velocidad de flujo promedio en los estanques se determinó con base en las

dimensiones del mismo (0.9m de profundidad media de columna de agua y 2m de ancho), Esta velocidad es del orden de 0.03m/s la cual está por debajo de los límites (0.1 a 0.6m/s) recomendados por Breasen and Westers 1986 (citado por True *et al*, 2004), para evitar la sedimentación de partículas dentro de la zona de cría del estanque, por lo cual se presume una alta sedimentabilidad de partículas dentro del estanque, especialmente en la zona de cría de los peces. Velocidades de flujo de 0.057, 0.050, 0.049 y 0.021 m/s, fueron reportados por True *et al*, 2004, en estanques operados en los Estados Unidos, confirmando la alta sedimentación de partículas que se presenta en la zona de cría. (De La Cruz & Salazar, 2007).

## **5.5 MÉTODO DE MUESTREO**

El método que se utilizó en la determinación de bacterias coliformes como indicadores de contaminación fecal fue la técnica de filtración por membrana -FM, recomendada por la norma colombiana, la cual se basa en la capacidad de las bacterias coliformes y otros patógenos bacterianos de desarrollar colonias cuando se incuban en medios indicados para este tipo de estudios como el agar m-Endo o agar EMB, durante 24 horas, a  $35 \pm 0,5$  °C para coliformes totales y a  $44 \pm 0,5$  °C para coliformes fecales. La enumeración de coliformes totales y fecales por FM se llevó a cabo en una etapa y por duplicado, realizando diferentes diluciones de acuerdo al sitio donde fue tomada la muestra, para el sedimentador y la caja de distribución se hizo una dilución de  $10^6$  y para los humedales de  $10^3$ , filtrando un volumen de 100 mL por un filtro de membrana estéril con un tamaño de poro de 0,45 micrones e incubando luego el filtro en un ambiente húmedo en el medio de cultivo EMB (eosina azul de metileno) el cual es indicado para este tipo de bacterias. Elegimos volúmenes y diluciones que permitieron obtener aproximadamente entre 20 y 80 colonias en la placa. Los resultados se expresaron como colonias de coliformes totales y fecales 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.

Se tomaron muestras de agua en cada uno de los humedales, en la caja de distribución y el sedimentador. Uno de los humedales contiene la especie vegetal *Hedychium coronarium*, el otro *Phragmites australis* y el tercero actuó como control y no tuvo ningún tipo de macrófita acuática implantada. La frecuencia de muestreo fue de 2 veces por semana. Las muestras recogidas se preservaron en frío y se trasladaron inmediatamente al laboratorio de Microbiología del Departamento de Biología de la Universidad Del Cauca, donde se analizaron por duplicado.

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 9222 B. Métodos para la determinación de aguas y aguas residuales (APHA, 1999).
- Detección y cuantificación de coliformes fecales: técnica filtración por membrana, de acuerdo con el método 9222 D. Métodos para la determinación de aguas y aguas residuales (APHA, 1999).

## **5.6 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 estableció estadísticamente, cual fue el humedal que presentó la mayor remoción de la contaminación biológica. Para este efecto, se realizaron

pruebas estadísticas estándar, análisis de varianza y pruebas uni y multivariadas, utilizando el software de procesamiento estadístico SPSS, versión académica 11.5.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 CARACTERIZACION MICROBIOLÓGICA

En la tabla 1 se observan los promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales, expresadas como UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, en los cuales se tuvo en cuenta los valores mínimos y máximos de los diferentes sitios, con tiempo de retención de 2 días.

**Tabla 1.** Promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales (UFC x 10<sup>3</sup>/100mL) con un tiempo de retención de 2 días.

Tiempo de retención de 2 días		H1	H2	H3	CAJA DE DISTRIBUCION	SEDIMENTADOR
COLIFORMES TOTALES	PROMEDIO	158,79	160,96	104,4	68833,33	81395,83
	MÍN - MÁX	1,5 - 844	4 - 837	3 - 712,5	2000 - 211000	7000 - 386500
COLIFORMES FECALES	PROMEDIO	1,786	4,643	4,429	2678,57	4964,29
	MÍN - MÁX	0 - 8,5	0 - 41	0 - 30,5	500 - 19500	500 - 33500

Los resultados fueron, para Coliformes Totales, en H1 un valor mínimo de 1,5 y un valor máximo de 844 con un promedio de 158,79 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para H2 entre 4 y 837 con un promedio de 160,96 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para H3 entre 3 y 712,5 con un promedio de 104,4 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para Sedimentador entre 7.000 y 386.500 con un promedio de 81.395,83 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL y para Caja de

distribución entre 2.000 y 211.000 con un promedio de 68.833,33 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL.

Para Coliformes Fecales, en H1 se obtuvo un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 8,5 con un promedio de 1,786 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para H2 entre 0 y 41 con un promedio de 4,643 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para H3 entre 0 – 30,5 con un promedio de 4,429 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para Sedimentador entre 500 y 33.500 con un promedio de 4964,29 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL y para Caja de distribución entre 500 y 19.500 con un promedio de 2.678,57 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL.

En la tabla 2 se observan los promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales, expresadas como UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, en los cuales se tuvo en cuenta los valores mínimos y máximos de los diferentes sitios, con tiempo de retención de 1 día.

**Tabla 2.** Promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales (UFC x 10<sup>3</sup>/100mL) con un tiempo de retención de 1 día.

Tiempo de retención de 1 día		H1	H2	H3	CAJA DE DISTRIBUCION	SEDIMENTADOR
COLIFORMES TOTALES	PROMEDIO	31,25	45	42,27	49277,77	81444,44
	MÍN - MÀX	7,5 -72,5	3,5 - 163	6 – 373	5000 - 195000	8000 – 346500
COLIFORMES FECALES	PROMEDIO	1,375	1,438	0,25	6812,5	18187,5
	MÍN - MÀX	0 – 8,5	0 – 9,5	0 - 2	500 - 30000	1500 – 56500

Para Coliformes Totales en H1 un valor mínimo de 7,5 y un valor máximo de 72,5 con un promedio de 31,25 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para H2 entre 3,5 y 163 con un promedio de 45 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para H3 entre 6 y 373 con un promedio de 42,27 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para Sedimentador entre 8000 y 346.500 con un promedio de 81.444,44 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL y para Caja de distribución entre 5.000 y 195.000 con un promedio de 49.277,77 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL.

Para Coliformes Fecales en H1 un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 8,5 con un promedio de 1,375 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para H2 entre 0 y 9,5 con un promedio de 1,438 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para H3 entre 0 y 2 con un promedio de 0,25 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL, para Sedimentador entre 1.500 y 56.500 con un promedio de 18.187,5 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL y para Caja de distribución entre 500 y 30.000 con un promedio de 6.812,5 UFC x 10<sup>3</sup>/100mL.

Al analizar las tablas anteriores se establece que entre los filtros fitopedológicos no existe una gran diferencia en los promedios de UFC/100mL, pero al comparar los valores del sedimentador y de la caja de distribución con los humedales, se observa una amplia diferencia debido a que el sedimentador actúa como un sistema de tratamiento primario de las aguas provenientes de la piscifactoría. Según Floto (2005), este tratamiento elimina alrededor del 60 % de los sólidos en suspensión, el 35 % de los materiales orgánicos y 35 % de la demanda bioquímica de oxígeno. El agua proveniente del sedimentador se descarga en la caja de distribución, y posteriormente se suministra a los humedales que realizan un tratamiento secundario.

La tabla 3, muestra el valor del porcentaje de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales con tiempo de retención de 2 días para lo cual se tuvo en cuenta el promedio de los datos originales, teniéndose para Coliformes totales en H1 un valor de 99,805% , para H2 un valor de 99,802% y para H3 un valor de 99,871 % .

Para coliformes fecales en H1 un valor de 99,964 %, para H2 un valor de 99,907 % y para H3 un valor de 99,911 %.

En la evaluación de un modelo piloto integrado para postratamiento del efluente del Reactor Anaerobio de Flujo a Pistón (RAP) utilizando *Spirodela* sp. (Gamarra *et al*, 2006) se presentaron similares patrones de remoción de bacterias coliformes totales y fecales, obteniéndose una mayor remoción para coliformes fecales de 98,56% frente a un 96,4% para coliformes totales indicando probablemente que las macrófitas presentan una mayor afinidad con *Escherichia coli* y por ende genera una mayor asociación simbiótica (planta-bacteria) produciendo así una mayor remoción.

**Tabla 3.** Porcentajes de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales con tiempo de retención de 2 días.

<b>Tiempo de retención de 2 días</b>		<b>HUMEDAL H1</b>	<b>HUMEDAL H2</b>	<b>HUMEDAL H3</b>
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Remoción (%)	99,805	99,802	99,871
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Remoción (%)	99,964	99,907	99,911

La tabla 4, muestra el valor del porcentaje de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales con un tiempo de retención de 1 día, para lo cual se tuvo en cuenta el promedio de los datos originales, teniéndose para coliformes totales en

H1 un valor de 99,961%, para H2 un valor de 99,944% y para H3 un valor de 99,948 % .

Para coliformes fecales en H1 un valor de 99,992 %, para H2 un valor de 99,992 % y para H3 un valor de 99,999 %.

**Tabla 4.** Porcentajes de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales con tiempo de retención de 1 día.

<b>Tiempo de retención de 1 día</b>		<b>HUMEDAL H1</b>	<b>HUMEDAL H2</b>	<b>HUMEDAL H3</b>
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Remoción (%)	99,961	99,944	99,948
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Remoción (%)	99,992	99,992	99,999

La remoción de bacterias coliformes fecales fue más eficiente que la remoción de coliformes totales para ambos tiempos de retención hidráulica.

Para calcular el porcentaje de remoción se utilizo la siguiente formula:

$$\% \text{ Remoción} = [(C \text{ afluente} - C \text{ efluente}) / C \text{ afluente}] \times 100$$

Tomado de: Chuchón & Aybar, 2008.

Donde:

C afluente: es el promedio de Coliformes del sedimentador.

C efluente: es el promedio de Coliformes para cada uno de los humedales evaluados.

### **6.1.1. ANALISIS PARA COLIFORMES TOTALES**

Se utilizó el software de procesamiento estadístico SPSS, versión académica 11.5, 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 entre los humedales no existe diferencia significativa para tiempos de retención de 2 días y 1 día respectivamente ( $p=0.165$  y  $p=0.069$ ); esto probablemente se debe a que en los humedales ocurren procesos bioquímicos asociados a la biopelícula que crece adherida al medio granular y a las partes subterráneas de las plantas, que en conjunto hacen que se degrade o transforme los contaminantes. (García *et al*, 2004).

Se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney para dos muestras independientes para establecer si los humedales con macrófitas son más eficientes en la remoción de bacterias coliformes que el humedal control. Para tiempo de retención de 2 días se obtuvieron los siguientes resultados:

Comparando H1 y H2 se produjo un valor no significativo  $p= 0.634$ , entre H2 Y H3 un valor no significativo  $p= 0.257$  y confrontando H1 y H3 un valor significativo  $p= 0.048$ .

Para tiempo de retención de 1 día se obtuvieron los siguientes resultados:

Analizando H1 y H2 se reporto un valor no significativo  $p= 0.411$ , entre H2 Y H3 un valor significativo  $p= 0.039$  y relacionando H1 y H3 un valor no significativo  $p= 0.076$

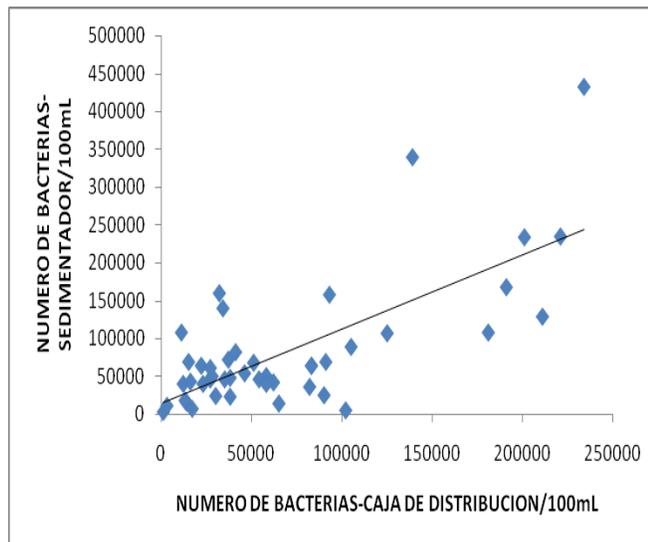
Aunque la diferencia de significancia entre los humedales con y sin macrófitas no es en todos los casos estadísticamente significativa, la comparación de los porcentajes de remoción muestra que los humedales con macrófitos realizaron una mayor remoción.

Según Gamarra *et al* (2006), las diferencias de remoción de coliformes entre los humedales con y sin macrófitas, se deben posiblemente a factores biológicos asociados con las plantas, como son: productos metabólicos segregados por estas, acción de los microorganismos asociados con las raíces y la presencia de oxígeno en el medio, generalmente proporcionado por las plantas.

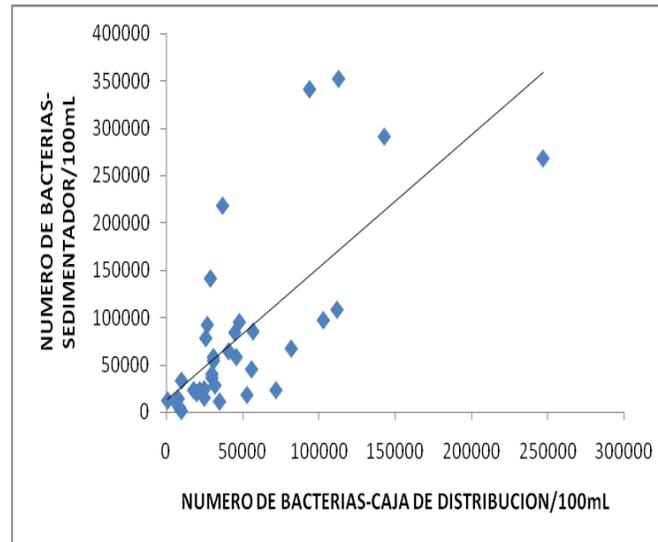
Se realizó el análisis para los sitios de muestreo del sedimentador y la caja de distribución para observar como es la remoción de bacterias del grupo coliformes al pasar el agua de un sitio a otro. Para la comparación entre los sitios sedimentador y la caja de distribución, a los datos se les realizó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney, obteniéndose un valor de prueba no significativa  $p= 0.397$  y  $p=0.295$  para un tiempo de retención de 2 días y un día respectivamente, debido a que entre el sedimentador y la caja de distribución no se ejecuta ningún tratamiento de remoción biológica, pero aclarando que el sedimentador presenta un promedio mayor de coliformes que las presentes en la caja de distribución.

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 con un tiempo de retención hidráulica de 2 días (fig. 6) y con un tiempo de retención hidráulica de 1 día (fig. 7). El resultado demuestra que ambos sitios son semejantes, en cuanto al comportamiento de remoción de contaminantes.

**Figura 6.** Correlación entre las concentraciones de coliformes totales en sedimentador y caja de distribución con tiempo de retención de 2 días.



**Figura 7.** Correlación entre las concentraciones de coliformes totales en sedimentador y caja de distribución con tiempo de retención de 1 día.



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 con mayor variación y el sedimentador para cada tiempo de retención.

Para un tiempo de retención de 2 días se escogió el humedal H3 y para un tiempo de retención de 1 día se tomo como referencia el humedal H1. Para tal análisis se aplicó la prueba T para muestras independientes y se concluyó que la diferencia es significativa estadísticamente ( $p=0.000$ ) para ambos tiempos; es decir, que cuando se pasa del sedimentador al humedal H3 con un tiempo de retención de 2 días o del sedimentador al humedal H1 con un tiempo de retención de 1 día se encuentra una gran disminución en el número de coliformes totales.

Al comparar el sedimentador con los demás humedales con sus respectivos tiempos de retención sucedió lo mismo, mostrando que el sistema es eficiente en

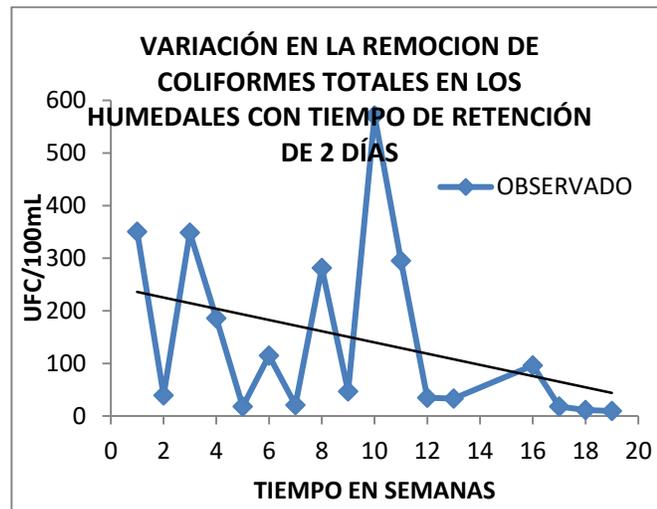
la remoción de bacterias coliformes mejorando la calidad del agua vertida al Río Las Piedras.

Los humedales artificiales son, en general, capaces de una reducción de coliformes de entre uno a dos logaritmos con tiempos de retención hidráulica de 3 a 7 días que en muchos casos no es suficiente para satisfacer los requisitos de vertido que a menudo especifican  $< 200$  NMP/100 mL. Serían necesarios tiempos de retención superiores a 14 días para lograr reducciones de 3 ó 4 logaritmos. (Lara, 1999).

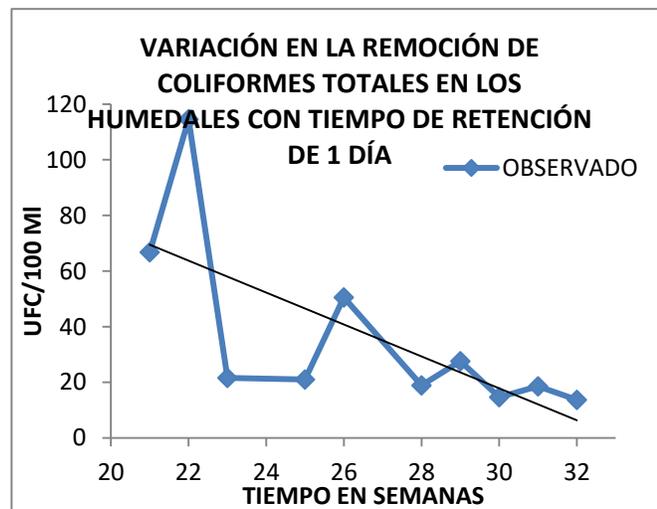
Otra variable importante que se tuvo en cuenta fue el tiempo de operación de los humedales cuya duración fue de 7 meses con periodos de retención hidráulica de 2 días y 1 día, realizados según los cambios propuestos en el proyecto general teniendo en cuenta los diferentes tiempos de retención a evaluar.

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  $p= 0.001$  con un tiempo de retención de 2 días y  $p= 0.000$  con tiempo de retención de 1 día (fig. 8 y 9), mostrando una correlación positiva. 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.

**Figura 8.** Variación en la remoción de coliformes totales en los humedales con tiempo de retención de 2 días.



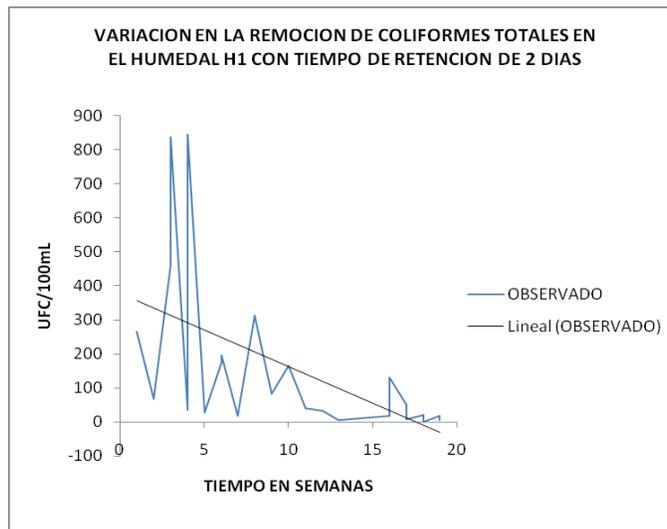
**Figura 9.** Variación en la remoción de coliformes totales en los humedales con tiempo de retención de 1 día.



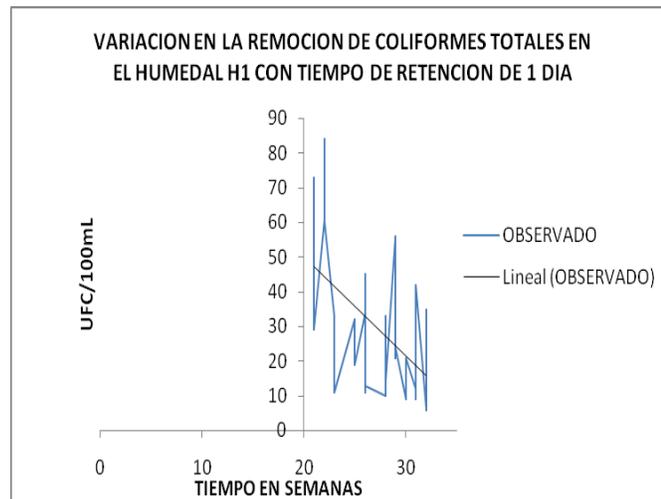
- Eficiencia del humedal H1 ( Humedal con *Phragmites australis*)

Se aplicó el análisis de correlación no paramétrica de Spearman con una significancia de  $p=0.000$  con un tiempo de retención de 2 días (fig.10) y  $p=0.007$  con un tiempo de retención de 1 día (fig.11), lo cual muestra una tendencia a disminuir el número de bacterias coliformes con el transcurso del tiempo.

**Figura 10.** Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H1 con tiempo de retención de 2 días.



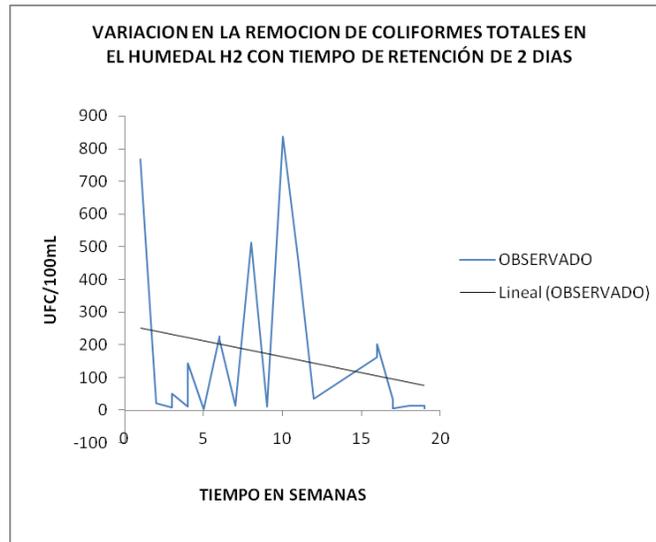
**Figura 11.** Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H1 con tiempo de retención de 1 día.



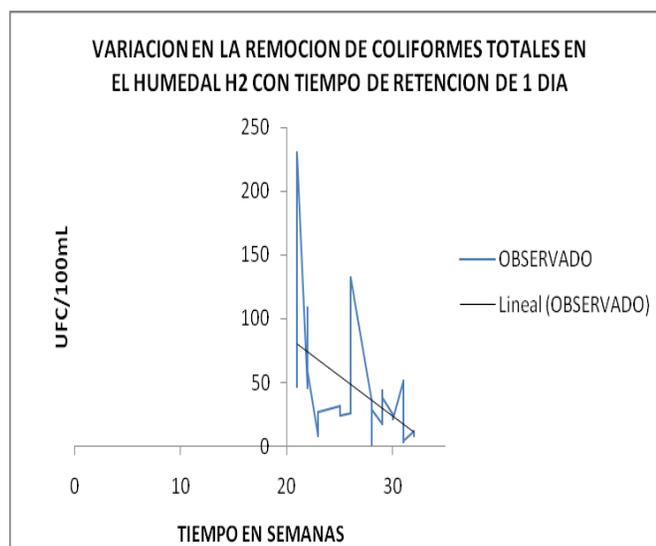
- Eficiencia del humedal H2 (Humedal control)

Se aplicó el análisis de correlaciones de Spearman obteniéndose un valor no significativo  $p= 0.302$  con un tiempo de retención de 2 días (fig.12), por el contrario se obtuvo un valor significativo  $p=0.000$  con un tiempo de retención de 1 día (fig. 13). Este resultado muestra que el humedal H2 presenta una tendencia a disminuir levemente el número de bacterias coliformes con un tiempo de retención de 2 días. Mientras que con un tiempo de retención de 1 día tiende a disminuir el número de bacterias considerablemente con el paso del tiempo.

**Figura 12.** Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H2 con tiempo de retención de 2 días.



**Figura 13.** Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H2 con tiempo de retención de 1 día.



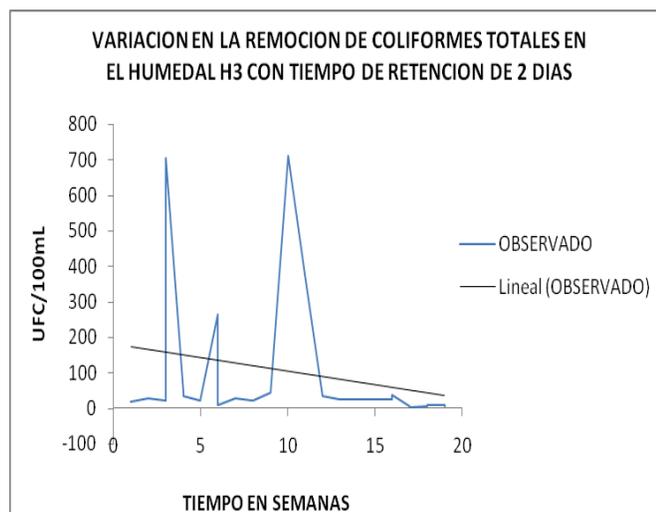
- Eficiencia del humedal H3 ( Humedal con *Hedychium coronarium*)

Se aplicó el análisis de correlación no paramétrico de Spearman con una significancia  $p=0.022$  y  $p= 0.000$  con un tiempo de retención de 2 días y 1 día respectivamente, lo cual muestra una tendencia a disminuir el número de bacterias coliformes con el avance del tiempo.

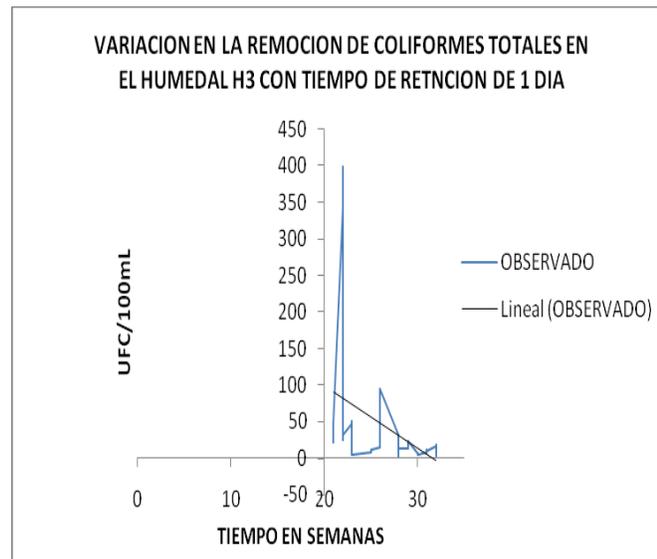
Se observan unos picos en las semanas 3 y 10 (fig. 14) debido probablemente a que hubo grandes descargas de materia orgánica en forma de sólidos suspendidos o periodos de lluvia.

Cuando se presentan eventos intensos de lluvia los picos de caudal influyen negativamente en la eficiencia de remoción de coliformes. Como resultado, la mayoría de los sistemas utilizan alguna forma de desinfección final. (Lara, 1999).

**Figura 14.** Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H3 con tiempo de retención de 2 días.



**Figura 15.** Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H3 con tiempo de retención de día.



Como norma general, los humedales pueden reducir los coliformes fecales en uno o dos ordenes logarítmicos (García *et al.*, 1999), y también son capaces de reducir otros patógenos, como protozoos y helmintos (Rivera *et al.*, 1995; Lahora, 2002).

### 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 la distribución normal (prueba de normalidad) al igual que en coliformes totales, pero si con homogeneidad de varianza, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal- Wallis. Los resultados reportan que la prueba es no significativa  $p=0.956$  y  $p=0.605$  con un tiempo de retención de 2 días y un tiempo de retención de 1 día respectivamente. Se concluye que no hay diferencia significativa estadísticamente entre los humedales, debido a que los tres

humedales presentan un comportamiento similar en la remoción de coliformes fecales.

Adicionalmente se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney para dos muestras independientes para establecer si los humedales con macrófitas son más eficientes en la remoción de bacterias coliformes que el humedal control.

Para tiempo de retención de 2 días se obtuvieron los siguientes datos:

Comparando H1 y H2 se produjo un valor no significativo  $p= 0,948$ , entre H2 Y H3 un valor no significativo  $p= 0,867$  y confrontando H1 y H3 un valor no significativo  $p= 0,745$ .

Para tiempo de retención de 1 día se obtuvieron los siguientes datos:

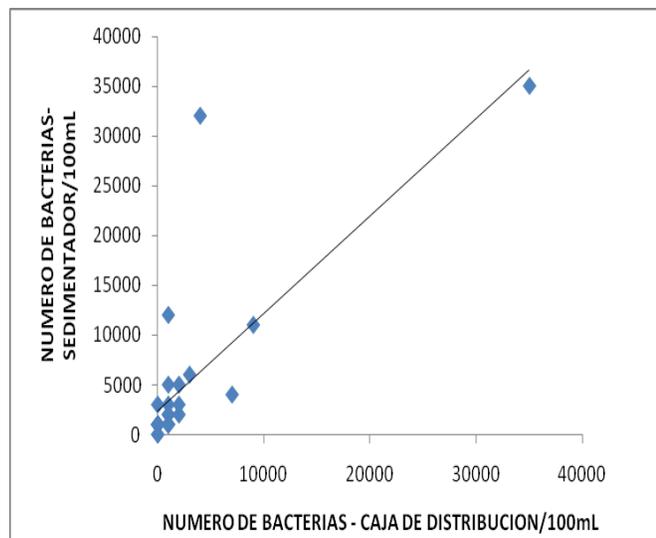
Analizando H1 y H2 se reporto un valor no significativo  $p= 0,809$ , entre H2 Y H3 un valor no significativo  $p= 0,515$  y relacionando H1 y H3 un valor no significativo  $p= 0,696$ .

Se puede concluir que sin importar el tipo del humedal o la especie de macrófita, la remoción global de coliformes fecales es sobresaliente, pero es de resaltar que el porcentaje de remoción de los humedales implantados con el material vegetal es mayor.

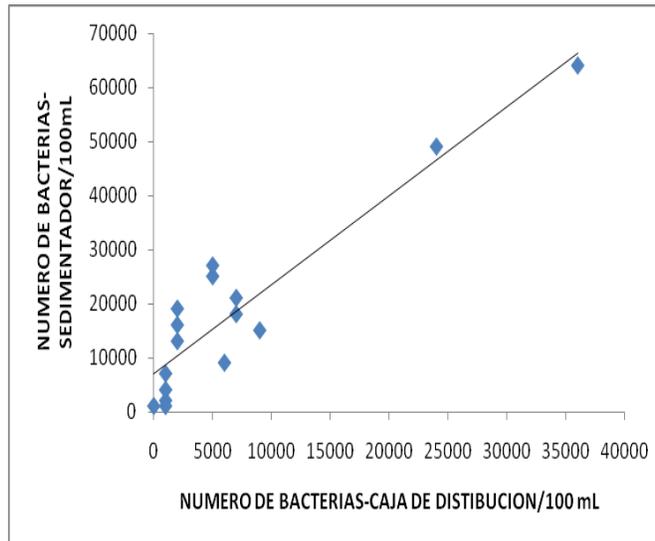
Se realizó la comparación en el número de UFC/100ml del sedimentador con la caja de distribución, aplicando la prueba no paramétrica de Mann-Whitney y un análisis de correlación, para identificar asociación o dependencia entre los datos. Se observó una correlación positiva entre el número de UFC/100ml del sedimentador y la caja de distribución. La prueba de Mann-Whitney reporta una significancia  $p=0.012$  y  $p=0.015$  con un tiempo de retención de 2 días (fig. 16) y 1

día (fig. 17) respectivamente, lo cual muestra que la prueba es significativa. Se concluye que hay diferencia significativa entre el sedimentador y la caja de distribución, es decir que el número de bacterias presentes en el sedimentador es mayor que en la caja de distribución.

**Figura 16.** Correlación entre las concentraciones de coliformes fecales en sedimentador y caja de distribución con un tiempo de retención hidráulica de 2 días.



**Figura 17.** Correlación entre las concentraciones de coliformes fecales en sedimentador y caja de distribución con un tiempo de retención hidráulica de 1 día.



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 con un tiempo de retención de 2 días y entre el humedal H3 y el sedimentador con un tiempo de retención de 1 día. La comparación estadística se realizó entre estos humedales debido a que presentaron una mayor variación en los resultados comparados con los demás humedales. Se aplicó la prueba T para muestras independientes dando como resultado que la diferencia es significativa ( $p=0.000$ ) en ambos casos, es decir que cuando se pasa del sedimentador al humedal H1 o H3 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 independientemente del humedal y del tiempo de retención.

Los humedales operados a bajos tiempos de retención hidráulica se ven afectados negativamente en la eficiencia de remoción de agentes patógenos (Haberl *et al*, 2003 ; Brix ,1998). A pesar de esto, en nuestro trabajo obtuvimos porcentajes de remoción superiores al 99% con ambos tiempos de retención hidráulica, esto probablemente se debe a que se produjo una excelente asociación entre los

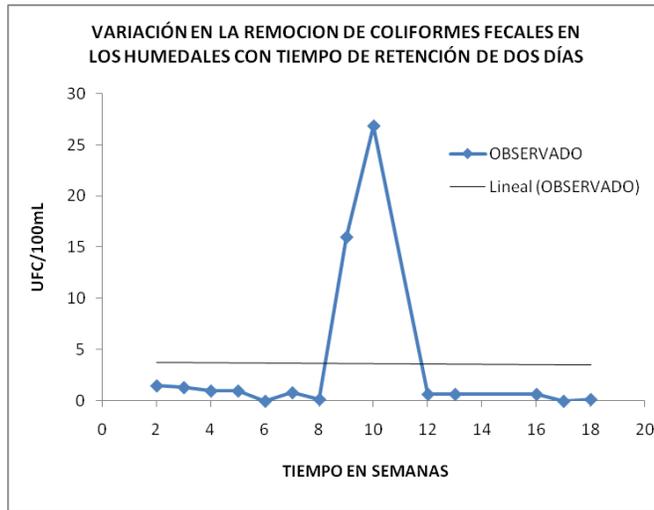
microorganismos presentes en las raíces-rizomas con las macrófitas, además de las condiciones ambientales de la zona y el diseño específico del humedal.

La eliminación de los contaminantes sucede gracias a una sinergia de procesos físicos, químicos y bioquímicos, aunque los principales son los bioquímicos asociados a la biopelícula que crece adherida al medio granular y a las partes subterráneas de las plantas. (García *et al.*, 2004).

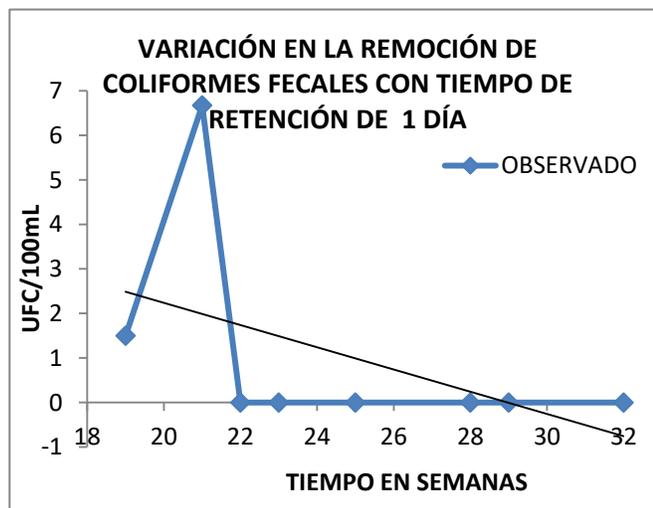
El principal papel de los vegetales en estos sistemas es el de crear alrededor de sus partes subterráneas un ambiente adecuado para que crezcan y se desarrollen comunidades microbianas que después van a degradar o transformar los contaminantes. (García *et al.*, 2004).

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 32 semanas. 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  $p= 0.693$  (no significativo) con un tiempo de retención de 2 días (fig.18), y  $p=0.000$  (significativo) con un tiempo de retención de 1 día (fig. 19). Se concluye que el sistema con el transcurrir del tiempo no muestra cambio en la remoción de coliformes fecales con tiempo de retención de 2 días, a diferencia de lo que se reportó en el valor de significancia de coliformes fecales con tiempo de retención de 1 día.

**Figura 18.** Variación en la remoción de coliformes fecales en los humedales con tiempo de retención de 2 días.



**Figura 19.** Variación en la remoción de coliformes fecales en los humedales con tiempo de retención de 1 día.

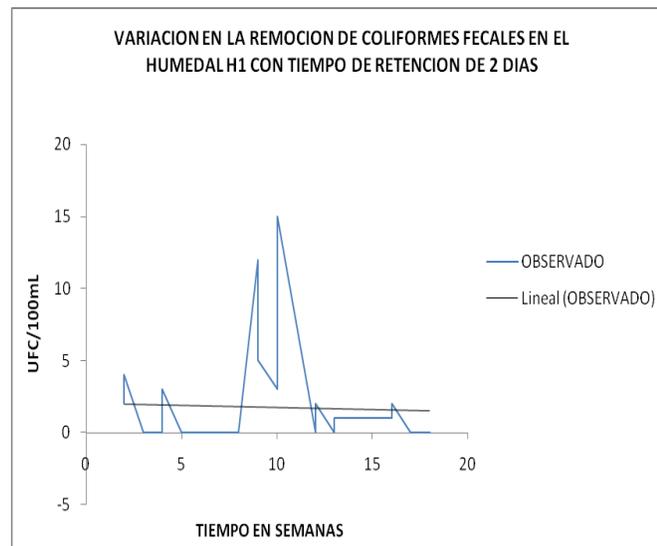


- Eficiencia del humedal H1 ( Humedal con *Phragmites australis*)

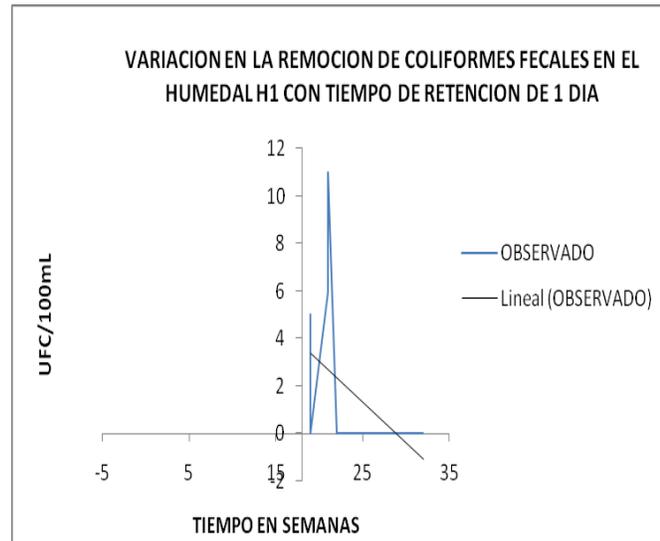
Se aplicó el análisis de correlación no paramétrica de Spearman con un valor de  $p = 0.902$  con un tiempo de retención de 2 días, concluyendo que el resultado es

estadísticamente no significativo lo cual muestra que los datos (colonias) tienen una tendencia a permanecer constantes en el tiempo (Fig.20). Con un tiempo de retención de 1 día obtuvimos un valor de  $p=0.018$  indicándonos que el número de colonias tiende a disminuir con el paso del tiempo (fig. 21).

**Figura 20.** Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H1 con tiempo de retención de 2 días.



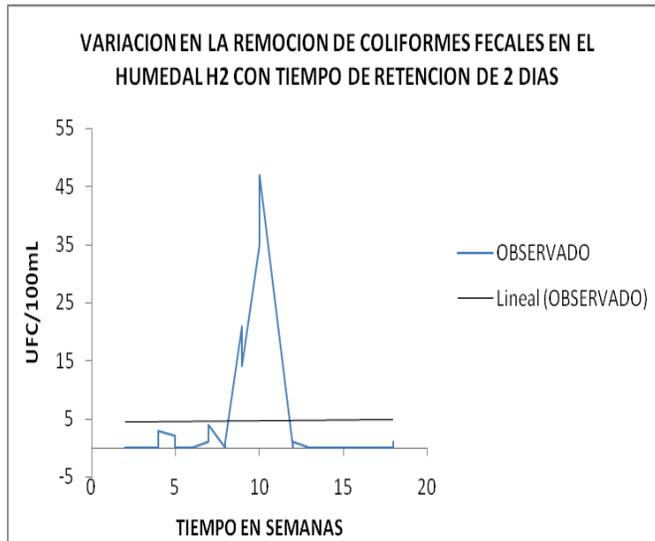
**Figura 21.** Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H1 con tiempo de retención de 1 día.



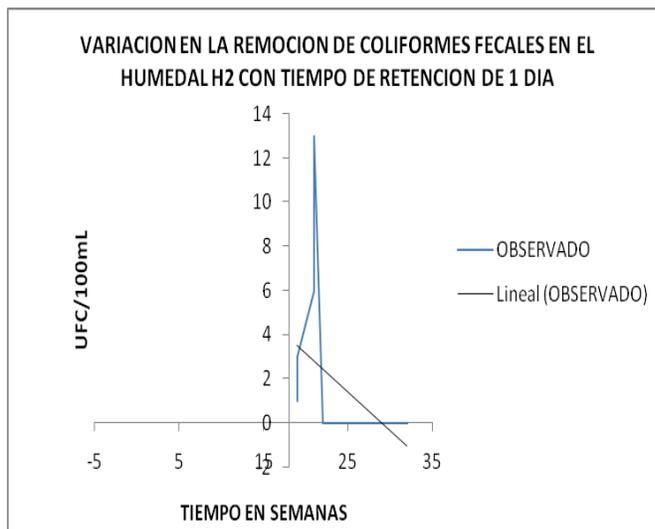
- Eficiencia del humedal H2 (Humedal control)

Se aplicó el análisis de correlaciones de Spearman con un valor de  $p= 0.927$  con un tiempo de retención de 2 días, cuyo resultado muestra que el humedal H2 no presenta mucho cambio con el transcurso del tiempo por la gran variabilidad de los resultados (Fig. 22). Por otra parte en el humedal H2 con un tiempo de retención de 1 día se obtuvo un valor significativo de  $p=0.001$  lo que nos indica que los microorganismos en cuestión tienden a disminuir con el transcurso del tiempo. (fig.23).

**Figura 22.** Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H2 con tiempo de retención de 2 días.



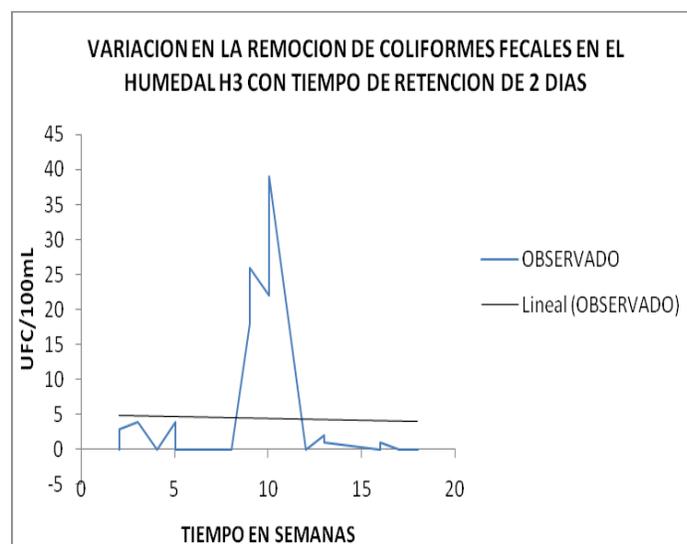
**Figura 23.** Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H2 con tiempo de retención de 1 día.



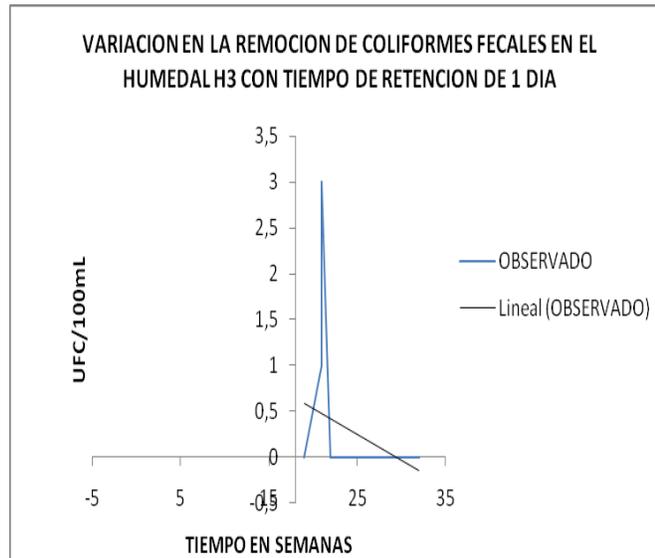
- Eficiencia del humedal H3 ( Humedal con *Hedychium coronarium*)

Se aplicó el análisis de correlación no paramétrica de Spearman dando como resultado un valor de  $p=0.547$  y  $p= 0.113$  con un tiempo de retención de 2 días y 1 día respectivamente, concluyéndose que hay una leve tendencia a disminuir el número de bacterias coliformes con el paso del tiempo (Fig. 24,25) posiblemente porque en este humedal no se presentaron las condiciones fisicoquímicas adecuadas de sedimentación, filtración, adsorción, predación, muerte natural y liberación de sustancias antibióticas que deben haber para que se produzca una buena remoción de microorganismos coliformes.( Reinoso, 2007).

**Figura 24.** Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H3 con tiempo de retención de 2 días.



**Figura 25.** Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H3 con tiempo de retención de 1 día.



En general, se puede expresar que los humedales realizan una remoción importante de las bacterias coliformes, a pesar de que se manejaron tiempos de retención hidráulica muy cortos. Los valores de remoción obtenidos se acercan a los exigidos por la O.M.S., la cual plantea la exigencia de remociones del 99.9999% si el agua tratada posteriormente fuera utilizada como agua de riego o para bebida de animales o de poblaciones humanas.

Durante el tiempo de muestreo en la truchifactoría El Diviso se presentaron algunos inconvenientes de operación y mantenimiento, como falta de limpieza en los sistemas de alimentación y conducción de la caja de distribución a los humedales, taponamiento del sedimentador con lodos lo que producía el cierre parcial del caudal. Además, en 2 ocasiones se presentaron derrumbes en la carretera que impidieron la toma de las muestras.

Se observó en cuanto a eficiencia de las plantas utilizadas en el sistema de tratamiento que el humedal con *Phragmites australis* presentó el mejor porcentaje de remoción de bacterias coliformes totales con un tiempo de retención de un día

y de dos días para bacterias coliformes fecales; por otra parte el humedal con *Hedychium coronarium* presentó el mayor porcentaje de remoción de bacterias coliformes totales para un tiempo de retención de dos días y de un día para coliformes fecales.

De acuerdo con los trabajos de Reinoso (2007), se ha propuesto que la reducción en los microorganismos se debe principalmente a fenómenos de precipitación – adsorción, sedimentación, filtración, predación, muerte natural, radiación UV, liberación de sustancias antibióticas por parte de las macrófitas y la acción mecánica del humedal.

El proceso de eliminación de coliformes en humedales artificiales, se ha relacionado con factores ambientales como el tiempo de retención hidráulico, 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 *et al*, 2004).

Como norma general, los humedales pueden reducir los coliformes fecales en uno o dos órdenes logarítmicos. (García *et al.*, 1999). El porcentaje de remoción de coliformes fecales obtenido fue destacado debido a que se logro una reducción de 2 a 3 órdenes logarítmicos.

El mejor de los tiempos de retención hidráulica evaluados en la truchifactoria El Diviso fue para coliformes fecales con un tiempo de retención de 4 días y para coliformes totales obtuvimos resultados muy similares con un tiempo de retención de 1 día y 4 días, indicando que el tiempo de retención hidráulica es una variable fundamental en el establecimiento de la eficiencia de un sistema de humedales, de

acuerdo a la teoría era de esperar que el tiempo de retención mas prolongado ( 4 días) fuera el que presentara mayor eficiencia, por el contrario para el tiempo de retención de 1 día se esperaba que fuera el menos eficiente pero debido a las diversas condiciones fisicoquímicas y ambientales paradójicamente este tiempo estuvo muy cercano a los demás tiempos de retención haciendo pensar que se debe a factores que no estaban incluidos en el presente estudio.

## **6.2 CARACTERIZACION FISICOQUIMICA**

Al mismo tiempo, estudiantes de ingeniería ambiental realizaron análisis físico químicos al afluente y efluente, para establecer la remoción de otros contaminantes en las aguas de la truchifactoria. Se analizaron los parámetros de caudal, temperatura, pH, conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, nitrógeno total, nitratos y fosfatos.

Los resultados correspondientes para los parámetros mencionados anteriormente, con un tiempo de retención hidráulico de dos días aparecen representados en la tabla 5.

**Tabla 5.** Promedios de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoria con tiempo de retención de 2 días

<b>PARAMETROS</b> <b>mg/L</b> <b>TIEMPO DE</b> <b>RETENCIÓN DE 2</b> <b>DÍAS</b>	<b>Sedimentador</b>	<b>Afluente</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	<b>Promedio</b> <b>humedales</b>
Caudal (lpm)			1,08	1,11	1,11	1,11
Temperatura (°C)	16,93	16,63	17,53	17,65	17,69	17,62
pH ( unidades)	6,74	6,72	6,72	6,78	6,85	6,78
Oxigeno disuelto (%)	52,86	52,43	37,57	37,49	40,73	38,60
Oxigeno disuelto mg/L	3,89	4,00	2,65	2,77	3,00	2,81
Conductividad eléctrica (mS/cm)	138,25	130,70	182,2 5	189,33	187,86	186,48
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (mg/L)	423,19	56,46	8,11	5,70	5,64	6,48
Demanda química de oxígeno ( DQO) (mg/L)	892,54	136,25	29,65	26,80	22,28	26,24
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	677,45	126,77	19,24	19,50	18,71	19,15
Sólidos disueltos totales (mg/L)	65,85	62,29	87,07	94,61	89,76	90,48

Nitrógeno total (mg/L)	14,93	5,06	2,24	3,62	4,05	3,30
Nitrógeno amoniaco	2,33	1,21	1,56	2,47	2,67	2,23
Fosforo total	9,11	3,13	1,45	1,79	1,40	1,55

**Tabla 6.** Porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoría con tiempo de retención de 2 días.

<b>PARAMETROS</b>  <b>mg/L</b>  <b>TIEMPO DE</b> <b>RETENCION</b> <b>DE 2 DIAS</b>	<b>Afluente</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	<b>Promedio humedales</b>	<b>Remoción global</b>
Oxígeno disuelto (mg/L)	2,83%	33,75%	30,75%	25%	29,83%	70,95%
Conductividad eléctrica (mS/cm)	5,46%	39,44%	44,86%	43,73%	42,68%	31,83%
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (mg/L)	86,66%	85,64%	89,90%	90,01%	88,52%	98,66%

Demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L)	84,73%	78,24%	80,33%	83,65%	80,74%	97,50%
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	81,29%	84,82%	84,62%	85,24%	84,89%	97,24%
Sólidos disueltos totales (mg/L)	5,41%	39,78%	51,89%	44,10%	45,26%	32,22%
Nitrógeno total (mg/L)	66,11%	55,73%	28,46%	19,96%	34,72%	84,99%
Nitrógeno amoniacal	48,07%	28,93%	104,13 %	120,66 %	84,57%	33,04%
Fosforo total	65,64%	53,67%	42,81%	55,27%	50,58%	84,63%

**Tabla 7.** Promedios de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoria con tiempo de retención de 1 día.

PARAMETRO	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3	Promedio
-----------	--------------	----------	----	----	----	----------

<b>TIEMPO DE RETENCIÓN DE 1 DÍA</b>						<b>humedales</b>
Caudal (lpm)			1,96	1,96	1,97	1,96
Temperatura (°C)	16,40	16,84	18,35	18,65	18,45	18,48
pH ( unidades)	6,76	6,76	6,87	6,91	6,96	6,91
Oxígeno disuelto (mg/L)	5,83	5,51	4,99	4,61	4,81	4,80
Oxígeno disuelto (%)	65,97	62,57	68,80	63,47	66,44	62,24
Conductividad eléctrica (mS/cm)	98,88	106,10	132,34	152,28	147,29	143,97
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (mg/L)	104,54	58,32	7,30	7,46	17,35	10,70
Demanda química de oxígeno ( DQO) (mg/L)	300,79	144,42	17,52	23,20	20,39	20,37
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	262,61	161,13	14,53	17,97	17,85	16,78
Sólidos disueltos totales (mg/L)	46,95	50,85	63,42	73,54	72,49	69,82

Nitrógeno total (mg/L)	11,02	7,80	3,93	4,92	4,57	4,47
Nitrógeno amoniacoal (mg/L)	1,83	2,61	2,23	2,97	3,10	2,77
Fosforo total (mg/L)	4,16	2,46	0,74	0,86	0,95	0,85

**Tabla 8.** Porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos del sistema de tratamiento de aguas residuales de una truchifactoria con tiempo de retención de 1 día.

<b>PARAMETROS</b>  <b>mg/L</b>  <b>TIEMPO DE</b> <b>RETENCIÓN 1</b> <b>DIA</b>	<b>Afluente</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	<b>Promedio humedales</b>	<b>Remoció n global</b>
Oxígeno disuelto (mg/L)	5,49%	9,43%	16,33%	12,70%	12,82%	20,93%
Conductividad eléctrica (mS/cm)	7,30%	24,73%	43,52%	38,82%	35,69%	38,84%
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (mg/L)	44,21%	87,48%	87,21%	70,25%	81,65%	93,01%

Demanda química de oxígeno ( DQO) (mg/L)	51,99%	112,13%	83,94%	85,88%	97,32%	94,18%
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	38,64%	90,98%	88,85%	88,92%	89,58%	94,47%
Sólidos disueltos totales (mg/L)	8,31%	24,72%	44,62%	42,56%	37,3%	35,08%
Nitrógeno total (mg/L)	29,22%	49,62%	36,92%	41,41%	41,75%	64,34%
Nitrógeno amoniacal ( mg/L)	42,62%	14,56%	13,79%	18,77%	15,71%	21,86%
Fosforo total (mg/L)	40,87%	69,92%	65,04%	61,38%	65,45%	82,21%

Los valores relativamente bajos de oxígeno, en los humedales con *H. coronarium* y *P. australis* posiblemente se debieron a que el oxígeno transportado por estas macrófitas desde las hojas hasta la raíz es utilizado en su gran mayoría por los microorganismos que crecen sobre las raíces de estas en forma de biopelícula, según Lienard (1987) la capacidad de transferencia de oxígeno por los helófitos se estima entre 0 – 3 g O<sub>2</sub> / m<sup>2</sup> / día, equivalente a 30 Kg DBO<sub>5</sub> Ha / día, muy bajo para las cargas usuales del agua residual. Por otra parte la transferencia de oxígeno desde la atmósfera se sitúa entre 0 – 0.5 g O<sub>2</sub> / m<sup>2</sup> / día, por lo que las

condiciones en el interior de los humedales de flujo subsuperficial son fuertemente reductoras.

En consecuencia, con cierta frecuencia se ha concluido que la respiración aeróbica es el principal mecanismo de eliminación de la materia orgánica. Esta conclusión no es cierta para la mayoría de aguas residuales, las cuales tienen una demanda de oxígeno muy superior a las tasas de transferencia de los macrófitos, que suelen estar normalmente entre 0,5 y 6 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.día (Tanner & Kadlec, 2003). Las tasas de transferencia de oxígeno no son pues suficientemente elevadas para eliminar la DBO de un agua residual en el tiempo de permanencia que habitualmente se tiene (5 a 10 días). Por tanto el papel de los macrófitos depende de las características de las aguas a tratar y es menos importante cuanto mayor es la carga orgánica del agua.

El promedio de la remoción de DBO fue de 88,52% para un tiempo de retención de 2 días y 81.65% para un tiempo de retención de 1 día, que se encuentra por encima del valor de la norma colombiana de vertimientos en el artículo 72 del decreto 1594 de 1984 que establece que el valor debe ser > 80% indicando que hay una buena sedimentación física de sólidos, un filtrado directo a través de las plantas y procesos biológicos con microorganismos en la rizosfera. (Lahora, 2002).

Este proceso es muy dependiente de la temperatura, por lo que se observan variaciones estacionales en la DBO<sub>5</sub> del efluente. Se puede obtener una DBO<sub>5</sub> por debajo de 25 mg/ L, aunque no es posible bajar de una DBO<sub>5</sub> de 7 – 10 mg/L, que parece proceder de residuos orgánicos del propio sistema, y no del agua residual original (U.S. Environmental Protection Agency, 2000).

La DQO en el sedimentador obtenida para ambos tiempos de retención empleados fue mayor mínimo 2 veces que el valor de DBO, lo que indica que el total de agua residual tiene un componente bastante grande de compuestos inorgánicos, provenientes de la truchifactoría. La eficiencia de remoción de DQO

esperada varía entre 70 y 80 % (Rivas, 1997); la obtenida fue 80,74% y 97,32% para un tiempo de retención de 2 días y 1 día respectivamente, cabe decir que estos buenos porcentajes de remoción se deben a que en la zona en la cual se produce el mayor porcentaje de remoción de DQO es en la zona aerobia, zona en la cual los microorganismos toman el oxígeno para degradar la materia orgánica en CO<sub>2</sub> y agua. (García, 2005).

El porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales obtenido fue de 84,89% y 89,58% para tiempos de retención de 2 días y 1 día respectivamente que se encuentra por encima del valor de la norma colombiana de vertimientos citada anteriormente que establece que este valor debe ser > 80%, esto debido probablemente a que en los humedales se dan procesos de sedimentación, decantación, filtración y degradación a través del conjunto que forma el sustrato con las raíces y rizomas de las plantas generando una buena eliminación de SST. (Fernández, 2006).

El valor de nitrógeno total obtenido fue de 34,72% para un tiempo de retención de 2 días y 41,75% para un tiempo de retención de 1 día, debido a la asimilación por parte de los macrófitos y la disponibilidad de oxígeno. Numerosos estudios han demostrado que mediante la asimilación y cosecha de los macrófitos como mucho se elimina entre un 15 y un 20% del nitrógeno (Stottmeister *et al.*, 2003). Esto hace que la nitrificación combinada con la desnitrificación sea en realidad el principal mecanismo de eliminación de nitrógeno (teniendo en cuenta que la principal especie de nitrógeno en el agua residual es habitualmente el amoníaco). No obstante, la nitrificación requiere oxígeno, que como se ha comentado se transfiere con una tasa muy baja. Por tanto, los humedales sólo pueden eliminar bien el nitrógeno si operan con cargas bajas, tratan aguas diluidas o se diseñan con flujo vertical.

El porcentaje de remoción de fosfatos fue de 50,58% y 65,45% para un tiempo de retención hidráulica de 2 días y 1 día respectivamente, debido a la adsorción, precipitación química y a las plantas que los consumen. El fósforo, normalmente presente en forma de ortofosfatos, es absorbido por minerales arcillosos y determinadas fracciones orgánicas de la matriz del suelo. La precipitación química con calcio (a pH's neutros o alcalinos) o con hierro o aluminio (a pH's ácidos), se produce a menor velocidad que los fenómenos de adsorción. Estos sistemas acuáticos, presentan un potencial de eliminación de fósforo limitado. (España, 2006).

La asimilación directa de las plantas de esta sustancia es menor que la del nitrógeno. Esto es debido a su menor habilidad de acumulación y limitada concentración de fósforo en los tejidos vegetales.

El total de N y P eliminado del medio 1/4 lo es por sedimentación, algas y bacterias, mientras los 3/4 restantes es obra de los macrófitos. (Korner & Vermaat, 1998).

Se encontraron eficiencias de remoción relativamente altas para los tiempos de retención utilizados en nuestro trabajo contrario a lo reportado por (Haberl *et al*, 2003; Brix, 1998 & Reed, 1995) que afirman que si se utilizan tiempos de retención hidráulica muy bajos no es posible la remoción eficiente de nutrientes y patógenos.

## 7. CONCLUSIONES

- La remoción de la contaminación biológica fue de 99.88% para los humedales en general con un tiempo de retención de 2 días tanto para coliformes totales y fecales.
- La remoción de la contaminación biológica fue de 99.97% para los humedales en general con un tiempo de retención de 1 día tanto para coliformes totales como fecales.
- El humedal con *Phragmites australis* presentó el mejor porcentaje de remoción de bacterias coliformes totales con un tiempo de retención de un día (99.961%).
- El humedal con *Phragmites australis* presentó el mejor porcentaje de remoción de bacterias coliformes fecales con un tiempo de retención de dos días (99.964%).
- El humedal con *Hedychium coronarium* presento el mayor porcentaje de remoción de bacterias coliformes totales para un tiempo de retención de dos días (99.871%).
- El humedal con *Hedychium coronarium* presento el mayor porcentaje de remoción de bacterias coliformes fecales para un tiempo de retención de un día (99.999%).

- De acuerdo al programa estadístico se estableció que existe una diferencia significativa entre los filtros fitopedológicos con un tiempo de retención hidráulica de 2 días, indicando que el humedal con *Hedychium coronarium* presentó una mayor remoción de coliformes totales comparado con *Phragmites australis*.
- Para coliformes fecales, encontramos que no existe diferencia significativa entre las dos macrófitas, aunque obtuvimos porcentajes de remoción mayores con *Phragmites australis* para un tiempo de retención de 2 días y *Hedychium coronarium* para un tiempo de retención de 1 día.
- Aunque no se presentaron diferencias significativas entre los filtros fitopedológicos y el humedal control para las diversas variables: tiempos de retención (1 y 2 días) y tipo (coliformes fecales y totales) se generaron para cada caso porcentajes de remoción mayores en los sistemas con macrófitas que en el sistema control. Excepto para la comparación entre el humedal H2 y el humedal H3 para coliformes totales y un tiempo de retención de 1 día, presentándose un valor de significancia de  $p= 0.039$ .
- Comparando los humedales con macrófitas para coliformes fecales, encontramos que no existe diferencia significativa entre estos, aunque obtuvimos porcentajes de remoción mayores con *Phragmites australis* para un tiempo de retención de 2 días y *Hedychium coronarium* para tiempo de retención de 1 día.
- Al comparar el número de colonias del sedimentador y la caja de distribución, se encontró que no hay diferencia significativa ( $p \geq 0.05$ ), es decir que el número

de coliformes totales y fecales se presentan de una forma similar en ambos sitios y para los dos tiempos de retención hidráulica empleados, aunque en todos los casos las UFC/100 mL fueron mayores para el sedimentador que para la caja de distribución debido al tratamiento realizado por este.

- El mejor tiempo de retención en la remoción de coliformes fecales y totales fue contradictoriamente el tiempo de retención de 1 día con un porcentaje de remoción del 99,97% comparado con el 99,88 % con un tiempo de retención de 2 días. Esto posiblemente debido a que los microorganismos asociados a las macrófitas se vieron favorecidos por la concentración de DBO, DQO, SST y principalmente a los valores de oxígeno disuelto que fueron mayores con un tiempo de retención de 1 día, haciendo que se obtuviera esta leve diferencia del porcentaje de remoción.
- Al comparar el sedimentador con el sistema de humedales, se encontró que existe diferencia significativa ( $p=0.000$ ) en la remoción de bacterias coliformes totales y fecales para ambos tiempos de retención hidráulica.
- El análisis de correlación no paramétrica de Spearman evaluó la eficiencia de cada humedal en referencia al tiempo de muestreo y para cada tiempo de retención hidráulica, obteniéndose en todos los casos una diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ), para coliformes totales, excepto para el humedal control con un tiempo de retención de 2 días lo cual muestra que para este caso en particular el número de colonias permaneció constante con el paso del tiempo. Por el contrario para coliformes fecales se obtuvieron datos en su mayoría no significativos a excepción del humedal H1 y el humedal H2 con un tiempo de retención de 1 día, mostrando en estos dos casos que a medida que avanza el tiempo hay una tendencia a disminuir el UFC/ 100 mL.

- El humedal a manera de planta piloto contribuyó a mejorar en gran medida la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua, cumpliendo con los valores establecidos en el artículo 72 del decreto 1594 de 1984 de las leyes colombianas vigentes para el vertimiento de aguas residuales.
- Se plantea como una de las razones por la cual los humedales plantados con *Phragmites australis* y *Hedychium coronarium* no lograron en todos los casos una diferencia significativa con el humedal control, la influencia del tiempo de retención, ya que los tiempos cortos no permiten la acción sinérgica del sistema helófitas/bacterias, pues no posibilitan la acción de una biomasa significativa de las macrófitas y los tiempos muy prolongados pueden producir el crecimiento exagerado del fitoplancton que puede llegar a producir la ruptura de las interrelaciones helófitas/bacterias y pueden aparecer condiciones anaerobias durante el día, disminuyendo de esta manera la eficiencia en la eliminación de patógenos (Rolim, 2000; Campos, 2002).
- La alta eficiencia en la remoción de los sólidos suspendidos totales con un valor de 97,24% y 94,47%, DBO de 98,66% y 93,01% y DQO de 97,50% y 94,18% para tiempos de retención de 2 días y 1 día respectivamente, 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. (Rodríguez, 2003).
- El mejor tiempo de retención hidráulica en cuanto a la remoción de materia orgánica y macronutrientes con sus respectivos parámetros fisicoquímicos

como DBO, DQO y SST fue el tiempo de retención de 4 días, seguido por el de 2 días y 1 día.

- La remoción del fósforo con un valor de 82,21% en el humedal artificial se debió principalmente por una buena capacidad de absorción del medio filtrante, precipitación química y a las plantas que lo consumen. (España, 2006).

## RECOMENDACIONES

Para el funcionamiento óptimo del sistema de humedales recomendamos hacer un seguimiento exhaustivo para el mantenimiento y la operación de los mismos, para de esta manera mantener el flujo del caudal y evitar la obstrucción de las tuberías a causa de la acumulación de lodos.

Recomendamos la identificación y clasificación de los microorganismos presentes en el agua residual provenientes de actividades piscícolas, debido a que este tipo de aguas son utilizadas en diversas actividades humanas y pueden desencadenar enfermedades o ser vectores de estas.

Recomendamos para este tipo de humedales artificiales que se empleen tiempos de retención hidráulica mayores a los utilizados en este proyecto, para optimizar la eficiencia de remoción de agentes patógenos y disminuir la concentración de contaminantes fisicoquímicos y de materia orgánica.

Las macrófitas a implantar en el sistema deben ser en lo posible propias de la zona, para evitar la necesidad de un proceso de adaptación e irrigación permanente reduciendo así los costos de mantenimiento.

Recomendamos la utilización de humedales artificiales de flujo subsuperficial para comunidades rurales en donde no hay ningún tipo de tratamiento de aguas residuales, debido a que estos sistemas son económicos y generan altos porcentajes de remoción.

Sugerimos el uso de humedales de flujo subsuperficial para evitar malos olores, propagación de vectores, brindar sostén ecológico y evitar el contacto directo de los individuos con las aguas parcialmente tratadas.

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda el escalamiento a tamaño real de la planta de tratamiento, pues incluso con tiempos de retención hidráulica de un 1 día se obtiene remociones en concordancia con lo dispuesto en el decreto 1594 de 1984 sobre el vertimiento de aguas residuales.

## BIBLIOGRAFIA

- ACEVEDO, F. CROCHE, A. ESPINOSA, A & LOPEZ, M. Filtro de macrófitas en flotación (FMF). 2007.
- ÁLVAREZ, B. SECADES, P. & GUIJARRO, J. Clonación y secuenciación del gen *aroA* de *flavobacterium psychrophilum*. Área de Microbiología, Departamento de Biología Funcional, Facultad de Medicina, Universidad de Oviedo, c/ Julián Clavería s/n, 33006 Oviedo. 2002.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION –APHA. 1999. Standard methods for the determination of water and wastewater. APHA, Washington, D.C.
- ARCOS, M., ÁVILA, S., ESTUPIÑÁN, S., GÓMEZ, A., PRIETO, A,.. Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua.1.División de Investigaciones, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. 2005.
- BARCO, S & MORA, D. Evaluación de la eficiencia de remoción de bacterias coliformes de un sistema de humedales artificiales de flujo sub-superficial para el tratamiento de aguas residuales de una truchifactoría. Universidad del Cauca. Colombia.2009.

- BRIX, H. 1998. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science And Technology*, 35: 11- 17.
- CALDERÓN, E., Plantas invasoras en Colombia: Una visión preliminar, Instituto Alexander von Humboldt, Programa de Biología de la Conservación, Línea 'Especies Focales'.2003.
- CAMACHO, A., M.GILES, A.ORTEGÓN, M.PALAO, B.SERRANO y VELÁZQUEZ, O. Técnicas para el Análisis Microbiológico de Alimentos. 2ª ed. Facultad de Química, UNAM. México. Versión para Administrador de Manuales y Documentos (AMyD). Facultad de Química, UNAM. 2009.
- CAMPOS, C. "Removal of bacterial and viral faecal indicator organisms in a waste stabilization pond system in Choconta, Cundinamarca (Colombia)". *Water Science and Technology*. 45 (1) 61-66. 2002
- CANOSA, A. Indicadores bacteriológicos de eutrofización en los embalses de Chuza, Neusa y Tominé, y en la laguna de Chingaza. Bogotá, Colombia: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Centro de Investigaciones Científicas 1995.
- CARRERO, N. Los humedales artificiales en el tratamiento de las aguas servidas en zonas rurales. 2008.
- CARRILLO, L. Microbiología Agrícola. 1 ed. Salta : UNSA. 2003.
- CASTRO, C. Coliformes Totales. Instituto de Ciencias Matemáticas Ingeniería en Auditoría y Control de Gestión Calidad del Agua. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador. 2007.

- CHUCHÓN, S & AYBAR C. Evaluación de la capacidad de remoción de bacterias coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno de la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá”, Ayacucho, Perú. Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú. 2008.
- De La CRUZ, C. SALAZAR, A. Caracterización y estudio de tratabilidad del efluente de estaciones piscícolas. Universidad del Cauca. Colombia. 2007.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial Office of Water Washington, D.C. 2000.
- ESPAÑA , J. Estanques de jacinto de agua ( *Eichhornia crassipes*) para tratamiento de residuos industriales. Universidad del Valle. Santiago de Cali. 2006.
- FERNÁNDEZ A, MOLINA M, ALVAREZ A, ALCÁNTARA M, ESPIGARES A. Transmisión fecohídrica y virus de la hepatitis A. Higiene y Sanidad Ambiental 2001.
- FERNANDEZ, J. La fitodepuración mediante humedales artificiales. Espana. 2006.
- 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.

- FLOTO, S. Uso de un modelo físico a escala de laboratorio para el diseño de sistemas de lodos activados. Universidad De Santiago De Chile. 2005.
- GARCÍA, J. MORATÓ, J & BAYONA, J. Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales: criterios de diseño, construcción y explotación. Universidad Politécnica de Catalunya. Centro de Investigación y Desarrollo de Barcelona, España. 2004.
- GARCIA, M. BÉCARES, E. SOTO, F & DE LUIS, E. macrófitos en la depuración de aguas residuales. Su función en la eliminación de bacterias. Tecnología del agua. 1999.
- GARCIA, T. diseño, construcción y evaluación preliminar de un humedal de flujo subsuperficial. Universidad de los Andes, Bogota, Colombia. 2005.
- GAMARRA, Y. SARMIENTO, J. QUINTERO, O. RUEDA, F & ACEVEDO, F. Evaluación de un modelo piloto integrado para postratamiento del efluente del RAP utilizando *Spirodela* sp. Revista colombiana de biotecnología, Diciembre, vol. VIII numero 002. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2006.
- GOMEZ, C. PEÑA, P. VASQUEZ, M. determinación y diferenciación *Escherichia coli* y coliformes totales usando un sustrato cromógeno. Laboratorio central, Aquagest. Galicia, España. 1999.
- HABERL, R. GREGO, S. LANGERGRABER, G. KADLEC. R. CICALINI, A. MARTINS, S. NOVAIS, J. AUBERT, S. GERTH, A. THOMAS, H & HEBER, A. Constructed wetlands for the treatment of organic pollutants. 2003.

- HARWOOD, V. LEVINE, A. SCOTT, T. CHIVUKULA, V. LUKASIK, J. FARRAH, S. & ROSE, J. Validity of the indicator organism paradigm for pathogen reduction in reclaimed water and public health protection. *Appl Environ Microbiol.* 2005.
- HAYES. *Microbiología e Higiene de los Alimentos.* ACRIBIA. Zaragoza, España. 1993.
- HOLDRIDGE, L. R. *Life zone ecology.* Tropical Science Center, San José. 1967.
- KORNER, S. & VERMAAT, J. The relative importance of *Lemna gibba* L., bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater. *Water Research* 32 (12): 3651-3661. 1998
- LARA, J. *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales.* Instituto Catalán de tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 1999.
- LAHORA, A. *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: la edar de los gallardos (Almería).* España. 2002.
- LEÓN, H. *Flora de Cuba.* La Habana. 1946.
- MEDINA, M. *Bioclimatología de flora de Veracruz. Zingiberaceae.* Fascículo 21. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México. 1999.
- MENÉNDEZ, J. “*Phragmites australis* (cav). Trin. Ex steudel “. *Asturnatura.com* (en línea). Núm. 72. 2005

- MERINO, M. El cultivo de la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*). Instituto colombiano de desarrollo rural – Incoder. 2006.
- MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto 1594 de 1984. Usos del agua y residuos líquidos. De las normas de vertimiento. Artículo 72. República de Colombia.
- MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto 1575 de 2007. Por medio del cual se establece el sistema de la protección y control de la calidad del agua para consumo humano. 2007.
- MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Resolución 2115. 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. 2007.
- MITSCH, W. GOSELINK, J. Wetlands. 3ª ed. USA. Ed. Wiley. New York. 1999.
- MOORE J. HEANEY N. MILLAR B. CROWE M & ELBORN J. Incidence of *Pseudomonas aeruginosa* in recreational and hydrotherapy pools. *Commun Dis Public Health*. 2002
- MORATÓ, J. SALCEDO, I. CODONY, F. DELGADO, S. GARCIA, J. & BAYONA, J. Eliminación de microorganismos y dinámica del biofilm en humedales construidos de flujo subsuperficial. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona. 2004.

- MUNN, C.B. Marine Microbiology: Ecology and Applications. New York: BIOS Scientific Publisher; 2004.
- MUÑOZ, J. CAPÍTULO 2 Componentes de los sistemas convencionales de depuración de aguas residuales. Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación. 2008.
- ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. “Guías para la calidad del agua Potable. Volumen 2, criterios relativos a la salud y otra información base”. Organización Mundial de la Salud, Publicación Científica N° 506 Washington D.C. 1987.
- PRESCOTT L, HARLEY J Y KLEIN; D. Microbiología. Editorial McGraw-Hill. Madrid, España; 1996.
- REED, S. CRITES, R & MIDDLEBROOKS, E. Natural System For Wastewater Management And Treatment. New York, McGraw-Hill. 1995.
- REINOSO, R. Mecanismos de eliminación de patógenos microbianos en humedales construidos. Universidad de León. 2007.
- RIVAS, H. Lechos de plantas acuáticas (LPA) para el tratamiento de aguas residuales. Ingeniería hidráulica de México. 1997.
- RIVERA, F. WARREN, A. RAMIREZ, E. DECAMP, O. BONILLA, P. GALLEGOS, CALDEROM, A & SANCHEZ, J. Removal of pathogens from wastewaters by the roof zone meted (RZM). Water science and technology. 1995.

- RODRIGUEZ, C. Humedales construidos. Estado del arte. (I). *Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana. 2003.*
- ROLDÁN, G. Fundamentos de limnología neotropical. 1ª ed. Colombia. Editorial Universidad de Antioquia. 1992.
- ROLIM, S. "Sistemas de lagunas de estabilización". Mc Graw Hill. Bogotá. Primera edición. 2000.
- SANTOS, S.B. PEDRALLI, G. & MEYER, S.T. Aspectos da fenologia e ecologia de *Hedychium coronarium* (Zingiberaceae) na estação ecológica do Tripuí, Ouro Preto-MG. *Planta Daninha*, 2005.
- STOTTMEISTER, U. WIESSNER, A. KUNSCHK, P. KAPPELMEYER, U. KÄSTNER, M. BEDERSKI, O. MÜLLER, R. & MOORMANN, H. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*. 2003.
- TANNER C. & KADLEC R. Oxygen flux implications of observed nitrogen removal rates in subsurface-flow treatment wetlands. 2003.

## ANEXOS

### A.DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE COLIFORMES

En los anexos 9-50 se detallan las concentraciones de coliformes totales y fecales de acuerdo a los diferentes sitios muestreados y a los tiempos de retención.

Tiempo de retención de 2 días

Tabla 9. Muestreo 10/10/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	283	248	265.5
	Humedal H2	753	781	767
	Humedal H3	22	15	18.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	64	48	56
	Caja de distribución	22	38	30

Tabla 10. Muestreo 17/10/2008

a. Coliformes Fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	2	4	3
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	3	1.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	12	6	9
Caja de Distribución	1	3	2	

b. Coliformes Totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	44	53	67
	Humedal H2	14	32	23
	Humedal H3	28	27	27.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	108	168	138
Caja de Distribución	181	191	186	

Tabla 11. Muestreo 21/10/2008

a. Coliformes Fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	4	4	4
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	4	11	7.5
Caja de Distribución	7	9	8	

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	547	379	463
	Humedal H2	10	11	10.5
	Humedal H3	20	27	23.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	433	340	386.5
Caja de Distribución	234	139	186.5	

Tabla 12. Muestreo 24/10/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	896	776	836
	Humedal H2	38	67	52.5
	Humedal H3	624	788	706
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	68	54	51
	Caja de distribución	51	46	48.5

Tabla 13. Muestreo 28/10/2008

a. Coliformes Fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	3	1.5
	Humedal H2	0	3	1.5
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	1	2	1.5
	Caja de Distribución	1	1	1

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	36	36	36
	Humedal H2	12	11	11.5
	Humedal H3	42	49	45.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	64	50	57
	Caja de Distribución	83	58	70.5

Tabla 14. Muestreo 31/10/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	873	815	844
	Humedal H2	107	180	143.5
	Humedal H3	37	34	35.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	15	24	19.5
	Caja de distribución	14	30	22

Tabla 15. Muestreo 7/11/2008

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	2	0	1
	Humedal H3	4	0	2
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	5	1	3
	Caja de distribución	1	0	0.5

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	27	28	27.5
	Humedal H2	2	6	4
	Humedal H3	13	32	22.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	5	14	9.5
	Caja de distribución	102	65	83.5

Tabla 16. Muestreo 11/11/2008

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	2	1	1.5
	Caja de distribución	1	0	0.5

b. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	166	182	174
	Humedal H2	169	287	228
	Humedal H3	294	239	266.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	235	234	234.5
	Caja de distribución	221	201	211

Tabla 17. Muestreo 14/11/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	145	245	195
	Humedal H2	193	242	217.5
	Humedal H3	12	6	9
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	54	55	54.5
	Caja de distribución	46	60	53

Tabla 18. Muestreo 21/11/2008

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	1	4	2.5
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	2	3	2.5
	Caja de distribución	1	0	0.5

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	21	15	18
	Humedal H2	20	11	15.5
	Humedal H3	23	35	29
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	40	23	31.5
	Caja de distribución	23	38	30.5

Tabla 19. Muestreo 25/11/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	284	338	311
	Humedal H2	482	543	512.5
	Humedal H3	20	23	21.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	40	69	54.5
	Caja de distribución	12	15	13.5

Tabla 20. Muestreo 5/12/2008

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	1	0.5
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	1	1	1
Caja de distribución	1	0	0.5	

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	131	36	83.5
	Humedal H2	12	11	11.5
	Humedal H3	42	49	45.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	64	50	57
Caja de distribución	83	58	70.5	

Tabla 21. Muestreo 12/12/2008

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	12	5	8.5
	Humedal H2	21	14	17.5
	Humedal H3	18	26	22
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	3	5	4
Caja de distribución	1	2	1.5	

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	213	115	164
	Humedal H2	750	924	837
	Humedal H3	660	765	712.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	89	69	79
Caja de distribución	105	91	98	

Tabla 22. Muestreo 19/12/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100m
		1	2	L
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	43	37	40
	Humedal H2	504	432	468
	Humedal H3	356	398	377
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100m
		1	2	L
	Sedimentador	42	25	33.5
	Caja de distribución	62	90	76

Tabla 23. Muestreo 23/12/2008

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	3	15	9
	Humedal H2	35	47	41
	Humedal H3	22	39	30.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	35	32	33.5
	Caja de distribución	35	4	19.5

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	30	35	32.5
	Humedal H2	35	39	37
	Humedal H3	54	15	34.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	107	129	118
	Caja de distribución	125	211	168

Tabla 24. Muestreo 30/12/2008

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	2	1
	Humedal H2	0	1	0.5
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	2	1	1.5
	Caja de distribución	2	0	1

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	10	3	6.5
	Humedal H2	84	51	67.5
	Humedal H3	19	33	26
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	46	82	64
	Caja de distribución	27	41	34

Tabla 25. Muestreo 20/01/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	1	0.5
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	2	1	1.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	3	1	2
	Caja de distribución	2	0	1

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	23	11	17
	Humedal H2	162	166	164
	Humedal H3	22	31	26.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	158	140	149
	Caja de distribución	93	34	63.5

Tabla 26. Muestreo 22/01/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	114	144	129
	Humedal H2	250	157	203.5
	Humedal H3	43	35	39
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	108	160	134
	Caja de distribución	11	32	21.5

Tabla 27. Muestreo 27/01/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	1	2	1.5
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	1	0.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	1	1	1
Caja de distribución	1	0	0.5	

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	52	49	49
	Humedal H2	45	22	33.5
	Humedal H3	9	6	7.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	46	72	59
Caja de distribución	54	37	45.5	

Tabla 28. Muestreo 29/01/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	7	9	8
	Humedal H2	4	10	7
	Humedal H3	2	4	3
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	40	36	38
	Caja de distribución	58	82	70

Tabla 29. Muestreo 03/02/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	2	0	1
	Caja de distribución	1	0	0.5

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	15	26	20.5
	Humedal H2	12	18	15
	Humedal H3	7	3	5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	3	11	7
	Caja de distribución	1	3	2

Tabla 30. Muestreo 05/02/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	1	2	1.5
	Humedal H2	9	18	13.5
	Humedal H3	5	11	8
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	46	50	48
	Caja de distribución	35	28	31.5

Tabla 31. Muestreo 10/02/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	13	23	18
	Humedal H2	11	17	14
	Humedal H3	9	12	10.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	18	7	12.5
	Caja de distribución	13	17	15

Tabla 32. Muestreo 12/02/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	1	0.5
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	1	0	0.5
	Caja de distribución	1	0	0.5

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	3	6	4.5
	Humedal H2	4	8	6
	Humedal H3	7	4	5.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	61	43	52
	Caja de distribución	27	16	21.5

**TIEMPO DE RETENCION DE 1 DIA**

Tabla 33. Muestreo 24/02/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	5	0	2.5
	Humedal H2	1	0	0.5
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	2	1	1.5
	Caja de distribución	1	1	1

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	62	73	67.5
	Humedal H2	88	47	67.5
	Humedal H3	33	41	37
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	85	67	76
	Caja de distribución	57	82	69.5

Tabla 34. Muestreo 26/02/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	32	29	30.5
	Humedal H2	96	230	163
	Humedal H3	22	48	35
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	97	108	102.5
	Caja de distribución	10	112	107.5

Tabla 35. Muestreo 03/03/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	6	11	8.5
	Humedal H2	6	13	9.5
	Humedal H3	1	3	2
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	49	64	56.5
Caja de distribución	1	3	2	

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	61	84	72.5
	Humedal H2	46	109	77.5
	Humedal H3	347	399	373
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	341	352	346.5
Caja de distribución	94	113	103.5	

Tabla 36. Muestreo 05/03/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	76	60	68
	Humedal H2	78	59	68.5
	Humedal H3	25	31	28
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	268	291	279.5
	Caja de distribución	247	143	195

Tabla 37. Muestreo 10/03/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	33	22	27.5
	Humedal H2	8	15	11.5
	Humedal H3	47	51	49
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	54	58	56
	Caja de distribución	31	46	38.5

Tabla 38. Muestreo 12/03/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	13	18	15.5
Caja de distribución	2	7	4.5	

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	12	11	11.5
	Humedal H2	22	27	24.5
	Humedal H3	7	4	5.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	141	218	179.5
Caja de distribución	29	37	33	

Tabla 39. Muestreo 27/03/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	21	25	23
Caja de distribución	7	5	6	

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	32	19	25.5
	Humedal H2	32	24	28
	Humedal H3	8	11	9.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	26	56	41
Caja de distribución	8	11	9.5	

Tabla 40. Muestreo 31/03/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	34	45	39.5
	Humedal H2	26	44	35
	Humedal H3	14	28	21
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	15	1	8
	Caja de distribución	25	10	17.5

Tabla 41. Muestreo 02/04/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	4	1	2.5
	Caja de distribución	1	0	0.5

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	11	13	12
	Humedal H2	130	132	131
	Humedal H3	90	94	92
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	58	11	34.5
	Caja de distribución	31	35	33

Tabla 42. Muestreo 14/04/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	9	19	14
	Caja de distribución	6	2	4

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	10	33	21.5
	Humedal H2	35	1	18
	Humedal H3	32	3	17.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	4	12	8
	Caja de distribución	9	1	5

Tabla 43. Muestreo 16/04/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	7	16	11.5
	Caja de distribución	1	2	1.5

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	23	14	18.5
	Humedal H2	23	29	26
	Humedal H3	11	13	12
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	14	11	12.5
	Caja de distribución	8	6	7

Tabla 44. Muestreo 21/04/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	56	33	44.5
	Humedal H2	17	42	29.5
	Humedal H3	13	15	14
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	95	64	79.5
	Caja de distribución	48	41	44.5

Tabla 45. Muestreo 23/04/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	21	24	22.5
	Humedal H2	44	38	41
	Humedal H3	16	24	20
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	36	23	29.5
	Caja de distribución	30	18	24

Tabla 46. Muestreo 30/03/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	9	21	15
	Humedal H2	25	21	23
	Humedal H3	7	5	6
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	20	40	30
	Caja de distribución	20	30	25

Tabla 47. Muestreo 04/05/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	12	9	10.5
	Humedal H2	51	32	41.5
	Humedal H3	8	6	7
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	18	23	20.5
	Caja de distribución	53	72	62.5

Tabla 48. Muestreo 07/05/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100m
		1	2	L
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	35	42	38.5
	Humedal H2	3	4	3.5
	Humedal H3	11	10	10.5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>8</sup> /100m
		1	2	L
	Sedimentador	84	92	88
	Caja de distribución	45	27	36

Tabla 49. Muestreo 12/05/2009

a. Coliformes fecales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES FECALES</b>	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	0	0
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	15	27	21
	Caja de distribución	9	5	7

b. Coliformes totales

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	6	9	7.5
	Humedal H2	12	11	11.5
	Humedal H3	17	19	18
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	33	28	30.5
	Caja de distribución	10	32	21

Tabla 50. Muestreo 14/05/2009

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>3</sup> /100mL
		1	2	
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	Humedal H1	24	35	29.5
	Humedal H2	11	8	9.5
	Humedal H3	9	3	6
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 <sup>6</sup> /100mL
		1	2	
	Sedimentador	23	24	23.5
	Caja de distribución	22	25	23.5

## B. Datos fisicoquímicos con tiempo de retención de 2 días.

En los anexos 51-76 se detallan los valores fisicoquímicos obtenidos en los diferentes sitios de muestreo y tiempos de retención.

Tabla 51. CAUDAL ( L/min)

	H1	H2	H3
Promedio	1,08	1,11	1,11
No Datos	23	24	24
Max	1,39	1,30	1,24
Min	0,81	0,93	0,96
Desviación	0,13	0,09	0,08

Tabla 52. TEMPERATURA (°C)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	16,93	16,63	17,53	17,65	17,69
No Datos	24	24	24	23	24
Max	20,80	18,90	21,00	20,10	19,70
Min	14,10	14,10	15,90	16,60	16,40
Desviación	1,48	1,11	1,17	0,86	0,89

Tabla 53. pH

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	6,74	6,72	6,72	6,78	6,85
No Datos	24	24	24	24	24
Max	7,60	7,50	7,20	7,32	7,31
Min	4,90	3,60	4,60	5,20	5,80
Desviación	0,56	0,75	0,50	0,53	0,41

Tabla 54. OXIGENO DISUELTO ( mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	3,89	4,00	2,65	2,77	3,00
No Datos	23	23	23	23	22
Max	6,70	6,70	5,20	5,30	6,00
Min	0,50	0,90	1,40	1,00	1,40
Desviación	1,63	1,32	0,85	1,01	1,01

Tabla 55. OXIGENO DISUELTO ( %)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	52,86	52,43	37,57	37,49	40,73
No Datos	23	23	23	23	22
Max	87,00	74,80	110,20	69,60	81,20
Min	6,70	12,50	18,50	13,90	18,60
Desviación	22,01	15,69	18,12	13,37	13,79

Tabla 56. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (mS/cm)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	138,25	130,70	182,25	189,33	187,86
No Datos	24	24	24	24	24
Max	336,00	229,00	279,00	310,00	333,00
Min	66,40	69,50	86,70	105,70	118,70
Desviación	79,08	46,43	48,74	52,59	52,62

Tabla 57. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO ( mg/L)

	Sedimentador	Afluyente	H1	H2	H3
Promedio	423,19	56,46	8,11	5,70	5,64
No Datos	19	23	21	22	22
Max	3267,33	153,27	28,04	11,88	13,54
Min	71,29	4,16	1,90	0,40	0,00
Desviación	715,04	37,85	5,98	2,87	3,44

Tabla 58. DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO ( mg/L)

	Sedimentador	Afluyente	H1	H2	H3
Promedio	892,54	136,25	29,65	26,80	22,28
No Datos	24	24	24	24	24
Max	5466,00	400,00	66,00	94,00	55,80
Min	32,00	17,00	6,00	5,00	4,00
Desviación	1192,24	98,23	16,18	19,33	14,62

Tabla 59. DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO ( mg/L)

	Sedimentador	Afluyente	H1	H2	H3
Promedio	677,45	126,77	19,24	19,50	18,71
No Datos	22	22	21	18	21
Max	3610,00	374,00	39,00	58,00	87,00
Min	40,00	11,00	6,00	5,00	2,00
Desviación	849,31	105,57	8,89	15,16	18,57

Tabla 60.SOLIDOS DISUELTOS TOTALES (mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	65,85	62,29	87,07	94,61	89,76
No Datos	24	24	24	24	24
Max	161,40	109,70	133,80	167,90	160,00
Min	31,20	32,70	41,10	50,10	56,40
Desviación	38,19	22,42	23,51	29,46	25,42

Tabla 61.NITROGENO TOTAL ( mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	14,93	5,06	2,24	3,62	4,05
No Datos	24	24	24	24	24
Max	27,81	11,20	7,58	10,30	8,51
Min	0,75	0,75	0,45	1,17	1,76
Desviación	22,89	2,67	1,95	2,18	2,19

Tabla 62.NITROGENO AMONIACAL (mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	2,33	1,21	1,56	2,47	2,67
No Datos	21	23	18	22	22
Max	13,41	6,72	4,93	6,27	6,27
Min	0,16	0,06	0,32	0,28	0,84
Desviación	3,08	1,41	1,16	1,88	1,56

Tabla 63. FOSFORO TOTAL ( mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	9,11	3,13	1,45	1,79	1,40
No Datos	21	24	24	24	24
Max	32,21	7,69	6,22	6,76	3,70
Min	0,08	0,61	0,09	0,42	0,27
Desviación	9,49	2,13	1,29	1,53	0,91

**Datos fisicoquímicos con tiempo de retención de 1 día**

Tabla 64. CAUDAL (L/min)

	H1	H2	H3
Promedio	1,96	1,96	1,97
No Datos	24	24	24
Max	2,02	2,02	2,09
Min	1,91	1,89	1,92
Desviación	0,03	0,03	0,03

Tabla 65. TEMPERATURA ( °C)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	16,40	16,84	18,35	18,65	18,45
No Datos	24	24	24	23	24
Max	19,70	19,90	21,30	21,50	21,20
Min	14,70	15,10	16,80	17,20	17,20
Desviación	1,19	1,29	1,36	1,27	1,08

Tabla 66. pH

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	6,76	6,76	6,87	6,91	6,96
No Datos	24	24	24	24	24
Max	7,80	7,80	7,90	7,80	7,80
Min	5,15	5,12	5,24	5,30	5,29
Desviación	0,67	0,69	0,64	0,62	0,61

Tabla 67. OXIGENO DISUELTO (mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	5,83	5,51	4,99	4,61	4,81
No Datos	22	20	20	23	24
Max	22,30	18,80	8,80	7,70	8,90
Min	2,60	1,90	2,00	2,30	2,30
Desviación	3,91	3,56	1,70	1,49	1,75

Tabla 68. OXIGENO DISUELTO (%)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	65,97	62,57	68,80	63,47	66,44
No Datos	22	20	20	23	24
Max	121,60	117,40	118,20	103,90	123,20
Min	32,20	24,40	25,60	30,60	31,30
Desviación	19,28	24,74	23,31	20,82	24,93

Tabla 69. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (mS/cm)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	98,88	106,10	132,34	152,28	147,29
No Datos	24	24	24	24	24
Max	168,70	234,00	205,00	251,00	255,00
Min	56,10	56,40	78,40	79,40	76,70
Desviación	28,89	37,51	32,56	39,07	45,12

Tabla 70. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	104,54	58,32	7,30	7,46	17,35
No Datos	24	24	24	24	24
Max	400,99	162,77	30,89	16,93	142,57
Min	20,69	7,72	0,95	1,31	0,95
Desviación	81,93	41,02	6,28	3,69	33,90

Tabla 71. DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	300,79	144,42	17,52	23,20	20,39
No Datos	24	24	24	24	24
Max	944,00	292,00	39,00	78,00	40,00
Min	84,00	21,00	2,00	2,00	3,00
Desviación	213,65	80,76	10,78	20,11	11,66

Tabla 72. SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	262,61	161,13	14,53	17,97	17,85
No Datos	23	23	23	23	23
Max	695,00	507,00	89,00	94,00	88,00
Min	40,00	17,00	2,10	4,80	5,00
Desviación	180,59	119,29	18,02	19,95	18,39

Tabla 73. SOLIDOS DISUELTOS TOTALES (mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	46,95	50,85	63,42	73,54	72,49
No Datos	24	24	24	24	24
Max	80,60	112,30	98,20	120,20	122,10
Min	26,30	26,50	37,00	37,50	38,30
Desviación	13,90	18,08	15,51	18,18	20,23

Tabla 74. NITROGENO TOTAL (mg/L)

	Sedimentador	Afluente	H1	H2	H3
Promedio	11,02	7,80	3,93	4,92	4,57
No Datos	22	22	22	23	23
Max	35,84	22,40	9,86	13,44	10,35
Min	3,94	2,24	0,45	1,34	0,90
Desviación	6,94	5,77	2,94	2,82	2,66

Tabla 75. NITROGENO AMONIACAL (mg/L)

	Sedimentador	Afluyente	H1	H2	H3
Promedio	1,83	2,61	2,23	2,97	3,10
No Datos	21	22	21	23	23
Max	4,93	5,91	6,90	5,91	7,88
Min	0,45	0,45	0,49	0,90	0,45
Desviación	1,30	1,73	1,66	1,28	1,94

Tabla 76. FOSFORO TOTAL ( mg/L)

	Sedimentador	Afluyente	H1	H2	H3
Promedio	4,16	2,46	0,74	0,86	0,95
No Datos	21	23	22	23	23
Max	9,92	8,02	1,95	1,53	1,90
Min	1,19	0,91	0,41	0,34	0,26
Desviación	2,84	1,53	0,35	0,33	0,45