

Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA
UNIVERSIDAD DE LA SABANA
Chía - Cundinamarca



El presente formulario debe ser diligenciado en su totalidad como constancia de entrega del documento para ingreso al Repositorio Digital (Dspace).

TITULO	Evaluación fitodepurante de un sistema biológico artificial en aguas de riego como alternativa para la sostenibilidad del recurso hídrico.		
SUBTITULO			
AUTOR(ES) Apellidos, Nombres (Completo) del autor(es) del trabajo	Melo Quintana, Germán		
PALABRAS CLAVE (Mínimo 3 y máximo 6)	Humedal artificial		fitodepuración
	Macrófita acuática		
	Agua de riego		
RESUMEN DEL CONTENIDO (Mínimo 80 máximo 120 palabras)	<p>El presente proyecto tuvo como objetivo evaluar la acción fitodepurante de un sistema biológico artificial tipo humedal para aguas de riego utilizadas en las labores agrícolas con el fin de lograr la sostenibilidad en el manejo del recurso hídrico de la región; el estudio se realizó en una finca del Municipio de Chía Cundinamarca, vereda La Balsa donde utilizan para riego aguas provenientes de un pozo profundo.</p> <p>Se diseño y construyó un humedal artificial con dos subsistemas, el primero constituido por un sistema físico de filtración con tres tipos de lechos minerales y el segundo subsistema por un humedal artificial al cual se le implantaron tres tipos de macrófitas acuáticas Eichornia crassipes, Scirpus spp y Lemna spp. Se evaluó la acción fitodepuradora del biosistema por medio de pruebas físicas, químicas y microbiológicas y se validó la calidad del agua obtenida en la depuración en un cultivo de espinaca (Spinacia oleracea).</p> <p>Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que el sistema artificial tipo humedal es una iniciativa viable para mejorar la calidad del agua de riego porque puede alcanzar un alto porcentaje de disminución de microorganismos patógenos, es de bajo coste, fácil operación y mantenimiento para la comunidad que lo utilice. Este tipo de biosistema es innovador en la medida que no ha sido utilizado para la depuración de aguas de riego en el país y puede mejorar la productividad e inocuidad de los cultivos.</p>		

Autorizo (amos) a la Biblioteca Octavio Arizmendi Posada de la Universidad de La Sabana, para que con fines académicos, los usuarios puedan consultar el contenido de este documento en las plataformas virtuales de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

**EVALUACIÓN FITODEPURANTE DE UN SISTEMA BIOLÓGICO
ARTIFICIAL EN AGUAS DE RIEGO COMO ALTERNATIVA PARA LA
SOSTENIBILIDAD DEL RECURSO HIDRICO**

GERMÁN MELO QUINTANA

UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN DISEÑO Y GESTIÓN DE PROCESOS
CHIA, CUNDINAMARCA
2012

**EVALUACIÓN FITODEPURANTE DE UN SISTEMA BIOLÓGICO
ARTIFICIAL EN AGUAS DE RIEGO COMO ALTERNATIVA PARA LA
SOSTENIBILIDAD DEL RECURSO HIDRICO**

GERMÁN MELO QUINTANA

Trabajo presentado como requisito para optar al título de
Magister en Diseño y Gestión de Procesos

Director del Proyecto de Grado
Ligia Consuelo Sánchez Leal MSc.

UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN DISEÑO Y GESTIÓN DE PROCESOS
CHIA, CUNDINAMARCA
2012

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mis seres amados por ser el motor inspirador de este
sueño.

AGRADECIMIENTOS

Quiero manifestar mi gratitud a una docente excepcional, Ligia Consuelo Sánchez Leal, por sus profundas y minuciosas orientaciones; a través de ellas, además de formar con rigurosidad lo hizo con sentido humano.

A José Francisco Sánchez Castellanos, por su valiosa experiencia puesta en marcha en este proyecto; al grupo de Investigación Ceparium de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca por su valioso apoyo en el entorno microbiológico; Al grupo de Ecología de la Universidad Pedagógica Nacional en el apoyo y reconocimiento taxonómico de especies.

A todos mis maestros que han dejado paso en mi vida, a ellos y ellas, que en cada encuentro despertaron mi interés por el conocimiento sistémico que tiene como tarea traducir el maravilloso lenguaje de la naturaleza.

A la Universidad de la Sabana, en especial mi gratitud se ensancha para Clementina Cueto, quien me brindo la infinita posibilidad de ahondar en el conocimiento Ingenieril a través de mi estudio de postgrado.

CONTENIDO

Lista de tablas	
Lista de figuras	
Lista de abreviaturas	
Resumen.....	1
Abstract.....	3
Introducción.....	5
1. OBJETIVOS.....	6
1.1 Objetivo General.....	6
1.2 Objetivos específicos.....	6
2. ANTECEDENTES.....	10
3. MARCO REFERENCIAL.....	17
3.1 Problemática hídrica de la zona de estudio.....	17
3.2 Indicadores de calidad de las aguas del río Bogotá.....	19
3.2.1 Calidad físico-Química.....	19
3.2.2 Calidad Microbiológica.....	20
3.3 Papel de las macrófitas en la depuración de aguas.....	23
3.3.1 Descripción de una planta macrófita.....	25
3.3.2 Juncos. <i>Scirpus spp.</i>	27
3.3.3 Jacinto de Agua- Buchón de Agua. <i>Eichornnia crassipes.</i>	28
3.3.4 Lenteja de agua. <i>Lemna spp.</i>	32
3.4 Sistema de Humedales.....	35

3.4.1 Humedales naturales.....	35
3.4.2 Humedales artificiales.....	36
3.5 Aguas de riego.....	37
4. MATERIALES Y MÈTODOS.....	40
4.1 Fase 1. Selección del agua de riego.....	40
4.2 Fase 2. Construcción del sistema: Humedal artificial.....	41
4.2.2 Espacio físico para el sistema.....	41
4.2.3 Construcción del sistema.....	41
4.2.4 Componente físico del Humedal Artificial.....	41
4.2.5 Componente biológico del Humedal Artificial.....	43
4.2.6 Depósitos o Estanques.....	44
4.2.7 Macrófitas.....	45
4.2.8 Selección y recolección de macrófitas.....	45
4.2.9 Implantación de las macrófitas en el Humedal Artificial.....	46
4.3 Fase 3. Evaluación de la acción depurante en el sistema Humedal A.....	47
4.3.1 Procedimiento para la toma de muestras.....	48
4.3.2 Evaluación física y química.....	48
4.3.3 Protocolo para la técnica NMP.....	49
4.3.4 Protocolo para la técnica de filtración de membrana FM.....	50
4.3.5 Protocolo para Hongos y algas.....	51
4.3.6 Evaluación de metales pesados.....	52
4.3.7 Evaluación biológica de las macrófitas.....	53
4.4 Fase 4. Validación del agua de riego depurada.....	53
4.4.1 Protocolo para el cultivo de espinaca.....	54

4.4.2	Análisis de datos.....	55
5.	Resultados y discusión.....	56
5.1	Fase 1. Selección del agua de riego.....	56
5.2.	Fase 2. Construcción del sistema: Humedal Artificial.....	59
5.2.1	Componente físico del humedal artificial: Tanque de filtración.....	60
5.2.2	Componente biológico del Humedal artificial.....	64
5.2.3	Selección y recolección de macrófitas en el sistema.....	66
5.2.4	Implantación de Macrófitos acuáticos.....	67
5.3.	Fase 3. Evaluación de la acción depurante en el sistema Humedal A.....	67
5.3.1	Evaluación física.....	68
5.3.2	Evaluación química.....	69
5.3.3	pH.....	73
5.3.4	Temperatura.....	75
5.3.5	Conductividad.....	78
5.3.6	Sólidos totales disueltos TDS.....	83
5.3.7	Evaluación biológica de las macrófitas.....	91
5.3.8	Fauna asociada al Humedal artificial.....	98
5.3.9	Metales pesados.....	99
5.4	Fase 4. Validación del agua de riego depurada.....	101
6.	Conclusiones.....	106
7.	Recomendaciones.....	107
8.	Bibliografía.....	108
9.	Anexos	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Disposición de los lechos en el filtro físico.....	43
Figura 2. Reja de polietileno de alta densidad.....	44
Figura 3. Diseño y operación del Humedal artificial.....	47
Figura 4. Cuadrícula de cobertura en el estanque de macrófitas.....	54
Figura 5. Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	57
Figura 6. Imagen de Google Earth con la ubicación de la finca con relación a la cuenca del río Bogotá.....	57
Figura.7. Bomba de agua utilizada en el proceso.....	58
Figura 8. Tanque de reserva.	58
Figura 9. Espacio seleccionado para la construcción del humedal.....	59
Figura 10. Limpieza previa de la zona de trabajo.	59
Figura 11. Instalación de falso fondo.	60
Figura 12. Mallas utilizadas en el tanque de filtración.....	61
Figura 13. Vista general del tanque de filtración.....	61
Figura 14. Movimiento del agua de riego desde su origen hacia los subsistemas.....	62
Figura15. Excavación realizada para la construcción de los estanques.....	65
Figura 16. Construcción de los estanques del humedal artificial.....	65
Figura 17. Selección de la zona de colecta de macrófitas acuáticas.....	66
Figura 18. Desinfección de macrófitas.....	66
Figura 19. Implantación de las macrófitas.....	67

Figura 20. Variación del pH durante el estudio.....	73
Figura 21. Relación Temperatura del agua tratada y sin tratar durante el estudio.....	76
Figura 22. Variación de la conductividad en el agua después de pasar por el tanque de filtración.....	78
Figura 23. Variación de la conductividad en el agua después de pasar por el Humedal artificial.....	79
Figura 24. Variación de la conductividad durante el estudio con los dos subsistemas.....	79
Figura 25. Variación de los TDS en el agua después de pasar por el tanque de filtración.....	83
Figura 26. Variación de los TDS en el agua después de pasar por el Humedal artificial.....	84
Figura 27. Variación de los TDS durante el estudio con los dos subsistemas.....	85
Figura 28: Reducción de TDS durante el estudio.....	87
Figura 29. Comportamiento del crecimiento de <i>Eichornnia crassipes</i> durante el estudio.....	92
Figura. 30. Comportamiento del crecimiento de <i>Scirpus spp</i> durante el estudio.....	94
Figura 31. Coloración de Bulbo y raíz en <i>Eichornnia crassipes</i> durante el estudio.....	96
Figura 32. Disposición de los transectos de cultivo experimental de <i>Spinacia oleracea</i>	103

LISTA DE TABLAS

Tabla. 1. Criterios de calidad microbiológica.....	20
Tabla. 2. Criterios de calidad bacteriológica del agua.....	21
Tabla. 3. Evaluación física del agua en cada muestreo durante el estudio.....	68
Tabla 4. Resultados Químicos y microbiológicos del agua tratada por el subsistema biológico.....	70
Tabla 5. Resultados muestrales para el pH durante el estudio.....	73
Tabla.6. Prueba t para muestras Independientes. pH.....	74
Tabla7. Resultados muestrales para la temperatura durante el estudio.....	77
Tabla 8. Prueba t para muestras independientes. Temperatura.....	77
Tabla 9. Resultados muestrales para la Conductividad eléctrica durante el estudio.....	81
Tabla 10. Prueba t para muestras independientes. Conductividad eléctrica.....	81
Tabla 11. Resultados muestrales para TDS durante el estudio.....	85
Tabla 12. . Prueba t para muestras independientes. TDS.....	86
Tabla 13. Evaluación microbiológica.....	87
Tabla 14. Porcentaje de Crecimiento en las plantas de <i>Eichornnia crassipes</i> durante el estudio.	92
Tabla. 15.Tasa de crecimiento en las plantas de <i>Eichornnia crassipes</i> durante el estudio... ..	93
Tabla.16. Porcentaje de Crecimiento en las plantas de <i>Scirpus spp</i> durante el estudio..	94

Tabla.17. Tasa de crecimiento en las plantas de <i>Scirpus spp</i> durante el estudio.....	95
Tabla 18. Registro de fauna asociada al Humedal artificial.....	98
Tabla 19. Resultados de análisis de laboratorio. Metales pesados.....	100
Tabla.20. Registro de crecimiento con agua sin tratar por el biosistema.....	101
Tabla.21. Registro de crecimiento con agua tratada por el biosistema.....	102
Tabla22. Porcentaje de crecimiento de espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>) durante el estudio.....	102

LISTA DE ABREVIATURAS

m: metro.

OMS: organización Mundial de la Salud.

PTAR: planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

SFS: sistemas de Flujo Sub-superficial.

AG: aguas grises

AR: aguas residuales

DBO5: demanda bioquímica de oxígeno después de 5 días

DQO: demanda química de oxígeno

FS: flujo superficial (un tipo de HA)

HA: humedal artificial (en plural: HHAA)

HA FS: humedal artificial de flujo subsuperficial

HFH: humedal de flujo horizontal (este es un tipo de humedal de FS)

HFV: humedal de flujo vertical (este es un tipo de humedal de FS)

MO: materia orgánica

NT: nitrógeno total

N/A: no aplicable

PT: fósforo total

SS: sólidos suspendidos

SST: sólidos suspendidos totales

RESUMEN

La sabana de Bogotá tiene como una de las principales actividades económicas la agricultura y su práctica requiere el uso del agua como parte esencial de garantizar la producción de los cultivos, desafortunadamente, la calidad del agua de riego en esta zona nunca ha sido la mejor, pues el recurso hídrico de la región es el río Bogotá, sus afluentes y pozos profundos de tipo cuaternario con los que cuenta toda la zona. En el caso de los ríos, es a ellos a donde llegan todas las aguas residuales de los municipios y los desechos de las labores agroindustriales de la sabana que son un poco más del 20% del total que tiene el país; por su parte, los pozos reciben todo el efecto de lixiviado y escorrente de estas actividades y de pozos sépticos que funcionaron y aún funcionan como alternativa a procesos de alcantarillado en varias zonas de la sabana. Como efecto, las hortalizas, frutas y cereales que se siembran y son de consumo humano reciben cargas de microorganismos patógenos y posiblemente una buena cantidad de metales pesados. Es necesario, entonces buscar alternativas amigables que garanticen el uso de un mejor recurso hídrico para los procesos agrícolas y garantizar en el tiempo su sostenibilidad.

El presente proyecto tuvo como objetivo evaluar la acción fitodepurante de un sistema biológico artificial tipo humedal para aguas de riego utilizadas en las labores agrícolas con el fin de lograr la sostenibilidad en el manejo del recurso hídrico de la región; el estudio se realizó en una finca del Municipio de Chía Cundinamarca, vereda La Balsa donde utilizan para riego aguas provenientes de un pozo profundo.

Se diseñó y construyó un humedal artificial con dos subsistemas, el primero constituido por un sistema físico de filtración con tres tipos de lechos minerales y el segundo subsistema por un humedal artificial al cual se le implantaron tres tipos de macrófitas acuáticas *Eichornnia crassipes*, *Scirpus* spp y *Lemna* spp. Se evaluó la acción fitodepuradora del biosistema por medio de pruebas físicas, químicas y microbiológicas y se validó la calidad del agua obtenida en la depuración en un cultivo de espinaca (*Spinacia oleracea*).

Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que el sistema artificial tipo humedal es una iniciativa viable para mejorar la calidad del agua de riego porque puede alcanzar un alto porcentaje de disminución de microorganismos patógenos, es de bajo coste, fácil operación y mantenimiento para la comunidad que lo utilice. Este tipo de biosistema es innovador en la medida que no ha sido utilizado para la depuración de aguas de riego en el país y puede mejorar la productividad e inocuidad de los cultivos.

Palabras clave: Humedal artificial, Macrófita acuática, Agua de riego, fitodepuración.

ABSTRACT

The savannah of Bogota is one of the main economic activities of agriculture and its practice requires the use of water as an essential part of ensuring the production of crops, unfortunately, the quality of irrigation water in this area has never been the best, because the water resources of the region is the Bogotá River, its tributaries and deep wells with quaternary type that tells the whole area. In the case of rivers, where it is they come all municipal wastewater and waste from the Savannah agribusiness work that are a little more than 20% of the country has, in turn, the wells are all leachate and runoff of these activities and septic tanks that worked and still work as an alternative to sewer processes in several areas of the savanna. As an effect, vegetables, fruits and grains that are grown for human consumption and are receiving loads of pathogens and possibly a fair amount of heavy metals. It is necessary, then search friendly alternatives to ensure better use of water resources for agricultural processes and ensure their sustainability over time. This project aimed to assess the action of a biological system fitodepurante type artificial wetland for irrigation water used in farming in order to achieve sustainability in the management of water resources in the region, the study was conducted on a farm Cundinamarca Chía Township, village of La Balsa used for irrigation where water from a deep well.

Was designed and constructed an artificial wetland with two subsystems, the first consisting of a physical system with three types of filtration of mineral beds and the second subsystem by an artificial wetland which was implanted three types of aquatic macrophytes

Eichornnia crassipes, *Scirpus* spp and *Lemna* spp. We evaluated the biosystem fitodepuration action through physical, chemical and microbiological and validated water quality obtained in debugging a crop of spinach (*Spinacia oleracea*). The results show that the system allowed artificial wetland type is a viable initiative to improve the quality of irrigation water because it can reach a high percentage of decrease of pathogenic microorganisms, is low cost, easy operation and maintenance for the community that uses it. This type of biosystem is innovative to the extent that it has not been used for the purification of water for irrigation in the country and can improve productivity and safety of crops.

Keywords: artificial wetland, aquatic macrophyte, water irrigation, phytodepuration.

INTRODUCCIÓN

El agua es un factor indispensable para el desarrollo de los procesos biológicos, ningún proceso metabólico ocurre sin su acción directa o indirecta, es un compuesto de la naturaleza, integrante fundamental de las cadenas energéticas de los organismos y correspondientemente de los ecosistemas. La superficie del planeta en un 75% aproximadamente es agua, que en su gran mayoría se encuentra representada en mares y océanos y en una menor proporción en casquetes polares, glaciares, lagos y ríos superficiales y nacimientos profundos. Los lagos y ríos son una fuente importante de agua para los ecosistemas terrestres, esta dinámica hídrica se ajusta a un ciclo convirtiendo esta molécula en un recurso renovable; sin embargo, el abuso de esta fuente puede generar que la producción natural se vea interrumpida y se convierta de esta manera en un recurso limitado y vulnerable. (Roldan, G, 2008).

Una de las labores más agresivas con el recurso hídrico es la agricultura porque además de tomar el agua para el riego, la devuelve en peores condiciones porque agrega productos agroquímicos que aumentan su contaminación. Algunas de estas manifestaciones en la salud humana de esta contaminación son enfermedades diarreicas, intoxicaciones alimentarias, parasitismo intestinal y en algunos cultivos de importancia económica, degradación y pérdidas en la producción por presencia de fitopatógenos y sustancias contaminantes así como la desertificación de los suelos; estos son los efectos más importantes que se pueden evidenciar por el uso de las aguas contaminadas de diferentes

afluentes no garantizados como pozos profundos con pocas o cero garantías de seguridad higiénica o provenientes del río Bogotá. (Miranda, Diego, 2008).

Este alto grado de disturbio sobre el ecosistema acuático ha generado una pérdida de una elevada tasa de biodiversidad de esta zona que ha sido catalogada como una de las más prosperas ecológica y socialmente en los últimos años en cercanías de Bogotá. Todo elemento que de una manera no pueda llegar a ser ciclado o biodegradado por cualquier mecanismo metabólico natural es un agente contaminante, hoy en día este fenómeno se enmarca en el pensamiento y normas del desarrollo sostenible pero sobre todo es una aparente consecuencia de la falta de garantías para el ambiente por parte del ser humano.

El hombre ha considerado los ríos urbanos como fuentes hídricas ideales para las diferentes actividades humanas y por lo tanto debería ser un deber utilizar prácticas o estrategias que posibiliten su conservación y/o recuperación. La razón que sostiene esta consideración es que si la sociedad usa y se relaciona de manera directa con el ecosistema y el agua como recurso natural se hace responsable de su manejo y procura que las instituciones ejerzan su función como protectoras de un bien común e inalienable como son los recursos hídricos. (Durán, Zulma, 2010).

El estudio sobre procesos de depuración de aguas residuales a través de la construcción de sistemas artificiales se inicio en la década de los años cincuenta en Alemania por parte de Seidel, posteriormente Europa se destacada a nivel investigativo sobre modelos y técnicas de construcción de humedales artificiales "Wetlands",

posiblemente por ser donde confluyen una mayor concentración de países ricos, con alta densidad de población y un elevado consumo de agua frente a los recursos. Con referencia a lo anterior los continentes luego de Europa en adelantos en biodepuración de aguas por medio de humedales artificiales son América del Norte, Oceanía, Asia, África y en último rango de investigación América del Sur, estos datos según la Universidad de Valencia- España (Pérez, Marcos, 2010).

En Colombia se han adelantado en la Universidad Nacional de Colombia a cargo de los departamentos de agronomía. Miranda, Diego (2008), departamento de ingeniería química Durán, Zulma (2010.) entre otros, en este orden de ideas se puede citar que las Universidades de Antioquia, Javeriana de Bogotá, Militar Nueva Granada han participado en los últimos cinco años en actividades relacionadas con la depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. El Grupo de investigación en agua y saneamiento, de la Universidad Tecnológica de Pereira ha trabajado en estudios para evaluar la eficiencia y factibilidad de la utilización de algunos tipos de humedales en pequeñas comunidades de municipio de poca densidad poblacional, los cuales han conducido a la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales que incluye humedales de flujo subsuperficial que inicio su operación en el año 2003 y hasta el momento ha arrojado buenos rendimientos. Por su parte universidades como la del Valle y Antioquía han desarrollado estudios sobre el desempeño de humedales artificiales de flujo subsuperficial en zonas tropicales basado en modelos hidráulicos y una cinética de primer orden y depuración de aguas residuales en zonas costeras bajo técnicas de humedales artificiales. (Villegas et al, 2006).

Sumado a lo anterior el SENA regional Antioquia a desarrollado trabajos en fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales de origen agronómico (Rojas, G. 2010).

Esto demuestra la importancia de garantizar la sostenibilidad en el manejo del recurso hídrico utilizado por los agricultores de la sabana de Bogotá que usan aguas provenientes de pozos profundos para el riego de sus cultivos, tomando medidas que beneficien al agricultor, a los consumidores, al hábitat y a la calidad del agua a través de sistemas biológicos tomados como ejemplo de realización en otros países que muestran un bajo costo y fácil implementación. Dadas las condiciones que anteceden es necesario hacer partícipe a las comunidades rurales en proyectos de recuperación ambiental con el ánimo de generar una conciencia por el cuidado y buen uso de los recursos naturales a través tecnologías limpias naturales como la depuración de aguas contaminadas por medio de un biosistema de fácil operación y bajo costo que contribuya a la mejora de la calidad de agua proveniente de pozos profundos llegando a generar una solución enmarcada en el desarrollo sostenible de las comunidades humanas urbanas, rurales y de los consumidores de productos agrícolas, permitiendo el aprovechamiento del recurso hídrico proveniente de aguas subterráneas con altos grados de contaminación.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Evaluar la acción fitodepurante de un sistema biológico artificial tipo humedal para aguas de riego provenientes de pozos subterráneos con el fin de lograr la sostenibilidad en el manejo del recurso hídrico de la región.

1.2 Objetivos Específicos

Diseñar y construir un sistema biológico artificial tipo humedal a pequeña escala para depurar elementos químicos, agentes microbiológicos patógenos y restos de sustancias tóxicas provenientes del agua de riego.

Establecer la eficiencia depuradora del sistema biológico artificial a través de métodos físicos, químicos y biológicos.

Verificar la eficiencia de depuración del sistema utilizando el agua tratada como riego en un cultivo de espinaca (*Spinacia oleracea*).

2. ANTECEDENTES

El concepto de biosistema es tomado de las vías biológicas que trabajan bajo una sinergia continua en un proceso de autorregulación ecosistémico, este concepto fue trasladado a diferentes campos del conocimiento, entre ellos la ingeniería, donde un biosistema tiene como definición un conjunto de partes que interactúan y que tienen como aspecto fundamental una entrada, un proceso y una salida o resultado. Teniendo en cuenta la consideración anterior no puede definirse un biosistema sin la interacción propia de sus componentes que actúan como una parte organizacional que cumplen un objetivo individual dando respuesta a un propósito o múltiples propósitos soportándose en instrumentos biológicos, matemáticos, sociales e innovadores entre otros (Shelef, O., Gross, A & Rachmilevitch, S. 2012).

La aplicabilidad del concepto de biosistema es una de las tareas más importantes que se poseen en los últimos tiempos debido a la emulación que se ha generado sobre la naturaleza, esto, con el propósito de generar nuevas alternativas limpias ambientalmente y sobre todo enmarcadas en el desarrollo sostenible. La sostenibilidad es una alternativa ante la grave crisis que sufren los ecosistemas en el mundo, por esta razón se hace necesario incluir alternativas económicas y de fácil uso en la toma de decisiones sobre la recuperación ambiental. (Brien, O, 2004).

Hoy se sabe que alrededor de 1912 se iniciaron los primeros tratamientos artesanales para aguas residuales. El estudio sobre procesos de depuración de aguas residuales a

través de la construcción de sistemas artificiales a nivel biotecnológico se remonta a la década de los años cincuenta en Alemania por parte de Seidel, estas investigaciones se basaban en la degradación metabólica de fenoles por parte de vegetación emergente principalmente *Scirpus lacustris* (Ning, et al., 2012)

A finales de la década de los cincuenta y mediados de los sesenta, Seidel, continuó trabajando con la reutilización de aguas residuales industriales y domésticas usando siempre la misma especie emergente ya mencionada. (Bastian, R, 1993).

Para los años setenta y ochenta la utilización de humedales sintéticos se había extendido a otros países Europeos como Inglaterra donde se adoptó rápidamente por todo el territorio. Esta práctica se logró extender a países como la India y la República Checa con un cierto grado de menor avance tecnológico; estos países se vieron atraídos con esta forma de tratamiento de aguas residuales debido a su fácil operatividad y bajos costos de construcción. (Griffin, P, 2002).

De acuerdo con la Water Research Commission (2002), el sistema de tratamiento por medio de humedales artificiales ha estado alrededor de 40 años en el argot científico, pero se han experimentado dificultades generalizadas en su comportamiento con respecto a las transformaciones de eliminación de nitrógeno, así como la eliminación de fósforo.

Cooper, P. (2009) refiere que para inicios del milenio, el aumento de países que habían puesto en marcha el tratamiento de aguas residuales había aumentado en toda Europa, ahora, se vinculaban países como , Estados Unidos y Australia, debido a la mayor

cantidad de recursos económicos que en estos países se comenzaron a destinar a la investigación científica en general o a la investigación relacionada con el tratamiento de aguas residuales en particular, a partir de este momento se convirtieron en los nuevos pioneros de esta tecnología sistémica natural; países como Alemania, Francia y China también han generado novedosas estrategias en la biorremediación de ecosistemas acuáticos a través de procesos naturales como lo son los humedales artificiales. (Knowles, P., et al 2011).

Wildeman, T (2003) en su escrito *Wetland Design for Mining Operations*: Bitech Publications, Richmond, B.C presenta que en las Universidades de Michigan y Florida se trabajó en 2 líneas de investigación, la primera de ellas en el tratamiento de aguas residuales municipales y la segunda en el tratamiento de aguas ácidas de minas. En Norteamérica alrededor de 1.000 humedales artificiales estaban en funcionamiento en los Estados Unidos a mediados del 2007. (Wildeman, T, 2005).

Posteriormente de acuerdo a la U.S. Environmental Protection Agency *Constructed Treatment Wetlands*, se han venido desarrollando en Estados Unidos investigaciones sobre el uso de humedales, aplicando métodos ligeramente diferentes a los europeos, los "Free Water System" (FWS) o Humedales de Flujo Superficial (HFS) y "Subsurface Flow System" (SFS) o Humedales de Flujo Subsuperficial (HFSS).

Los registros más recientes Cooper, P.F. y Findlay, B,C (2010), aportan que este tipo de metodología científica se encuentra operando en: Canadá, Australia, China, Medio Oriente, Brasil, India y Sudáfrica y tímidamente en países como Chile, Argentina y Colombia.

(Ministerio del Medio Ambiente-Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2010).

Las aguas tratadas bajo este tipo de sistema necesitan un tratamiento posterior si se quiere una potabilización para consumo humano. (Withey, P & Cornelis van Kooten, G. 2011).

Los dos principales mecanismos de depuración de aguas es a través de separaciones líquido/sólido, este tipo de separaciones generalmente incluyen separaciones físicas y químicas que generan transformaciones derivadas de oxido-reducciones, reducciones, floculaciones, reacciones de cambio de pH y una serie de reacciones que se generan en medios aeróbicas, anóxicas o anaeróbicas. (Fernández, J, 2009).

Los humedales artificiales “wetlands”, consisten fundamentalmente en un lecho de grava u otro tipo de sustrato sobre el cual se siembra una planta acuática de la “especie” macrófita, el agua se hace circular a través de este lecho poroso poniéndola en contacto con las raíces de las plantas; de acuerdo a la revisión bibliográfica esta metodología puede cambiar dependiendo del espacio y agua a ser tratada, recomendación seguida por el investigador considerando que el tipo de agua que se quiere depurar es agua de riego. (Romero, J, 2010).

De acuerdo a lo planteado por Romero, J, (2010) en su trabajo de tratamiento de aguas residuales teoría y principios de Diseño de la Escuela Colombiana de Ingeniería. 2008, como parámetro general, un humedal artificial es un sistema encargado de captar

aguas residuales con mayores grados de pre-tratamiento (por ejemplo, la clarificación primaria, laguna de oxidación, filtro de goteo), este tipo de sistemas necesita espacios más pequeños en comparación con otros métodos de depuración de aguas. Posteriormente los humedales artificiales que se han generado han tenido una capacidad de 5 a 600 m³. En el presente trabajo de investigación se van a seguir las recomendaciones de este investigador.

Estudios realizados en la Universidad Javeriana de Bogotá sobre la calidad del agua proveniente de pozos subterráneos han puesto en evidencia la presencia de organismos patógenos provenientes de fuentes de contaminación difusas. (Campos, et al 2008).

De igual manera, estudios realizados por la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín a través de la investigación desarrollada por Vélez ,O. (2010), en su trabajo hidráulica de aguas subterráneas, también evidencia que las aguas subterráneas tienen una alta contaminación con microorganismos patógenos.

La Universidad del Valle ha adelantado investigaciones sobre Humedales artificiales en zonas tropicales a cargo de Sandoval, C; Peña. R. (2007). Por su parte la Universidad de Antioquia ha adelantado investigaciones sobre humedales artificiales en zonas agrícolas además de estudios de la remoción y recuperación de metales pesados de aguas residuales industriales por parte de Gil, E. (2009). La Universidad Nacional sede Bogotá ha desarrollado estudios sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial y su impacto ambiental, la Sede Medellín y Manizales ha generado un adelanto

importante a nivel investigativo en la última década en la remoción de metales pesados bajo esta metodología de humedales (Silva R, et al 2005).

La Universidad Tecnológica de Pereira ha sido fundamental en el avance y conocimiento sobre humedales artificiales en Colombia, entre algunos estudios se citan a nivel de pregrado y postgrado la incidencia de humedales artificiales de flujo subsuperficial y superficial en la remoción de agentes contaminantes en aguas residuales sintéticas (Londoño, C; L.2009), depuración de sustancias nitrogenadas en aguas agrícolas (Marín, V; C. 2009), además de desarrollar en el año 2007 el Seminario internacional sobre humedales artificiales (Estrada, I. 2011).

En Bogotá la Escuela Colombiana de Ingeniería. Ha sido participe del diseño de humedales artificiales a cargo de Romero, J. A en el año 2010.

Estudios realizados por Ingeominas evidencian que la sabana de Bogotá cuenta con aguas subterráneas de dos tipos, una proveniente del acuífero Guadalupe el cual se formó hace millones de años y está a una profundidad de 1500 m al cual es muy difícil de acceder por los costos que tendría una excavación de este tipo. Los pozos profundos que están siendo utilizados actualmente por todos los agricultores de la sabana no sobrepasan los 150 m de excavación y el agua que extraen de allí corresponde a acuíferos cuaternarios que se conectan con la cuenca del principal río de la sabana, el río Bogotá y está formado por arcillas, las personas han perforado estos lentes, lo explotan y prácticamente no queda ninguna reserva de él. Tomado de la Publicación No. 27 “Aspectos Geoambientales de la Sabana de Bogotá”. Ingeominas. 2010.

El problema radica en que estos acuíferos se llenan de las aguas lluvias que desafortunadamente lixivian todo tipo de contaminantes y se interconectan con todos los residuos de pozos sépticos, el agua que se filtra de las cuencas de los ríos que están altamente contaminados por todo tipo de agentes químicos y biológicos y por lo tanto cada vez es más difícil conseguir un agua racionalmente apta para cualquier tipo de labor en estos pozos profundos.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 Problemática hídrica de la zona de estudio

Desde la década de los cincuenta en Colombia, uno de los entornos ecológicos más afectados por los eventos de disturbio antrópico es la Sabana de Bogotá, el aumento de los asentamientos humanos en esta región debido a la riqueza del recurso hídrico, la gran fertilidad de sus suelos, su complementariedad climática y su extraordinaria ubicación con respecto a la siempre creciente capital Colombiana han generado un rápido cambio en la estructura propia de esta zona del País. (Marina et al., 2011).

Estos cambios en la estructura ecológica han generado un alto avance en las practicas agropecuarias, pero a su vez han acelerado el proceso de degradación de los sistemas, uno de esos espacios más modificados es la cuenca alta del río Bogotá que es un eje articulador de una gran geoestructura socioeconómica.(Córdori, D, 2000).

En Colombia fue reglamentado el uso del agua de los cuerpos hídricos a través del decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura, posteriormente la CAR reglamento el uso de las aguas del río Bogotá mediante el Acuerdo 43 de 2006 donde aclara la capacidad del agua para uso domestico e industrial a través de los tres ejes del río, cuenca alta, media y baja. (Empresa De Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Unión Técnica de la Sabana 2010).

Toda el agua que se encuentra en forma natural por debajo de la superficie terrestre se llama agua subsuperficial, independientemente de que esté en la zona saturada o no saturada. De manera general la propiedad de una roca de poseer poros o espacios se llama porosidad, a las rocas que contienen grandes proporciones relativas de espacios vacíos se les describe como porosas o se dice que poseen una alta porosidad, en general, son los poros pequeños los que están llenos de humedad frente a los grandes que están vacíos, esto significa que a profundidades mayores todos los poros están llenos de agua, y que se describe a este material como saturado. En términos científicos, se ha pasado de la zona no saturada a la zona saturada. De acuerdo a lo anterior la zona superior de los poros cuando se encuentran llenos es denominada saturada o nivel freático. El agua de la zona saturada, es decir, a la que se encuentra debajo del nivel freático se le denomina agua subterránea. (Price, M, 2003).

Un aspecto importante del agua subterránea es que en muchas áreas es la única fuente de agua, pero debido a manejos erróneos esta reserva hídrica se puede ver alterada, la contaminación fundamentalmente puede ser puntual donde está plenamente identificada o como sucede con mayor oportunidad de manera difusa donde las fuentes estas diseminadas y/o no se sabe con exactitud su procedencia. (Price, M, 2003).

Generalmente la infiltración dispersa sustancias químicas desde la zona no saturada hasta llegar al agua subterránea. Ocasionalmente la contaminación se debe a los siguientes factores: primero a que los pozos de agua se localizan en suelos arenosos donde el agua superficial se mueve rápidamente al agua subterránea, segundo a que los pozos

están localizados muy cerca de un sistema séptico o cerca de residuos de origen animal, tercero a que los pozos de agua se localizan donde pueden ser inundados por escorrentía o donde el agua fluye hacia el pozo, cuarto, es que los pozos no han sido propiamente forrados y sellados para mantener aislada el agua de cualquier agente externo y quinto es la contaminación durante la instalación o mantenimiento del pozo. (Campos, Carlos & Guerrero, Alexander, 2008).

3.2 Indicadores de calidad de las aguas del río Bogotá

3.2.1 Calidad físico-Química.

Los estudios que se presentan están centrados en el municipio de Chía, teniendo en cuenta que es la zona donde se realizó esta investigación. Uno de los indicadores de calidad de agua es la presencia de sustancias químicas incluyendo metales pesados. Un metal se considera como pesado cuando su densidad supera los 5 g/cm^3 o cuyo número atómico es superior a 20, exceptuando los metales alcalinos y alcalino-térreos García y Dorronsoro (2005). Este tipo de metales son considerados altamente tóxicos debido a su acción directa sobre los seres vivos especialmente actuando como agente bloqueador del metabolismo celular y de las reacciones enzimáticas relacionadas con la síntesis de proteínas y duplicación del material genético .

De acuerdo a estudios realizados por la CAR, 2010, a través de 24 puntos de control, se logró determinar que dos de estas estaciones, las estaciones 20-21, ubicadas en el municipio de Chía, Cundinamarca, la primera aguas arriba del Municipio y la segunda aguas abajo luego de la PTAR del municipio de acuerdo con los resultados del programa

de monitoreo de 2008-2010 el río Bogotá presentan los niveles de calidad física, química, bacteriológica y biológica que se describen a continuación.

3.2.2 Calidad microbiológica.

Según la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y la Universidad Javeriana, 2010 es evidente el aporte de contaminación orgánica de cada uno de los municipios de la cuenca, para este estudio se resalta que sólo el municipio de Chía genera una descarga de 4046,05 DBO5 (Kg/d) de una población de 97.896 habitantes sobre el río Bogotá según datos del censo 2005 extrapolados al 2010. DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

Tabla. 1. Criterios de calidad microbiológica.

PARÁMETRO	Expresado Como	Consumo humano con tratamiento convencional		Uso agrícola y pecuario	
		Decreto 1594/84	Acuerdo CAR 43 2006	Decreto 1594/84 criterios admisibles	Acuerdo CAR 43 2006
PARAMETROS ORGANICOS					
DBO5 mg/L 7 50	mg/L		7		50
OD mg/L 4	mg/L		4		
PARAMETROS NUTRIENTES					
AMONIACO-N mg/L 1	mg/L	1			
NITRATOS-N mg/L 10 10	mg/L	10	10		
NITRITOS-N mg/L	mg/L	10	10	10	10
SÓLIDOS					
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L 10 40	mg/L		10		40
COLOR	UPC	75			

Fuente: Empresa De Acueducto Y Alcantarillado De Bogotá, Unión Técnica de la Sabana 2010.

De acuerdo a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y la unión técnica de la Sabana, 2010, las concentraciones de Coliformes Totales y Coliformes Fecales (E. Coli) son altas (superiores a 1000 NMP/100 mL), y por lo tanto el uso de las agua del río Bogotá que no es potable para el hombre, se considera apto directa o indirectamente para actividades humanas ó agrícolas. En el Cuadro 2 se observan los criterios de calidad bacteriológica para el uso del recurso hídrico, según las regulaciones nacionales y regionales vigentes.

Tabla. 2. Criterios de calidad bacteriológica del agua

PARÁMETRO	Expresado Como	Consumo humano con tratamiento convencional		Uso agrícola y pecuario	
		Decreto 1594/84	Acuerdo CAR 43 2006	Decreto 1594/84 criterios admisibles	Acuerdo CAR 43 2006
COLIFORMES TOTALES	NMP/100 ml	20000	5000		20000
COLIFORMES FECALES	NMP/100 ml	2000	4		

Fuente: Empresa De Acueducto Y Alcantarillado De Bogotá, Unión Técnica de la Sabana 2010.

Durante las últimas décadas la supervisión de la calidad de las aguas del río Bogotá ha estado bajo la supervisión de la CAR, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y la Secretaria Distrital del Ambiente, lastimosamente el adelanto investigativo ha sido pobre y aún peor las soluciones al grave problema ambiental que afronta el río no se han dejado ver de manera clara. (Campos, Carlos & Guerrero, Alexander, 2008).

Según la Universidad Javeriana la alcaldía Mayor De Bogotá y Secretaria Distrital de Ambiente, 2010 en la cuenca alta del río Bogotá las condiciones aún permiten el florecimiento de diversas formas de vida especialmente de macroinvertebrados que actúan como bioindicadores de calidad además de una menor diversidad de moluscos, peces y otros grupos, esto debido a que el nivel de oxígeno disuelto se encuentra por encima de 6.0 mg/L, este valor permite mantener condiciones que permitan la supervivencia de distintas especies. (Canalsa et al., 2011).

Desde el municipio de Villapinzón y hasta la descarga del embalse del Sisga, la concentración de oxígeno disuelto presenta oscilaciones (1-7 mg/l); su presencia se ve favorecida por la capacidad de autodepuración del río y los aportes de los embalses de Tominé y Sísiga, los parámetros DBO (Demanda bioquímica de oxígeno) y ST (Sólidos totales) se encuentran por debajo de los 30 mg/L y 300 mg/L respectivamente. En el trayecto de la cuenca alta inferior, la calidad del río se ve reducida al recibir las descargas del río Negro que en su cuenca alta es llamado Virrey, relacionados con las cargas del municipio de Zipaquirá, el oxígeno disuelto se reduce de 6.5 mg/l hasta 2.5 mg/l; la DBO se mantiene en el orden de 15 mg/l, esto debido al ingreso de aguas al sistema por parte de los embalses de la cuenca alta superior y del río Neusa. (Calidad del sistema hídrico de Bogotá – 1 a ed – Bogotá, 2011).

3.3 Papel de las macrófitas en la depuración de aguas

Curt, M (2009) indica otra definición para “macrófita”, siendo cualquier vegetal observable a simple vista, este concepto juega un papel antagónico con lo que son las macrófitas utilizado para vegetales que no son visibles sin la ayuda de lentes ópticos, en consecuencia, las plantas de talla visible que crecen en sistemas lenticos o loticos se denominan ‘macrófitas acuáticas’, término que desde un punto de vista amplio englobaría plantas acuáticas vasculares (angiospermas y helechos) y musgos acuáticos entre otros.

La metodología de limpieza a través de humedales artificiales es altamente eficiente en cuanto a la remoción de sustancias nitrogenadas, alrededor de un 58 a 78% es adsorbido por la rizósfera de las macrófitas acuáticas y el restante porcentaje es procesado por el metabolismo microbiano. (Stefanakis, A & Tsihrintzis, V. 2012).

Entre las principales funciones que cumplen las macrófitas acuáticas es transportar oxígeno atmosférico a las capas anaerobias del suelo o el agua, de esta manera se ve beneficiado la oxidación y precipitación de metales pesados y sustancias tóxicas como el etanol en la capa externa de la rizósfera. (Welza et al., 2011).

La toma de nutrientes por las raíces varía con la especie de macrófita y con el tipo de nicho que dicha planta desempeñe; la transformación de nutrientes en los lechos puede variar dependiendo de la entrada de nutrientes por el efluente, tiempo y variables ecológicas bajo las cuales se encuentre la planta. (Curt, M. 2009)

Llorente, M. & Alvarez, J. (2012) aseguran que los tejidos vasculares de la macrófita hacen posible el paso de oxígeno desde las hojas y raíces al suelo circundante, de este modo la flora microbiológica que requiere oxígeno encuentra un hábitat ideal en la rizósfera. En cuanto al proceso de biodegradación de sustancias contaminantes, la transformación de desechos orgánicos, hidrocarburos y metales pesados se realizan por medio del metabolismo generando sustancias más sencillas, la filtración natural en el sustrato también ayuda a la eliminación de muchos contaminantes y microorganismos patógenos.

En consecuencia, las macrófitas generan un proceso de transformación de nutrientes y sustancias por medio de procesos físicos, químicos y microbiológicos teniendo como principal resultado la remoción de estas sustancias del medio para ser utilizados para su metabolismo y crecimiento, sobre la base de este proceso se puede afirmar que este tipo de vegetación ofrece una alta tasa de adaptabilidad ecológica específicamente en la resistencia mecánica al flujo del agua permitiendo ser aptas para procesos de alta movilidad generada por el caudal de un sistema llegando a generar una remoción significativa ideal para la formación de la vida nativa de las comunidades existentes en un sistema acuático. (Hsua et al., 2011).

Las macrófitas acuáticas presentan un sistema de raíces formado con varias yemas que crecen horizontalmente generando un conjunto de raíces y brotes de sus nudos. Un rizoma es un tallo horizontal subterráneo que puede ser largo y delgado, como en el caso del pasto que forma el césped, o grueso y carnoso como los iris. (Hijosa, et al 2012)

Los rizomas sobreviven en invierno y contribuyen a la reproducción asexual, pues cada nodo contiene una yema. Algunos rizomas tienen porciones alargadas llamadas tubérculos, cuya función es almacenar alimento. Los rizomas crecen indefinidamente remplazándose rápidamente las partes viejas, sus ramas engrosadas pueden generar entrenudos, raíces adventicias y yemas. Según su ecología y crecimiento los rizomas se pueden clasificar en simpodiales o monopodiales. (Curt, M. 2009)

Sobre la base de las consideraciones anteriores los rizomas simpodiales son aquellos en donde cada parte pertenece al desarrollo de yemas axilares continuas, la yema de cada porción produce un brote aéreo; en los rizomas monopodiales la yema terminal crece indefinidamente mientras que las yemas axilares originan brotes epígeo; se observa claramente que este tipo de conformación morfológica vegetal es característico de especies invasoras, exóticas y arvenses. Las plantas con este tipo de crecimiento son perennes pero con una característica especial y es que conservan sus órganos acuáticos o subterráneos con una cantidad apropiada de nutrientes almacenados que le son de utilidad para el siguiente proceso reproductivo. (Navarro, J, 2009).

3.3.1 Descripción de una planta macrófita

Morfológicamente, una planta macrófita está compuesta por: una hoja que es un órgano vegetativo especializado en la captura de energía lumínica fundamental para el proceso fotosintético, entre las principales funciones de la hoja es capturar y atenuar

la radiación solar evitando el crecimiento de otras especies de plantas en las cercanías. Un tallo es la parte aérea que sostiene a las hojas, tallos y estructuras sexuales en una planta, además de ser el encargado del transporte de sustancias a través de un sistema especializado de canales vasculares. El tejido vascular en los tallos transporta agua y sustancias disueltas a través de la planta.

Las macrófitas acuáticas poseen un tallo sumergido que cumple funciones fundamentales en el proceso de depuración de aguas residuales, en igual forma esta estructura reduce la velocidad del caudal generando un proceso de sedimentación y un traslado de oxígeno atmosférico que promueve la degradación aeróbica y la toma de nutrientes. (Liua, et al. 2012).

Según Curt, María Dolores en su Manual de Fitodepuración (2009), existe una baja gama de especies que han sido utilizadas en procesos de depuración hídrica, esto debido a la continua reiteración de utilización de tratamientos convencionales; comúnmente se restringe a especies helófitas debido a su fácil adaptabilidad a sistemas de depuración de manera sintética.

En este tipo de “biosistema” las plantas más eficientes para el proceso de depuración son macrófitas emergentes como las enneas (*Typha spp.*) y el carrizo (*Phragmites australis*) e hígrófitos como los juncos (*Scirpus spp.*). En sistemas biológicos acuáticos de tratamiento de aguas se utilizan macrófitas flotantes de flotación libre, como son el jacinto de agua (*Eichcornia crassipes*) y las lentejas de agua (*Lemna spp.*). Para este estudio se le dará relevancia a *Scirpus spp.*, *Eichcornia crassipes* y *Lemna spp.*

3.3.2 Juncos (*Scirpus spp*)

Curt, M (2009), observa claramente que el género *Scirpus* hace parte de la familia cyperaceae. De manera general, el aspecto de las Cyperaceae tiene una conformación semejante a las gramíneas, ya que en su mayoría son plantas herbáceas, cespitosas, con flores pequeñas. Sin embargo, tienen caracteres botánicos marcadamente diferenciales, como son la organización de la flor (en las Cyperaceae va acompañada de una sola bráctea o gluma) y el tipo de fruto en las Cyperaceae es un aquenio indehiscente, que contiene una única semilla. En la región apical del tallo se encuentra una pequeña espiga de color marrón que sirve de alimento a la avifauna. (Navarro, J, 2009).

El género *Scirpus* pertenece a las plantas de clima templado-frío, crece en adecuadas condiciones soleadas con un rango de pH entre 4-9, la temperatura promedio óptima es de 15 a 28°C. En cuanto su rango de tolerancia a los agentes contaminantes de origen doméstico e industrial posee una alta adaptación, se pueden encontrar estudios comparativos de *Scirpus validus* frente a otras especies de humedales artificiales, como *Typha latifolia*, que indican en un determinado contexto experimental que es más eficiente que otras especies en la remoción de N y P. (European Environmental Agency, 2002).

Las especies del género *Scirpus* se han utilizado principalmente en humedales artificiales flujo sub-superficial (lecho de grava/arena), ya que su tolerancia a la inundación permanente cuando la capa de agua es profunda, es limitada, aunque otras especies pueden

tolerar profundidades mayores. Su productividad es baja en relación con las eneas o los carrizos.

El papel fundamental de este género en los sistemas de depuración de aguas residuales es de actuar como filtro, aumentando los mecanismos de sedimentación-separación. La siembra de esta planta en el biosistema debe ser a través de plantas extraídas de sitios con condiciones semejantes, esto para evitar la muerte de individuos o la contaminación del sistema biológico. Las plantas se deben fraccionar de modo que cada porción lleve una parte de su rizoma, se plantan individualmente en el sustrato o en el fango; los juncos son plantas muy rústicas de las que no se tienen referencia de plagas y enfermedades en su aplicación en humedales artificiales. EPA (United States Environmental Protection Agency, 1988).

3.3.3 Jacinto de agua- Buchón de agua (*Eichhcornea crassipes*)

El buchón de agua o Jacinto, es una macrófita flotante, herbácea perenne muy común en cualquier sistema acuático; según la Comisión de Supervivencia de Especies (CSE) de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) en el año 2009, esta especie fue declarada una de las cien especies más dañina de todo el planeta, estando ubicada en el número treinta y tres de la lista.

E. crassipes es una macrófita acuática de libre flotación cada vez más común en el planeta, mide aproximadamente 0,5 m de altura, pero puede llegar a medir casi un metro. (Gopal 1987).

E. crassipes puede formar densas alfombras flotantes. Sus hojas son gruesas, succulentas, brillantes y recubiertas de cera. La venación foliar es densa, numerosa, fina y longitudinal. El tallo es erecto, de 50 cm de largo, y lleva en la parte superior un pico único de 8 a 15 flores vistosas. Las flores tienen seis pétalos, de color azul púrpura o lavanda ha rosado, la más alta con un pétalo amarillo, azul bordeado de una mancha central. Sus raíces son púrpura y negro con plumas (Gopal 1987).

E. crassipes forma un tallo ramificado, que consiste en un rizoma de 6 cm de diámetro y hasta 30 cm de longitud, con varios entrenudos cortos. Cada nudo tiene una hoja y varias raíces. Las yemas axilares, que también pueden formar estolones pueden crecer en un ángulo de 60 grados desde el rizoma y se mantienen en ese ángulo hacia arriba en rodales muy densos, o se pueden llegar a convertir en estructuras horizontales encargadas de la captación de oxígeno. Las hojas del follaje son pecioladas con un brillo satinado, y están dispuestas en espiral, que parecen dar la impresión de una roseta. Cada hoja consta de un pecíolo. El pecíolo lleva una gran estípula membranosa, que forma una envoltura alrededor de la hoja siguiente más joven. Los pecíolos son esponjosos y pueden llegar a medir hasta 5 cm de diámetro y 30 a 50cm de longitud (máximo 125 cm). Pueden ser alargados, hinchados en el centro y pueden ir disminuyendo para formar un bulbo que sirve como flotador (Gopal, B, 1987), que contiene el aire lleno de tejido esponjoso.

La biomasa de un Jacinto puede ser de 50% en solo sus raíces. Las raíces son adventicias y fibrosas, pueden medir entre 10 a 300cm de longitud, son de color violeta oscuro a violeta azulado o rosado (aunque blanquecina si se cultiva en la oscuridad total)

pudiendo contener pigmentos solubles, como antocianinas que pueden proteger la raíz de la herbivoría (Gopal, B, 1987).

Según Balasubramaniana, D (2012) las flores aparecen en la fase terminal en un pedúnculo alargado sostenidas por dos brácteas. La bráctea inferior tiene una hoja distinta. Cada espiga tiene 4-25 flores (máximo 35) con 8 a 15 siendo la conformación más común. El tubo del perianto es de 1.5-1.75cm de largo con una base de color verde pálido. Los tépalos son ovados a oblongos, delgados, lila de hasta 4 cm de largo. El tépalo posterior tiene un centro de color amarillo brillante con forma de diamante rodeado por un borde azul oscuro con brillantes líneas rojas que irradian. El fruto es una cápsula de paredes delgadas encerrado en un hipanto relativamente grueso, que posee paredes desarrolladas a partir del tubo del perianto. Las semillas maduras pueden ser 450 por cápsula, son de 4 x 1 mm, con una base oval y el ápice cónico.

En países como Colombia, *E. crassipes* muestra una gran adaptabilidad desarrollándose exponencialmente en zonas húmedas, lagunas, lagos humedales o pantanos generados por la acumulación de aguas residuales. Puede llegar a tolerar fácilmente cambios en el caudal, velocidad del flujo, disponibilidad de nutrientes, contaminación y salinidad. El principal limitante para el desarrollo del Jacinto de agua es la temperatura. El crecimiento es rápido en el entorno de 20-30°C de temperatura media, pero se estanca en el intervalo de 8-15°C. (Smith, S, 2009).

E. crassipes ha sido utilizada en el tratamiento de aguas contaminadas, en estos sistemas, la profundidad recomendada para los estanques de tratamiento es del orden de 1

metro, a fin de que toda el agua bañe el sistema radicular de las plantas. En tratamientos secundarios no aireados la carga típica de DBO está en el intervalo de 40-80 kg/ha/día. También es eficaz para la remoción de sólidos en suspensión, y es utilizada para corregir los problemas derivados del desarrollo incontrolado de algas de las lagunas de oxidación. (Brix, H, 2001).

El establecimiento de *E. crassipes* en los sistemas artificiales de tratamiento de aguas se realiza a partir de plantas jóvenes o retoños provenientes de crecimientos adventicios. Estas nuevas macrófitas se obtienen por división de una población madre que preferiblemente se halla colectado en un sistema natural. Cuando se implanta fuera de su área de distribución natural, el principal accidente que puede suceder es el de daños por bajas temperaturas. La planta puede sobrevivir cuando se la expone 24 h a temperaturas del orden de 0.5 a -5°C , pero muere si desciende por debajo de -6°C . (United States Environmental Protection Agency, EPA, 2000).

En el marco de lo citado, la remoción parcial de *E. crassipes* se debe realizar periódicamente debido a su acumulación de agentes contaminantes y a su vez su crecimiento genera una espesa cobertura que cubre la totalidad de la lámina de agua descendiendo excesivamente el oxígeno disuelto en este medio, además se interrumpe el paso de la luz y el input de materia orgánica en el agua aumenta rápidamente por la pudrición de la biomasa vegetal. A modo de indicación se señala que en climas cálidos debe realizarse la cosecha parcial de las plantas cada 3 o 4 semanas. (Wang, et al 2011).

3.3.4 Lenteja de agua (*Lemna spp.*)

El nombre común de lenteja de agua se aplica a especies del género *Lemna* y otros géneros (*Spirodela*, *Wolffia*, *Wolffiella*) de la familia de las Lemnaceae, debido a que todas ellas son plantas acuáticas herbáceas flotantes no enraizadas. Morfológicamente son plantas de un tamaño muy reducido, entre 05 mm y 1.0 mm y de una conformación sencilla. Su distribución es cosmopolita en ambientes acuáticos que sufren disturbios antrópicos especialmente de origen industrial por cuanto crecen en aguas eutroficadas. (Kadlec R & Knight R, 1996).

El aspecto de *Lemna spp* es de un pequeño cuerpo ovalado verde (de 1 a 15 mm de longitud), las hojas de la planta reciben una denominación específica, frondes, porque no hay distintivamente hoja y tallo; en la parte inferior del fronde puede existir una raíz o varias dependiendo de la especie, cada raíz puede llegar a medir longitudinalmente unos 10 mm. El tamaño y morfología del fronde, características de la raíz sirven para realizar una identificación taxonómica de la especie. Para su dispersión, la macrófita acuática se reproduce vegetativamente desarrollando nuevos frondes (frondes 'hijo') en la base del fronde madre. En la naturaleza es usual que en una misma localización crezcan al tiempo varias especies de Lemnaceae; este hecho, unido a las similitudes morfológicas entre ellas y al pequeño tamaño de los especímenes dificulta mucho la identificación a nivel de especie de la población. (Rump, H, 1992).

La estructura reproductiva de esta planta se ve activada por temperaturas promedio entre 25 a 28 °C; posee un crecimiento que puede llegar a duplicarse en un plazo

de 4 días. Esta familia botánica puede emplearse en sistema de tratamiento de aguas residuales a través de la experiencia de lagunas permitiendo reducir eficientemente la concentración de algas del efluente a consecuencia del sombreo generado por la cobertura de la lámina de agua.

Resulta oportuno mencionar que alrededor del mundo se han construido eficazmente plantas de tratamiento con la participación de la familia Lemnaceae. En relación con la remoción de nutrientes hay que indicar que el cuerpo vegetativo de las Lemnaceae tiene un alto contenido en nitrógeno total (4.6% de media y 7% máximo, sobre peso seco), por lo que si se obtiene una alta productividad en biomasa y se retira del medio acuático periódicamente, pueden removerse del agua cantidades significativas de nitrógeno. (Rump, H, 1992).

Según se ha citado, hay que indicar que aproximadamente el cincuenta por ciento de la biomasa de *Lemna spp* son materiales como fósforo, potasio o nitrógeno. Se puede calcular que un metro cuadrado de superficie de lámina de agua cubierta con Lemna equivale a 25 g de peso seco de biomasa. Si se mantiene a un ritmo de reproducción de que cada 4 días se duplique la superficie, se podría remover del sistema mediante la cosecha periódica de la biomasa producida en la mitad de la superficie 1.16 g de N y 0.2 g de P. (United States Environmental Protection Agency. EPA. 2000).

De acuerdo a estudios realizados por (EPA. 2000) las heladas frecuentes afectan negativamente la población de lentejas de agua. Entre los efectos más evidentes es el cambio de tonalidad del foliolo que pasa de un verde profundo a un rojizo. Para

este género vegetal se reporta según Gentry , O (1993) que el rango de temperaturas invernales es de 1 a 3°C.

Por otra parte, cabe reseñar el efecto del viento sobre estos sistemas acuáticos de tratamiento. Las lentejas de agua son sensibles al viento por el pequeño tamaño de las plantas, con lo que puede ocurrir el desplazamiento de la población hacia una posición de la balsa, dejando parte de la lámina de agua al descubierto, y por tanto, reduciendo la eficacia del sistema. (EPA. 2000).

Dadas lo planteado, el tipo de vegetación que es apto para la generación de humedales artificiales deben cumplir con una serie de características ecológicas y de nicho, de esta manera se pueden obtener resultados exitosos en materia de depuración hídrica, algunas consideraciones a tener en cuenta son: Las especies botánicas deben ser colonizadoras, con un activo crecimiento de su rizósfera, esto con un propósito biodepurador. (Cooper, F, 1990).

La biomasa subterránea debe ser de gran densidad para generar un excelente transporte de oxígeno entre la región aérea y este sistema de raíces, se debe tener en cuenta el nicho ecológico de cada especie de acuerdo a la proyección del sistema de depuración, debe tratarse de especies con una alta productividad, de igual manera deben tolerar y ser capaces de metabolizar sustancias contaminantes tóxicas (Serrano, Joan, 2008).

3.4 Sistema de humedales

3.4.1 Humedales naturales

En lo que respecta a la definición de humedal natural la definición más clara y que se consideró para este trabajo es la de la Convención de Ramsar, esta definición menciona “extensiones de marismas, pantanos, turberas y aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de 6 m”. Tiene un carácter genérico y pretende incluir un amplio espectro de ambientes acuáticos. (Cunningham, S, 1995).

Los humedales son zonas que se encuentran superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm con plantas emergentes. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción 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 de igual manera. La oxidación producida por algunos microorganismos juega un papel importante en el trabajo de los humedales artificiales en la purificación de agua y ciclado del nitrógeno generando una reducción significativa de los agentes contaminantes. (Sims, et al 2012)

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del

suelo y la materia orgánica, utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos, lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento para de esta forma observar la remoción de nitrógeno en un alto porcentaje a lo largo de la columna de agua. (Liua, et al 2012)

Los humedales naturales pueden llegar a ser muy complejos, con una capa de agua que cubre el suelo, gran cantidad de vegetación a diferente nivel (sumergido, flotante y emergente) y aguas subterráneas más o menos próximas a la superficie.

A través de diferentes procesos, los microorganismos del suelo y de los rizomas de las plantas degradan la materia, las plantas asimilan y retienen los nutrientes y los metales del agua quedan retenidos en la grava y en el tejido vegetal. El mecanismo mediante el cual la planta saca del agua residual el contaminante es el siguiente: las plantas acuáticas, que constituyen la base de la tecnología de los wetland, tienen la propiedad de inyectar grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces. El aire que no es aprovechado por la especie y que ésta expele es absorbido por microorganismos, como bacterias y hongos, que se asocian a la raíz y se encargan de metabolizar los contaminantes que entran al sistema. El uso de humedales para tratamiento de Aguas Residuales con metales pesados promueve la conservación del medio ambiente por medios naturales y económicos. (Novotny, V, 2004).

3.4.2 Humedales Artificiales (HA)

Un humedal artificial consiste en una superficie plana o con un grado de desnivel, esto, en procura de una ganancia por caída de gravedad además de un sistema para

captar sedimentos; habitualmente son rectangulares pero su forma puede variar dependiendo el espacio y las necesidades. Lara, J (1999). La profundidad del agua está marcada por las especies vegetales que sean parte del sistema, es de recordar que la oxigenación del agua también es realizada por el transporte a través de las plantas. Macrófitas como *Eichornnia crassipes* necesitan profundidades entre 0.80 m y 1.0 m y/o plantas como *Lemna spp* alrededor de unos 0.3 m a 0.5 m, en la misma forma la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto cumplen un papel fundamental en el proceso además de la estricta relación microorganismos – rizósfera. En la zona de las raíces de las macrófitas se generan tanto condiciones anaeróbicas como aeróbicas, dependiendo de la liberación de oxígeno por parte de las plantas. Bajo condiciones aerobias es posible la oxidación de compuestos nitrogenados y sulfurados así como la mineralización de materia orgánica. (Kusch, P & Weissner, A, 2001).

3.5 Aguas de Riego

Según la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR 2006, a través de su informe del recorrido por el río Bogotá, da a conocer que el principal abastecimiento de agua para consumo agropecuario son las aguas del río Bogotá y pozos subterráneos, esto debido a que las zonas aptas para riego se localizan en la parte plana que atraviesa el río en dirección norte sur. Se estima que la demanda media para riego en la Sabana de Bogotá es de $9 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ son de riego controlado (Distrito de riego de La Ramada), mientras que los restantes $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$ corresponden a derivaciones en las márgenes del río, en la mayoría de los casos no controladas.

Para Miranda, D (2008) en su estudio “Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá”, observó en el agua de riego, proveniente del río Bogotá, que las concentraciones de metales pesados, especialmente el cadmio, están cercanas a los límites establecidos por las normas vigentes nacionales e internacionales. Los resultados mostraron incrementos considerables con respecto a los determinados anteriormente por la CAR en el año 2006 en diversos sectores de la cuenca alta del río Bogotá.

En los cultivos hortícolas establecidos en la Sabana de Bogotá los cultivadores realizan las actividades de riego utilizando las aguas del río Bogotá a través del distrito de riego La Ramada y de tomas no controladas, que cubre unas 6.400 ha. Su uso ha generado una problemática de contaminación en las especies hortícolas causando deterioro de la calidad de los productos que en su mayoría son consumidos en fresco. (Carranza, C, Lanhero; D, 2009).

La concentración media de Hg para los suelos del mundo, raramente excede los 4 $\mu\text{g kg}^{-1}$ asociándose principalmente a suelos orgánicos Kabata, P (2000). González y Mejía (1995) encontraron en seis zonas hortícolas diferentes en la Sabana de Bogotá, regadas con el agua del río Bogotá, niveles de Cd entre 0,95 y 2,00 mg kg^{-1} , en una profundidad entre 0 y 30 cm del suelo, mientras entre 30 y 60 cm de profundidad las concentraciones de Cd fueron solamente entre 0,65 y 1,40 mg kg^{-1} , lo que muestra la mayor acumulación en la parte superficial del suelo y el peligro para las plantas que enraízan solamente en esta capa. Esta misma tendencia la encontraron González y Mejía (1995) para As con valores entre 6,8 y 12,5 mg kg^{-1} para la zona entre 0 y 30 cm del suelo y entre 5,8 y 9,0 mg kg^{-1} As en 30 a

60 cm. Bergmann (1993) reporta para el As una concentración máxima 20 mg kg⁻¹ como tolerable en suelos agrícolas y que una buena aireación del suelo disminuye la adsorción de este elemento por la planta.

4. MATERIALES Y METODOS

La puesta en marcha de este estudio incluyó cuatro fases: selección del agua de riego para el proceso de depuración, construcción del humedal artificial, evaluación de la acción depurante y validación del agua de riego depurada en un cultivo.

4.1 Fase 1. Selección del agua de Riego

El criterio de selección de la muestra de agua de riego a depurar fue que las aguas provinieran del río Bogotá o de pozos profundos que pudiesen tener influencia del río Bogotá y estuviesen a una distancia no mayor a cien metros del cauce.

Se visitaron 40 fincas ubicadas en 8 Municipios de la cuenca alta del río Bogotá y 22 de ellas facilitaron la información sobre el agua de riego y autorizaron toma de muestra para conocer la carga microbiana, características físicas y químicas para establecer el estado inicial de la calidad del agua. Este procedimiento de caracterización de aguas de riego, se realizó con la colaboración de estudiantes de Pregrado de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca quienes realizaron estos análisis como parte de su proyecto requisito de grado.

Después de dar a conocer a los agricultores sus resultados, se procedió a dialogar para que permitieran la puesta en marcha del sistema “humedal artificial” en su finca.

4.2 Fase 2. Construcción del sistema: humedal artificial

Una vez seleccionada la finca, se procedió a estudiar el terreno y a definir el sitio para la construcción del sistema.

4.2.2 Espacio físico para el sistema.

El montaje del sistema “humedal artificial” se acopló a los espacios libres de la finca seleccionada. El terreno debe ser plano, cercano a la fuente de agua que se desea depurar, con algún nivel de aislamiento del cultivo, que no tenga contacto con ningún animal de cría para que no haya contaminación del sistema.

Debe haber un consentimiento verbal o escrito del agricultor que garantice hacer el seguimiento permanente y de alguna manera para que el dueño se vincule puesto que él va a ser el beneficiado con este proyecto.

4.2.3 Construcción del sistema

El sistema incluyó dos subsistemas, un sistema físico y un sistema biológico.

4.2.4 Componente físico del humedal artificial: Tanque de filtración

Se seleccionó un tanque plástico como espacio para el proceso físico de filtración con una capacidad de 5 m³ una tapa con cierre en cuña que la sostiene para evitar contaminación.

Las medidas del tanque fueron 1,12 m de alto, 0,9 m de diámetro superior y 0,73 m de diámetro inferior.

Se utilizaron tres tipos de malla, la primera es de tipo PEAD de 7H por pulgada que se sujetó al tanque principal por medio de un aro hecho en acero inoxidable, la segunda es de fibra de vidrio de medidas 14 por 14 mm y la tercera está hecha en acero inoxidable de medidas 4 ¼ por 2 ¼ . En el piso del tanque se dejó un espacio libre con una distancia de 0,3m, el cual se denominó falso fondo que fue aislado de los lechos con una rejilla hecha en varilla de ½ pulgada, luego, recubierto con una película protectora anticorrosiva libre de elementos contaminantes.

Se seleccionó como material para la filtración grava, antracita y arena y fueron adquiridas a través de un distribuidor en Bogotá, se solicitó que el material cumpliera con las características recomendadas por Carbotecnia. Boletín técnico. AG.009. 2004. En la figura 1 se observan la disposición de los lechos en el filtro físico.

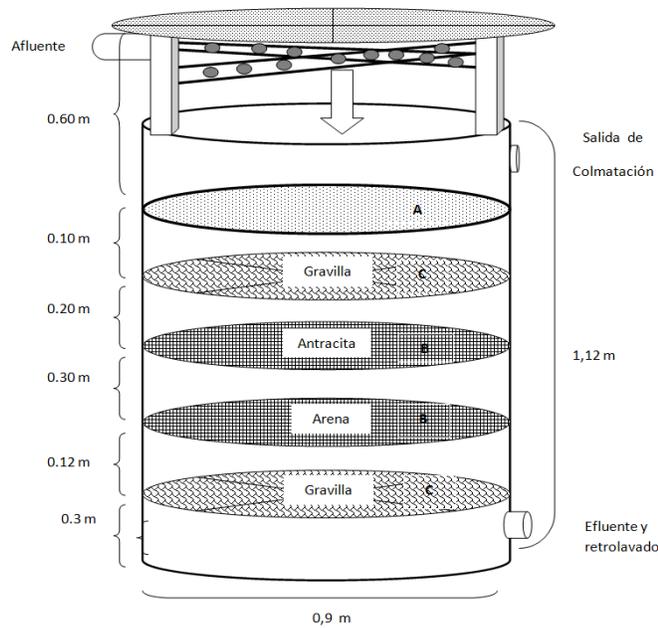


Figura 1. Disposición de los lechos en el filtro físico. Fuente: investigador 2012.

El agua de riego entra al tanque de filtración por una válvula y se distribuye en forma homogénea, en una caída de aproximadamente 0,6 m, de acuerdo con la capacidad del tanque seleccionado, con el fin de distribuir en forma homogénea el agua que entra al filtro y permitir un movimiento adicional y una oxigenación al fluido por caída libre. El agua debe pasar por el sistema físico de filtración y salir a través de una tubería que permite el paso del agua al estanque en donde están ubicadas las macrófitas. Una vez haya pasado por este sistema, el agua debe volver a recircular a través de los dos sistemas con el fin de garantizar la repetición del proceso en un tiempo determinado.

4.2.5 Componente biológico del Humedal Artificial

El subsistema donde se colocará el componente biológico está compuesto por un estanque con las plantas macrófitas y un depósito para el agua sometida al proceso de fitodepuración.

4.2.6 Depósitos o estanques

El sistema tiene dos estanques, cada uno con una dimensión de 5 m de largo, 3 metros de ancho y 0,8 m de profundidad, con una área de 12 m³ y una pendiente de 20°. En uno de los estanques debe funcionar el humedal artificial y en el otro servirá de reserva del agua de riego fitodepurada.

Los dos depósitos se deben impermeabilizar del suelo con plástico negro calibre 8 Referencia PNK 201010. Para sostener las macrófitas y controlar su ubicación en el sistema es necesario incorporar dos rejas plásticas verdes de polietileno de alta densidad en el estanque donde funcionará el humedal artificial con las siguientes medidas 1,20 m de ancho por 3,0 m de largo, con una trama de ½ pulgada con el propósito de sostener las macrófitas. Ver figura 2.



Figura 2. Reja de polietileno de alta densidad.

Para el transporte del agua se utiliza material en PVC, blanco de una pulgada. Para impulsar y airear el agua se tienen dos bombas, la primera de marca Fema. Ref. FEM191090 y la segunda marca Karson modelo QSB-JH-400 de 3532.

4.2.7 Macrófitas

4.2.8 Selección y Recolección de Macrófitas

Se estableció que era necesaria una visita a varias zonas de la cuenca alta del río Bogotá para identificar las estaciones de muestreo (tramos) representativo teniendo en cuenta las condiciones fluviales. Los criterios de la selección del sitio de muestreo fueron: que la zona tuviera abundancia de las especies *Eichornnia crassipes*, *Lemna minor*, o *Scirpus lacustris*. Los criterios de selección de las plantas fueron: plantas más pequeñas y que estuvieran florecidas para ayudar en los procesos reproductivos; que no tuvieran clorosis o necrosis; plantas grandes se rechazaron puesto que fácilmente se dañan en su recolección y desinfección. Se tuvo también como criterio para la recolección que hubiese fácil acceso al río y seguridad para el investigador en el momento del muestreo.

Como criterios complementarios para el muestreo, se evitó muestrear en tramos cercanos (500m) a infraestructuras viales las cuales suelen modificar la estructura del sustrato, régimen del caudal y grado de sombra, el recorrido se realizó por las dos orillas de los tramos seleccionados. Se fijaron los puntos de inicio y final mediante coordenadas geográficas, igualmente se registró a través de la hoja de campo adaptada de la confederación hidrográfica del Ebro. Anexo 1.

La metodología de muestreo para las macrófitas acuáticas se basó en el protocolo presentado por la confederación hidrográfica del Ebro, bajo la dirección de la Universidad de Barcelona y el Real Jardín Botánico de Madrid en el año (2005) y la norma técnica colombiana ICONTEC, Gestión ambiental acuática, Técnicas generales de muestreo para estudios biológicos. GTC.25.

Las macrófitas se extrajeron con una red de arrastre cada 1,5 m. y se conservaron en fresco en bolsas plásticas, cada ejemplar por separado, se procedió a rotular la muestra con fecha, código de recolección, sustrato de los que procede, colector e identificación. Se usó un rotulador resistente al agua.

4.2.9 Implantación de las macrófitas en el humedal artificial

Las macrófitas son desinfectadas con hipoclorito de sodio de acuerdo con protocolo de desinfección de acuerdo con el protocolo de desinfección de filtros y humedales de tratamiento de agua presentado por Carbotecnia. Boletín técnico. AG.0010 (2004) y puestas en el depósito del subsistema biológico con una densidad suficiente que cubra un 50% entre las tres variedades vegetales: *Eichornnia crassipes* (5000 g/m²), *Lemna minor* (2442 g/m²), y *Scirpus lacustris* (3000 g/m²). Ver figura. 3.

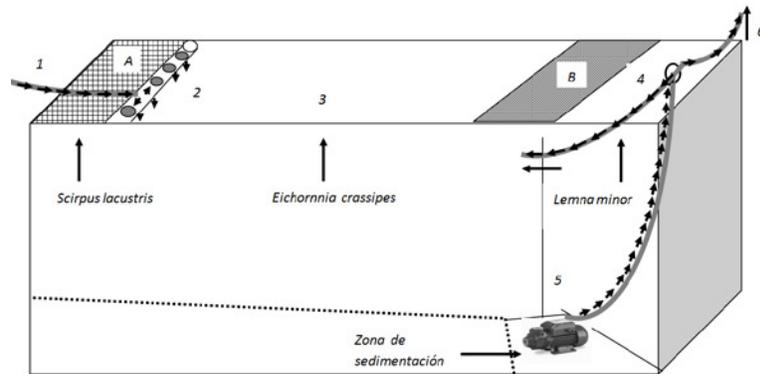


Figura 3. Diseño y operación del Humedal artificial. Fuente: Investigador 2012

4.3. Fase 3. Evaluación de la acción depurante en el sistema humedal artificial

La evaluación física, química y microbiológica fue realizada por investigadores auxiliares del grupo CEPARIUM de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. La toma de muestras y procesamiento de aguas de riego se basó en el protocolo presentado para la toma de muestras de agua de CORANTIOQUIA según Resolución 435 de 01 de agosto de 2001. El tipo de muestra fue compuesta y se utilizó el método de muestreo manual.

La evaluación se realizó en seis momentos diferentes, la primera en el momento de instalar las macrófitas y una vez cada semana hasta completar los seis tiempos. La muestra CERO corresponde al agua de riego en su forma original que sale del punto de origen, con el cual realizan el riego en la finca en estudio. En cada momento de la evaluación se hace un muestreo del agua antes de entrar al sistema con macrófitas y después de pasar por el sistema “humedal artificial”. En cada caso se realizó la evaluación física, química y microbiológica.

4.3.1 Procedimiento para la Toma de muestra

La toma de la muestra se realizó en botellas limpias transparentes y correctamente rotuladas, por tratarse de un sistema delimitado de agua, la muestra fue tomada del borde del humedal conservando una distancia prudente entre la orilla y la boca del contenedor (0,2 m).

Los frascos contenedores fueron abiertos en el momento en que se iba a tomar la muestra, introducidos en el sistema de agua con la boca del frasco hacia abajo y girándolo suavemente para que el agua entrara por capilaridad.

Una vez cerrados los frascos fueron transportados al laboratorio en un tiempo no mayor a 2 horas para su análisis y mantenidos en refrigeración.

4.3.2 Evaluación física y química

La evaluación física se realizó por observación de la muestra en el momento del muestreo. Se evaluó color, olor y aspecto.

La evaluación física se llevo a cabo a través de la tabla de olor y color propuesta por The water treatment solutions. 2010.

La evaluación química se realizó con el equipo marca OAKTON serie 417584 para medir pH, conductividad y otros parámetros en agua. Cada una de las muestras fue evaluada por triplicado.

La evaluación microbiológica se realizó en tres etapas para cada muestra por triplicado así:
La observación de microorganismos en fresco de parásitos y nemátodos se hizo por la técnica lámina laminilla así: una fracción de la muestra fue analizada trasladando 10 ml de agua en tubos de ensayos estériles y centrifugados a 1000 r.p.m. por 5 minutos. Finalizado el proceso de centrifugación, se descartó el sobrenadante, se resuspendió el pellet, se colocó en láminas portaobjetos (de 4 a 10 láminas) y cubrió con laminilla cubre objeto, finalmente se hizo la observación en aumento de 10X y 40 X en un total de 100 campos.

El análisis microbiológico de bacterias se hizo combinando técnicas de concentración de microorganismos y técnicas de identificación de acuerdo con las recomendaciones de American Public Health Association's en los protocolos de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*: la técnica del número más probable NMP para recuento de coliformes, utilizando pruebas presuntivas y confirmatorias y la técnica de filtración de membrana FM la cual permitió la concentración y recuento de colonias de microorganismos.

4.3.3 Protocolo para técnica de NMP

Diluir 10 ml de la muestra de agua en el frasco con 90 ml de agua peptonada al 0.1%

Tomar 1 ml del agua diluida y colocarlo en el primer tubo de agua peptonada al 1%.

Realizar el montaje de los otros siete tubos haciendo diluciones en base 10

Incubar a 37°C por 24 horas

Tomar 1 ml del agua diluida y colocarlo en el caldo Bilis Verde Brillante al 2%

Incubar a 45°C por 24 horas

Revisar los tubos incubados a las dos temperaturas y sembrar de los tubos que tuvieron crecimiento en agar ENDO y agar EMB para coliformes. En el caso del caldo lactosado la lectura será por turbidez, en el caldo lactosa Bilis Verde Brillante se realizará por turbidez y presencia de gas en el tubo de Durham.

Esperar 24 horas para confirmar crecimiento e identificar por características macroscópicas (brillo metálico) y cambios en el medio (procesos metabólicos) las diferentes UFC que crecieron en los medios de cultivo.

4.3.4 Protocolo para técnica de Filtración de Membrana FM

Realizar el procedimiento de acuerdo con el Manual de Instrucciones del equipo de filtración de membrana

Filtrar a vacío la muestra de agua (100 mL) sobre una membrana filtrante estéril depositada con la cuadrícula hacia arriba.

Retirar la membrana y depositar con pinzas estériles sobre una placa Petri con medio Endo para coliformes, Schaufus-Pottinger para levaduras y mohos; este medio viene deshidratado y es necesario añadirle agua (2,2 ml).

Incubar a 37 °C por 48 horas para coliformes y 28°C por 5 días para hongos y levaduras.

Realizar un recuento de las colonias que crecieron, expresándose el resultado en U.F.C. en 100 mL a las 48 horas.

4.3.5 Protocolo para Hongos

El análisis microbiológico de hongos se hizo de acuerdo con las recomendaciones de American Public Health Association's en el protocolo de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* con la técnica de filtración de membrana FM para la concentración y recuento de hongos filamentosos y levaduras.

4.4.4 Protocolo para Algas

El recuento de algas se realizó de acuerdo con el protocolo de Pérez Elifonso conteo de algas usando cámara de Neubauer, el protocolo consistió en el seguimiento de los siguientes pasos:

Colocar el cubreobjeto bien limpio sobre los pilares de soporte de la cámara.

Tomar con una pipeta Pasteur la muestra de agua que contiene algas, en ángulo de 45 grados y depositar una gota en cada ranura de la cámara Neubauer para llenar el espacio.

Esperar tres minutos antes de proceder al conteo en el microscopio, para dejar que las unidades algales se asienten debidamente. Use objetivos de 20X o 40X según como le sea más claro y cómodo para proceder.

Mantener un orden en la secuencia del contaje para evitar errores de suma. No considerar las células que están asentadas justo en medio de cualquier línea de los cuadros, sean de las internas o de los laterales, aunque este criterio no se aplica cuando apenas es un 25% del cuerpo de la célula el que esté tocando la línea.

4.3.6 Evaluación de Metales pesados

El análisis de metales pesados en el agua de riego se realizó con el método establecido en el Standard Methods for examination of water and wastewater 21 St Edition bajo la técnica de absorción atómica (2005). El desarrollo del análisis se dio en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia. Los elementos químicos analizados fueron Pb, Cd, As y Hg. Se utilizó un envase de plástico nuevo, limpio con capacidad de 500 ml.

Se rotuló cada recipiente, se realizó el etiquetado de las muestras donde se describió el número de la muestra, fecha, hora, lugar, nombre del colector, procedencia y tipo de análisis. Se evitó tomar el agua con espuma superficial, igualmente se impidió la toma de la muestra de las áreas de turbulencia excesiva.

La toma de la muestra fue colectada sumergiendo el recipiente debajo de la superficie del agua unos 15 cm a 0,20 cm. En el momento de la toma de muestra, el envase se enjuagó uno a dos veces con el agua a analizar. En el momento de llenar el recipiente se dejó una cámara de 0,5 cm con el propósito de dejar una cámara de aire.

Se evitó la excesiva manipulación de las muestras para reducir los riesgos de deterioro o contaminación. Inmediatamente después de tomada la muestra, se tapó herméticamente cada recipiente y se conservó en una nevera a 4°C, se evitó el uso de hielo seco o de aditivos al hielo para evitar que la muestra se congelara.

4.3.7 Evaluación Biológica de las macrófitas

La evaluación biológica de las macrófitas se basó en el protocolo presentado por Nichols, A (2000) en el trabajo “*Aquatic Macrophyte Community Index*” (AMCI), se utilizaron para todas las especies los parámetros de cobertura < 5 %; 5-50 %; y > 50 %.

Para *Eichornia crassipes* se realizó un seguimiento en su crecimiento a nivel de longitud del tallo, grosor del tallo, longitud de la raíz, longitud de hoja, longitud del rizoma y ancho del peciolo; al mismo tiempo se tomó registro del peso húmedo y ausencia o presencia de clorosis, necrosis y floración.

Para la especie *Scirpus spp* igualmente se realizó un seguimiento en su crecimiento a nivel de longitud del tallo, grosor del tallo, longitud de la raíz, longitud de hoja, longitud del rizoma y ancho del peciolo; al mismo tiempo se hizo registro del peso húmedo y ausencia o presencia de clorosis, necrosis y floración.

En cuanto a la especie *Lemna spp* se llevó registro de cobertura debido a su tipo de crecimiento y ausencia o presencia de clorosis, necrosis y floración.

Para determinar la cobertura se utiliza una cuadrícula con cañamo sobre el estanque donde cada cuadro fue tomado con una medida de 0,5 m por 0,5 m, como aparece en la figura 4.



Figura 4. Cuadrícula de cobertura en el estanque de macrófitas. A: *Eichhornia crassipes* B: *Scirpus spp* C. *Lemna spp*

La toma de datos se realizó cada 3 días por un periodo de 18 días, tiempo estimado para el proceso de fitodepuración. Los datos fueron registrados en una hoja de campo. Ver anexo. 2.

4.4 Fase 4. Validación del agua de riego depurada

4.4.1 Protocolo para el cultivo de Espinaca (*Spinacia oleracea*)

Se prepararon la zonas de cultivo (Transectos) cada una de 20 m² y un total de 200 plántulas de *Spinacia oleracea* (la marca comprada por el cultivador es Seminis. Semillas Arroyave, Sopó, Cundinamarca), para las plantas regadas con agua sin tratamiento se mantuvieron las mismas condiciones (Suelo, luz, temperatura, pH y humedad) que para las plantas regadas con agua proveniente del “sistema humedal”. Durante el estudio se tuvo cuidado de que no se fumigaran estos dos transectos con agroquímicos que pudiese alterar los resultados.

Los transectos se ubican hacia el centro del cultivo para asegurar un riego más uniforme, y el muestreo se toma de los individuos de la zona central, para disminuir el efecto borde. Los muestreos se realizaron cada 3 días tomando cinco plantas por muestreo. Este tipo de muestreo se realizó siguiendo el protocolo de la Facultad de Agronomía de Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Carranza, Carlos (2009), en cultivos de lechuga con suelos salinos. Los datos fueron registrados en una base de datos de campo. Ver anexo 3.

Los parámetros de análisis de las plantas en cada muestreo fueron área foliar, altura de la planta, longitud de la raíz, masa fresca total y presencia o ausencia de necrosis y clorosis. El área vegetal se determinó mediante mediciones de hoja, raíz y tallo, además, se registraron datos de peso seco mediante secado en horno a 60°C durante 72 h.

4.4.2 Análisis de datos

Se realizó con los datos obtenidos en la tercera y cuarta fase utilizando el programa SPSS y Excel 2010 Microsoft office.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Fase 1. Selección del agua de Riego

Una vez obtenidos los resultados de la calidad del agua de riego en las 22 fincas (Ver anexo 4), se estableció contacto directo con sus dueños o administradores, se les hizo entrega de los resultados y se les propuso la construcción del sistema “humedal artificial” para depurar el agua de riego. Solo dos agricultores se mostraron interesados y uno de ellos, el dueño de la finca Redoma, en la Provincia Colombiana de Sabana Centro en el Municipio de Chía Cundinamarca, vereda La Balsa, dio el consentimiento de la construcción del humedal artificial. En la figura 5 se presenta la ubicación geográfica y en la figura 6, se muestra una foto de Google Earth con la ubicación de la finca con relación a la cuenca del río Bogotá.

Los criterios de inclusión para el montaje del humedal artificial definidos una vez se tuvieron los resultados, fueron: mala o pésima calidad de agua de riego, disponibilidad de terreno para hacer el ensayo, cultivo de corto plazo o corta duración.

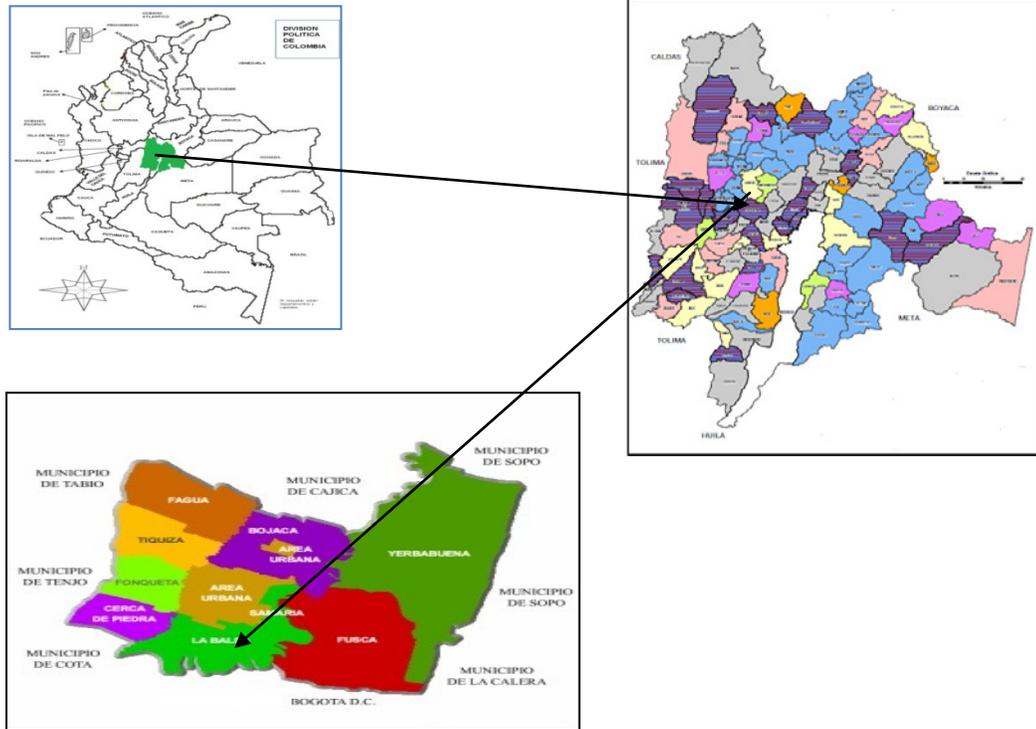


Figura 5. Ubicación geográfica del área de estudio. Fuente: www.igac.gov.co. 2012

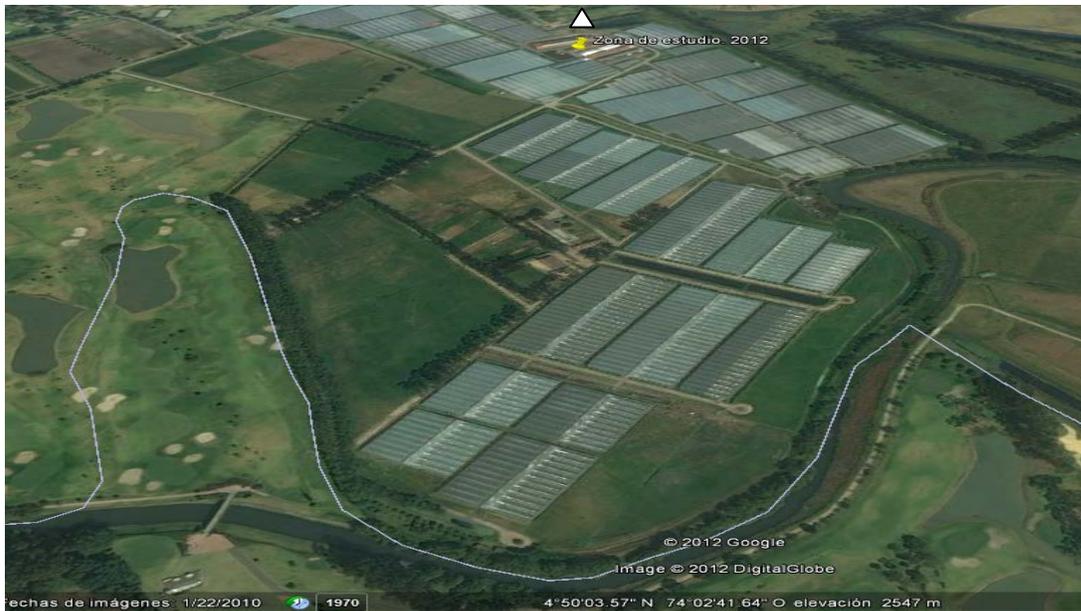


Figura 6. Ubicación de la finca con relación a la cuenca del río Bogotá. Fuente: Google Earth 2012.

El agua de riego de esta finca, de acuerdo con lo expresado por el agricultor, proviene de un pozo profundo de aproximadamente 80 m de profundidad, su extracción se hace por bombeo. Ver figura 7. Luego de este paso se lleva a un tanque de 15 m³ donde se evidencia un aspecto muy turbio y una apariencia oleaginosa, color café y con olor pútrido. Ver figura 8, estas características ponen en evidencia que la elección del agua de riego fue adecuada para el desarrollo de la investigación.



Figura.7. Bomba de agua utilizada en el proceso. Fuente: Investigador 2012.



Figura 8. Tanque de reserva. Fuente: Investigador 2012.

5.2 Fase 2. Construcción del sistema: humedal artificial

La finca Redoma tiene 8 Hectáreas y el cultivo principal es espinaca. Al lado sur oeste de la finca había un espacio aproximadamente de 100 mts² ver figura 9, que se consideró apropiado por sus características para la construcción del sistema.



Figura 9. Espacio seleccionado para la construcción del humedal. Fuente: Investigador 2012.

Se realizó la limpieza de la zona de trabajo, deshierbe con guadaña, se emparejó el terreno y se retiraron rocas y elementos que pudiesen interferir con el sistema. Ver figura 10.



Figura 10. Limpieza previa de la zona de trabajo. Fuente: Investigador 2012.

5.2.1 Componente físico del humedal artificial: Tanque de filtración

La construcción del filtro se realizó de acuerdo con lo descrito en la metodología. A continuación se presentan evidencias gráficas del proceso de construcción y del tanque de filtración ya finalizado y con las conexiones de agua, adecuadas para su uso. Ver figura 11.

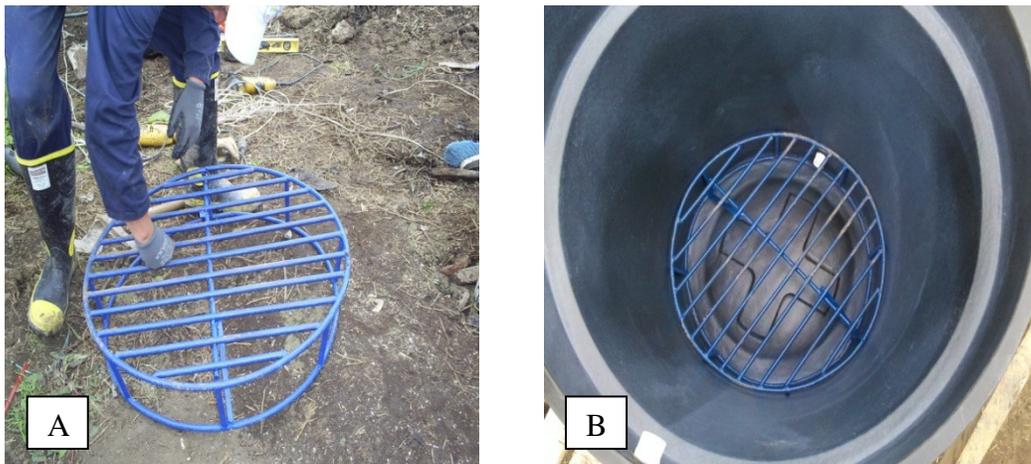


Figura 11. Instalación de falso fondo. Fuente: Investigador 2012.

La figura 11 (A). Muestra la reja del falso fondo, la figura (B) muestra el falso fondo instalado en el tanque de filtración. La figura 12 muestra las mallas utilizadas y su disposición en el tanque de filtración. Se muestra la malla externa de filtración (A), malla de separación de antracita y arena (B) y malla de soporte para grava (C).

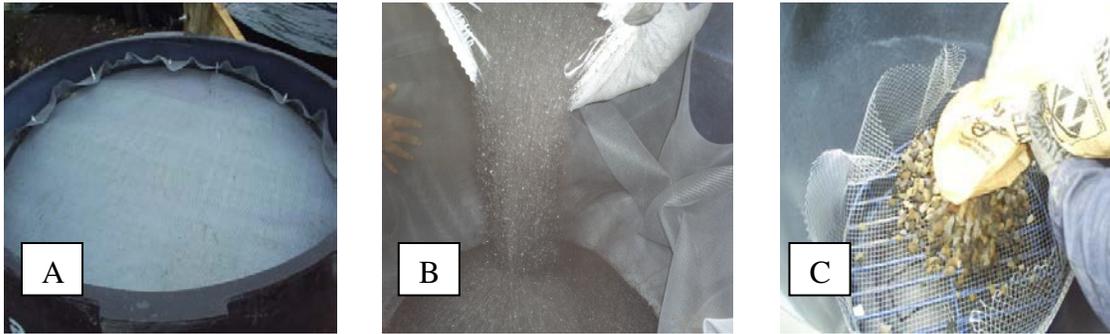


Figura 12. Mallas utilizadas en el tanque de filtración. Fuente: Investigador 2012.

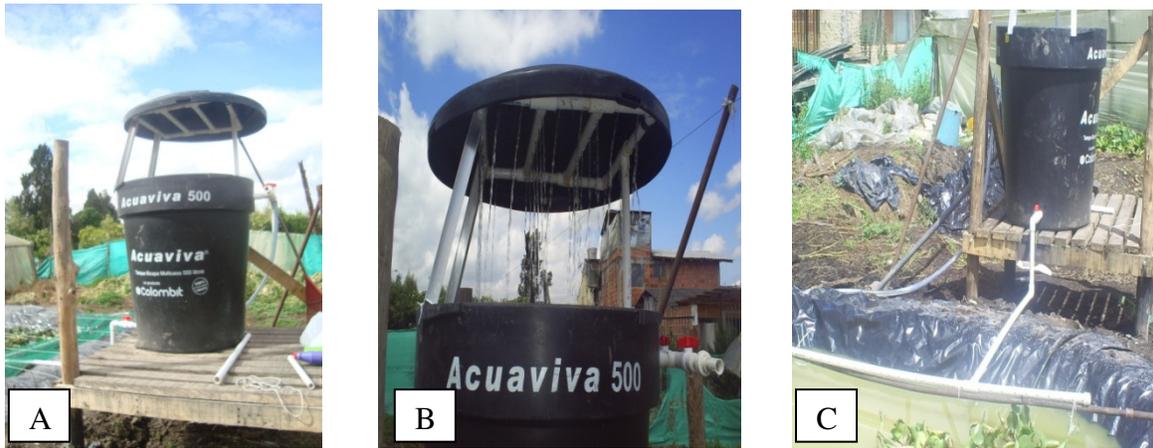


Figura 13. Vista general del tanque de filtración (A). Caída de agua (B). Salida del sistema físico (C). Fuente: Investigador 2012.

Una vez construido el sistema físico, se llevó el agua desde el tanque del agricultor al sistema por una bomba Fema. Ref. FEM191090 a través de una manguera hasta el subsistema físico de filtración en donde con un acople universal se conectó a una primer válvula lisa de bola que se acopló con un conector T por donde entra el agua de riego al sistema físico de filtración (3). Para facilitar la comprensión del movimiento del agua se

presenta a continuación una figura realizada por el investigador en donde se observa todo el movimiento del agua en todos los subsistemas. Ver figura 14.

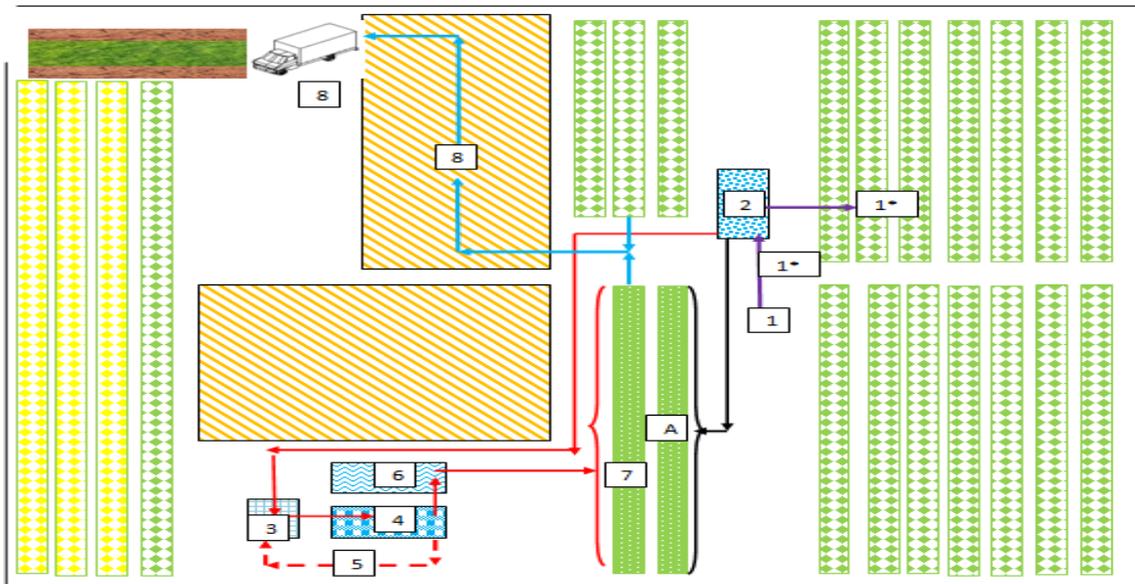


Figura 14. Movimiento del agua de riego desde su origen hacia los subsistemas. Ubicación del pozo subterráneo (1). Paso del agua al tanque de reserva y regado al cultivo con agua sin tratar (1*). Tanque de reserva (2). Subsistema tanque de filtración (3). Subsistema Humedal artificial (4). Recirculado del agua, Subsistema Humedal artificial-). Subsistema tanque de filtración (5). Pozo de reserva de agua tratada (6). Paso del agua tratada al cultivo experimental de espinaca (7). Lavado posterior y zona de transporte (8). Fuente: Investigador 2012

El tanque que se utilizó como medio físico de filtración no generó ningún tipo de partícula debido a sus superficies lisas fáciles de limpiar y de movimiento del fluido, la malla tipo PEA y las rocas ubicadas en el filtro permitieron un tamizado mecánico que captó materiales superiores a 7 pulgadas (arenas gruesas, arenas finas, limos, materia orgánica en suspensión y organismos vivos superiores entre otros). La segunda y tercer

malla fueron las encargadas de mantener el sistema en su respectiva posición y evitar el desplazamiento del material mineral con posibles mezclas.

El falso fondo de 0.3m de altura, fue el encargado de recoger el agua del proceso uniformemente, además de soportar el peso del material superior y permitir una salida facilitada del fluido, esta forma de operación favoreció la oxigenación en el interior del lecho filtrante.

El tiempo de retención hidráulica del agua en el sistema físico de filtración fue de 30 m/h, esta detención se ajustó a lo propuesto para aguas de riego agrícola en el manual técnico de filtración REGABER de la Universidad de Barcelona, 2002. En el paso del agua por los poros del manto de los diferentes lechos participó de manera activa la granulometría y las densidades diferentes. Las capas de mineral se dispusieron de mayor a menor granulometría y de menor a mayor densidad, es decir, el mineral de mayor densidad y menor granulometría se dejó en el fondo del filtro, y el mineral de menor densidad y mayor granulometría se dejó arriba. El objetivo de esta disposición de minerales fue que las partículas a retener de gran tamaño se quedaran en la capa filtrante superior y las de menor tamaño pasaran hasta la siguiente capa de filtración donde quedaron retenidas, además de que se generó un cambio continuo de dirección en el agua favoreciendo el contacto de las impurezas con los granos del medio, es decir se producen acciones distintas como son el transporte, la adherencia o adsorción. La diferencia de densidades fue necesaria para que en el retrolavado el mineral de gran tamaño y baja densidad se mantuvieran en la capa superior, y el mineral de pequeño y alta densidad conservara su posición en la parte inferior del filtro.

El efecto del lecho de grava fue generar una filtración mecánica que no permitiera el paso de partículas de cualquier naturaleza mayores que los espacios que dejan entre si las partículas del componente, además de reducir la velocidad del agua y de ayudar a la distribución uniforme del fluido en el sistema físico.

Por su parte, la arena fue fundamental, debido a que formó una película biológica en su parte superior y cuando el agua pasó, las partículas quedaron atrapadas en la superficie formando una capa biológica o “schmutzdecke - manta de suciedad”, una vez establecida esta capa biológica actuó como barrera física al capturar las partículas, también destruyó activamente contaminantes y microorganismos como protozoos y helmintos. (Doerr, B & Lehmkuhl, N, 2010).

Todo el sistema físico transformó las impurezas y la reducción de oxígeno durante la filtración física se compensó incorporando una salida de agua con una caída al sistema físico de 0,6m y un caudal aproximado de 142 litros por minuto siendo constante la entrada de agua como de salida.

5.2.2 Componente biológico del Humedal Artificial

Se construyeron los dos estanques de acuerdo con las especificaciones planteadas en la metodología. La selección y recolección de las macrófitas se hizo de acuerdo con la metodología. A continuación se muestra gráficamente, la construcción de los estanques, la selección, recolección e implantación de las macrófitas. Ver figura 15.

Construcción de los estanques



La figura 15. Muestra la excavación realizada para la construcción de los estanques (A). Estanque con un recubrimiento de arena (B). Fuente: Investigador 2012.



Figura 16. Construcción de los estanques del humedal artificial. Impermeabilización posterior del recubrimiento con arena (C). Estanques con plástico de alta densidad (D). Fuente: Investigador 2012.

5.2.3 Selección y recolección de las macrófitas en el sistema

Las macrófitas fueron seleccionadas y procesadas de acuerdo a lo planteado en la metodología. Ver figura 17



Figura 17. Selección de la zona de colecta de macrófitas acuáticas (A). Colecta de macrófitas acuáticas. (B). Fuente: Investigador 2012.



Figura 18. Desinfección de macrófitas posterior a su colecta. *Eichornnia crassipes* (A). Desinfección de macrófitas posterior a su colecta. *Scirpus spp* (B). Fuente: Investigador 2012.

5.2.4 Implantación de Macrófitas acuáticas

El subsistema “humedal artificial”, luego de un proceso de desinfección las macrófitas *Eichornnia crassipes* y *Lemna minor* ingresaron al primer sistema de manera flotante y *Scirpus lacustris* fue anclada a la reja adecuada para mencionada función. Las macrófitas se fueron acoplando, algunas murieron y fueron sacadas del sistema. Los resultados de la evaluación de su desarrollo y crecimiento son descritos más adelante. Ver figura 19.

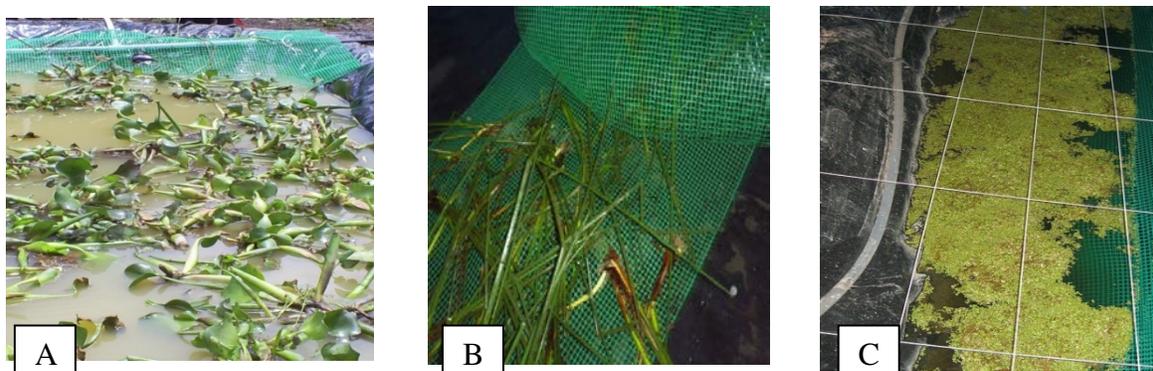


Figura 19. Implantación de las macrófitas: distribución en el subsistema “humedal artificial”.

Eichornnia crassipes (A). *Scirpus spp* (B). *Lemna spp* (C). Fuente: Investigador 2012.

5.3 Fase 3. Evaluación de la acción depurante en el sistema humedal artificial

5.3.1 Evaluación física

A continuación se presentan los datos obtenidos para la evaluación física del agua en cada uno de los momentos de muestreo:

Tabla. 3 Evaluación física del agua en cada muestreo durante el estudio.

ANALISIS	MUESTRA CERO PARA LA MUESTRA 1 - AGUA TOMADA DIRECTAMENTE DEL POZO ANTES DE INICIAR EL PROCESO			MUESTRA UNO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FISICO			MUESTRA UNO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLOGICO		
	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3
OLOR	FETIDO	FETIDO	FETIDO	ALMIZCLADO	ALMIZCLADO	ALMIZCLADO	ALMIZCLADO	ALMIZCLADO	ALMIZCLADO
COLOR	CAFÉ	CAFÉ	CAFÉ	CAFÉ	CAFÉ	CAFÉ	CAFÉ	CAFÉ	CAFÉ
TURBIDEZ	MUY TURBIO	MUY TURBIO	MUY TURBIO	TURBIO	TURBIO	TURBIO	TURBIO	TURBIO	TURBIO

OLORSG	SG O NORMAL	FETIDO	FETIDO	ALMIZCLADO	ALMIZCLADO	ALMIZCLADO	ALMIZCLADO	ALMIZCLADO	ALMIZCLADO
ESCALA DE TURBIDEZ	TRASLUCIDO	LIGERAMENTE TURBIO	TURBIO	MUY TURBIO	TURBIO	TURBIO	TURBIO	TURBIO	TURBIO
COLOR	AZUL PALIDO	HABANO	CAFÉ	AMARILLO OPACO					

ANALISIS	MUESTRA DOS - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FISICO			MUESTRA DOS - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLOGICO			MUESTRA TRES - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FISICO		
	REPETICION N 1	REPETICION N 2	REPETICION N 3	REPETICION N 1	REPETICION N 2	REPETICION N 3	REPETICION N 1	REPETICION N 2	REPETICION N 3
OLOR	ALCANFORADO	ALCANFORADO	ALCANFORADO	ALCANFORADO	ALCANFORADO	ALCANFORADO	ALCANFORADO	ALCANFORADO	ALCANFORADO
COLOR	CAQUI	CAQUI	CAQUI	CAQUI	CAQUI	CAQUI	CAQUI	CAQUI	CAQUI
TURBIDEZ	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO

OLORSG	ALCANFORADO	ALCANFORADO	ALCANFORADO	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO
ESCALA DE TURBIDEZ	POCO TURBIO								
COLOR	CAQUI	TRIGO	TRIGO						

ANALISIS	MUESTRA TRES - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLOGICO			MUESTRA CUATRO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FISICO			MUESTRA CUATRO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLOGICO		
	REPETICION N 1	REPETICION N 2	REPETICION N 3	REPETICION N 1	REPETICION N 2	REPETICION N 3	REPETICION N 1	REPETICION N 2	REPETICION N 3
OLOR	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO	ETÉREO
COLOR	TRIGO	TRIGO	TRIGO	TRIGO	TRIGO	TRIGO	TRIGO	TRIGO	TRIGO
TURBIDEZ	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO	POCO TURBIO

OLORSG	INOLORO								
ESCALA DE TURBIDEZ	LIGERAMENTE TURBIO								
COLOR	TRANSLUCIDO								

ANALISIS	MUESTRA CINCO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FISICO			MUESTRA CINCO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLOGICO		
	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3
OLOR	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO
COLOR	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO
TURBIDEZ	LIGERAMENTE TURBIO	LIGERAMENTE TURBIO	LIGERAMENTE TURBIO	LIGERAMENTE TURBIO	LIGERAMENTE TURBIO	LIGERAMENTE TURBIO

OLOR SG	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO
ESCALA DE TURBIDEZ	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE
COLOR	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO

ANALISIS	MUESTRA SEIS - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FISICO			MUESTRA SEIS - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLOGICO		
	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3
OLOR	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO
COLOR	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO
TURBIDEZ	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE

OLOR SG	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO	INOLORO
ESCALA DE TURBIDEZ	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE	TRANSPARENTE
COLOR	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO	TRANSLUCIDO

Fuente: Investigador.2012.

Los resultados permiten inferir que el procedimiento que realiza el subsistema de filtración y el subsistema biológico, disminuyen la turbidez parámetro soportado por los resultados de TDS, igualmente permitió mejorar el color y olor que tiene antes de entrar al sistema. Estos resultados se ajustan a lo presentado por Otálora, Alejandra (2011) en su trabajo de evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de caño Gandúl.

5.3.2 Evaluación química

A continuación se presentan los resultados en la tabla 4, se obtuvieron resultados para un total de seis muestreos con seis repeticiones cada uno durante un tiempo de 18 día

Tabla. 4. Resultados Químicos y microbiológicos del agua tratada por el subsistema biológico.

ANALISIS	MUESTRA CERO PARA LA MUESTRA 1 - AGUA TOMADA DIRECTAMENTE DEL POZO ANTES DE INICIAR EL PROCESO			MUESTRA UNO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FISICO			MUESTRA UNO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO		
	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3
pH	8,88	8,86	8,72	7,24	7,3	7,28	5,73	5,72	5,7
Conductividad	493 μs	496 μs	496 μs	379 μs	379μs	378μs	134μs	130μs	126μs
TDS	257 ppm	232 ppm	255 ppm	243 ppm	238 ppm	243 ppm	195 ppm	195 ppm	195 ppm
Temperatura	16,7°C	16,6°C	16,6°C	16,1°C	16,1°C	16,1°C	17,8°C	17,8°C	17,2°C
Recuento microbiano por filtración de membrana - medio de cultivo endo	mayor a 200 UFC	mayor a 200 UFC	mayor a 200 UFC	mayor a 200 UFC	mayor a 200 UFC	mayor a 200 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC
prueba presuntiva recuento de coliformes-técnica nmp	>2400 NMP por 100 ml	>2400 NMP por 100 ml	>2400 NMP por 100 ml	1200 NMP por 100 ml	1200 NMP por 100 ml	1200 NMP por 100 ml	9 NMP por 100 ml	10 NMP por 100 ml	10 NMP por 100 ml
Recuento coliformes totales - técnica nmp	>2400 NMP por 100 ml	>2400 NMP por 100 ml	>2400 NMP por 100 ml	1200 NMP por 100 ml	1200 NMP por 100 ml	1200 NMP por 100 ml	1000 U.FC por ml	1000 U.FC por ml	1000 U.FC por ml
Recuento de coliformes fecales - técnica nmp	>2400 NMP por 100 ml	>2400 NMP por 100 ml	>2400 NMP por 100 ml	1200 NMP por 100 ml	1200 NMP por 100 ml	1200 NMP por 100 ml	1000 U.FC por ml	1000 U.FC por ml	1000 U.FC por ml
Presencia y recuento de hongos	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	< 10 UFC/ml	< 10 UFC/ml	< 10 UFC/ml
Presencia y recuento de actinomicetos	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml
Presencia y recuento de algas	200 x ml	200 x ml	200 x ml	150 xml	150 x ml	150 x ml	2450 X ML	2450 X ML	2450 X ML
Presencia y recuento de nemátodos (huevos y adultos)	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA
ANALISIS	MUESTRA DOS - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FISICO			MUESTRA DOS - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO			MUESTRA TRES - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FISICO		
	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION N 1	REPETICION N 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION N 2	REPETICION 3
pH	8,01	7,82	8,1	8,01	8,01	8,1	6,62	6,62	6,75
Conductividad	370μs	377μs	372μs	296μs	312μs	308μs	308μs	297μs	299μs
TDS	193 ppm	190 ppm	195 ppm	132 ppm	132 ppm	144 ppm	162ppm	174ppm	161ppm
Temperatura	17,5°C	17,5°C	17,5°C	17,9°C	17,9°C	17,9°C	16,2°C	16,2°C	16,3°C
Recuento microbiano por filtración de membrana - medio de cultivo endo	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC
prueba presuntiva recuento de coliformes-técnica nmp	> a 100UFC X ml	> a 100UFC X ml	> a 100UFC X ml	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	4 NMP por 100 ml	4 NMP por 100 ml	4 NMP por 100 ml
Recuento coliformes totales - técnica nmp	< a 100 UFC X ml	< a 100 UFC X ml	< a 100 UFC X ml	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	700 U.FC por ml	700 U.FC por ml	700 U.FC por ml

Recuento de coliformes fecales - técnica nmp	< a 100 UFC X ml	< a 100 UFC X ml	< a 100 UFC X ml	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	700 U.FC por ml	700 U.FC por ml	700 U.FC por ml			
Presencia y recuento de hongos	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	< 10 UFC/ml	< 10 UFC/ml	< 10 UFC/ml			
Presencia y recuento de actinomicetos	190 UFC/ml	190 UFC/ml	190 UFC/ml	190 UFC/ml	190 UFC/ml	190 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml			
Presencia y recuento de algas	280 x ml	280 x ml	280 x ml	280 x ml	280 x ml	280 x ml	150 x ml	150 x ml	150 x ml			
Presencia y recuento de nemátodos (huevos y adultos)	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA			
ANALISIS	MUESTRA TRES - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO			MUESTRA CUATRO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FÍSICO			MUESTRA CUATRO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO					
	REPETI 1	REPETICION N 2	REPETICION 3	REPETICION N 1	REPETICION N 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION N 2	REPETICION 3			
pH	5,73	5,84	5,52	8,01	7,9	7,98	8,01	7,88	7,82			
Conductividad	134µs	143µs	142µs	370µs	352µs	370µs	296µs	296µs	296µs			
TDS	138ppm	142ppm	139 ppm	188 ppm	192 ppm	198 ppm	132 ppm	132 ppm	132 ppm			
Temperatura	17,8°C	17,2°C	17,3°C	17,5°C	17,5°C	17,5°C	17,9°C	17,9°C	17,9°C			
Recuento microbiano por filtración de membrana - medio de cultivo endo	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC			
prueba presuntiva recuento de coliformes-técnica nmp	4 NMP por 100 ml	4 NMP por 100 ml	4 NMP por 100 ml	> a 100UFC X ml	> a 100UFC X ml	> a 100UFC X ml	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC			
Recuento coliformes totales - técnica nmp	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC			
Recuento de coliformes fecales - técnica nmp	400 U.FC por ml	400 U.FC por ml	400 U.FC por ml	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC			
Presencia y recuento de hongos	< 10 UFC/ml	< 10 UFC/ml	< 10 UFC/ml	190 UFC/ ml	190 UFC/ ml	190 UFC/ ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml			
Presencia y recuento de actinomicetos	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml			
Presencia y recuento de algas	1350 x ml	1350 x ml	1350 x ml	380 x ml	380 x ml	380 x ml	750 x ml	750 x ml	750 x ml			
Presencia y recuento de nemátodos (huevos y adultos)	< 3 en 400 ml	< 3 en 400 ml	< 3 en 400 ml	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA	NEGATIVA			
ANALISIS	MUESTRA CINCO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FÍSICO			MUESTRA CINCO - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO			MUESTRA SEIS - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO FÍSICO			MUESTRA SEIS - AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO		
	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3
pH	7,72	7,72	7,72	7,24	7,24	7,24	6,62	6,88	7,02	6,71	6,71	6,82
Conductividad	392µs	392µs	392µs	347	347	347	348µs	348µs	348µs	278µs	270µs	270µs
TDS	142 ppm	142 ppm	142 ppm	142 ppm	142 ppm	142 ppm	181ppm	181ppm	181ppm	142ppm	142ppm	138 ppm
Temperatura	17,0°C	17,0°C	17,0°C	16,2°C	16,2°C	16,2°C	19,20°C	19,20°C	19,20°C	18,9°C	18,9°C	18,9°C

Recuento microbiológico por filtración de membrana - medio de cultivo endo	menor a 100 UFC											
prueba presuntiva recuento de coliformes - técnica nmp	menor a 100 UFC											
Recuento de coliformes totales - técnica nmp	320 UFC/ml	320 UFC/ml	320 UFC/ml	160 UFC/ml	160 UFC/ml	160 UFC/ml	15 UFC/ml	15 UFC/ml	15 UFC/ml	9 UFC/ml	9 UFC/ml	9 UFC/ml
Recuento de coliformes fecales - técnica nmp	50 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml					
Presencia y recuento de hongos	10 UFC/ML	10 UFC/ML	10 UFC/ML	30 UFC/ml	30 UFC/ml	30 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml	0 UFC/ml
Presencia y recuento de actinomicetos	0 UFC/ml											
Presencia y recuento de algas	300 X ML	300 X ML	300 X ML	900 X ML	900 X ML	900 X ML	324 X ML	324 X ML	324 X ML	1250 X ML	1250 X ML	1250 X ML
Presencia y recuento de nemátodos (huevos y adultos)	NEGATIVO A											

Fuente: Investigador 2012.

En términos generales se puede observar que es evidente el cambio en los resultados obtenidos antes de pasar por el subsistema biológico y después de sufrir la fitodepuración. A continuación se presentan en forma individual los resultados de la evaluación química en todos los momentos de los muestreos para apreciar los cambios correspondientes. Posteriormente a cada gráfica se hace el análisis correspondiente.

5.3.3 pH

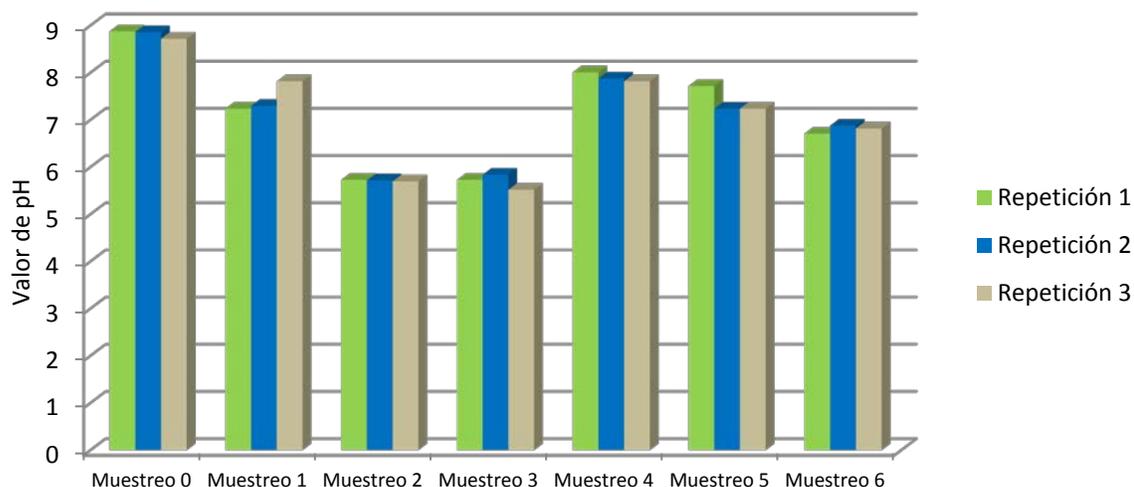


Figura 20. Variación del pH durante el estudio. Fuente: Investigador 2012.

ANOVA pH

H_0 : No se encuentra diferencia significativa entre el valor de pH antes y después del tratamiento físico y/o biológico depurante.

H_a : Existe diferencia significativa entre el valor de pH antes y después del tratamiento físico y/o biológico depurante.

X: 0.05.

Tabla 5. Resultados muestrales para el pH durante el estudio.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	16,764	2	8,382	15,558	,000
Within Groups	21,012	39	,539		
Total	37,775	41			

Fuente: Investigador 2012.

Decisión: Se rechaza H_0

Conclusión: Los datos muestran de que existe diferencia significativa ($0,00 < 0,05$) en cuanto la variación de pH luego del tratamiento depurante. Se observa una reducción.

Tabla 6. Prueba t para muestras Independientes. pH

Tratamiento	Valor t	Sig. (2-tailed)	Resultado
Físico vs Biológico	1,969	0,059	0,059>0,05
Físico vs sin tratamiento	-10,71	0,000	0,000<0,05
Biológico vs sin tratamiento	-8,366	0,000	0,000<0,05

Fuente: Investigador 2012.

Conclusión: Los datos de la tabla 6, muestran de que no existe diferencia entre el tratamiento físico y biológico, los dos reducen el valor de pH, de igual manera se muestra que existe diferencia significativa ($0,00 < 0,05$) en cuanto la variación de pH al comparar el tratamiento físico con el biológico.

Como se puede apreciar en la figura 20, el pH varió de 8,82 en el agua sin tratamiento a 7,87, este resultado se ve reflejado en el rango de tolerancia de las tres macrófitas *Eichornnia crassipes* 5,0 a 8,5, *Lemna spp* y *Scirpus spp* que poseen un intervalo de 5 a 9 para tener un crecimiento adecuado, pero el mejor desarrollo lo obtienen en el intervalo de 6,5 a 8,0. Las plantas presentaron al inicio del proceso decaimiento y poco crecimiento, posteriormente, se observó un mejor crecimiento y desarrollo como se demuestra más adelante. Este cambio puede tener efectos benéficos para la biota acuática y para los cultivos, básicamente puede explicarse por efecto de la fotosíntesis dentro de la columna de agua, que remueve CO_2 y altera el equilibrio buffer ácido carbónico – carbonatos, elevando el pH o reduciéndolo probablemente como consecuencia de la mayor actividad heterótrofa en dicha parte. (Angelier, E, 2002).

La presencia de la vegetación afecta los parámetros físico-químicos del humedal debido a que la mayor materia orgánica en la zona sin cosechar supone una mayor actividad

respiradora, lo que produce un menor pH y mayor consumo de oxígeno. Brix, G (1994). El pH se redujo con tendencia a la neutralidad lo que representa beneficios para los cultivos debido a que el agua tratada en el biosistema se utiliza como riego agrícola y el valor obtenido se ajusta al límite permitido de acuerdo a la Norma Oficial Colombiana NOM.CCA031-ECOL-1993.

Con relación a la microbiota, el pH tiene una gran importancia pues por una parte, los cambios pueden ser, o una expresión de la presencia de microorganismos y de sus procesos metabólicos, o un factor que interviene en su crecimiento, pues, en el caso de las bacterias, ellas crecen mejor a un pH neutro o alcalino, pero su actividad metabólica que da como resultado ácidos orgánicos, puede disminuir el pH del medio. (Marin, Galvin, 2006).

Por otra parte, a medida que disminuye el pH se favorece el desarrollo de otros microorganismos como hongos y también algas, aunque estos últimos prefieren la neutralidad y ligera alcalinidad. (Ronald, Barhta, 2002).

5.3.4 Temperatura del Agua

Como se observa en la figura 21, la temperatura en el agua varió de 16,6 grados centígrados en el agua sin tratamiento a 17,90 El efecto de la temperatura es fundamental para el metabolismo de los organismos en el biosistema. Los resultados muestran que la temperatura del agua aumentó durante un periodo de quince días 1.3 grados centígrados, lo que permite inferir que hubo actividad microbiana por un periodo de

tiempo, seguramente por el uso de materia orgánica que estaba presente en el agua y que es traducida por la producción de ATP que genera la actividad microbiológica.

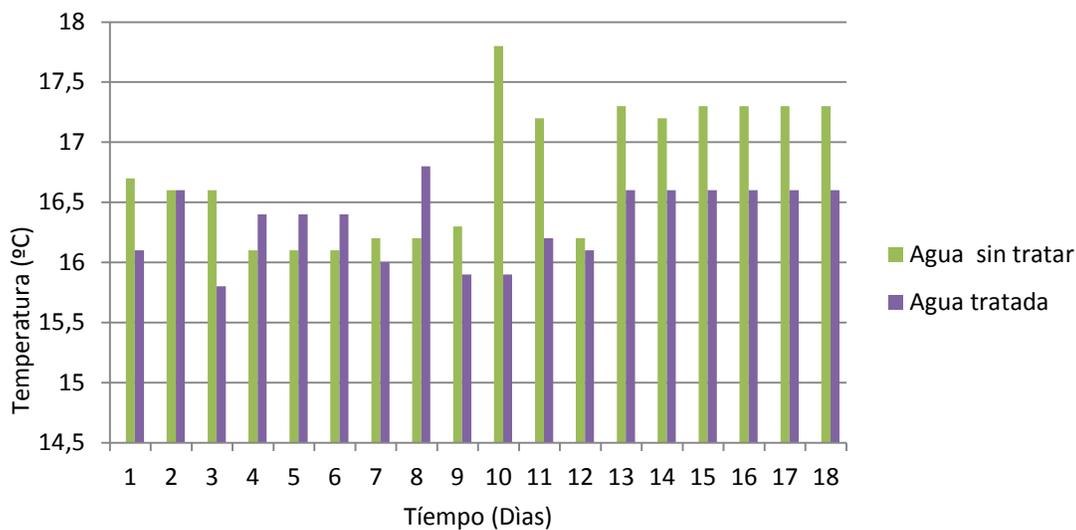


Figura 21. Relación Temperatura del agua tratada y sin tratar durante el estudio. Fuente: Investigador 2012.

ANOVA Temperatura

H_0 : No se encuentra diferencia significativa entre el valor de temperatura antes y después del tratamiento físico y/o biológico depurante.

H_a : Existe diferencia significativa entre el valor de temperatura antes y después del tratamiento físico y/o biológico depurante.

X: 0.05.

Tabla.7. Resultados muestrales para la temperatura durante el estudio.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4,917	2	2,458	3,091	,057
Within Groups	31,022	39	,795		
Total	35,939	41			

Fuente: Investigador 2012.

Decisión: No se rechaza H_0

Conclusión: Los datos de la tabla 7 muestran de que no existe diferencia significativa ($0,057 > 0,05$) en cuanto la variación de la temperatura durante el tratamiento depurante.

Tabla. 8. Prueba t para muestras Independientes. Temperatura

Tratamiento	Valor t	Sig. (2-tailed)	Resultado
Físico vs Biológico	-1,257	0,218	$0,218 > 0,05$
Física vs sin tratamiento	2,485	0,023	$0,023 < 0,05$
Biológico vs sin tratamiento	5,141	0,000	$0,000 < 0,05$

Fuente: Investigador 2012.

Conclusión: Los datos de la tabla 8, muestran de que no existe diferencia significativa entre el tratamiento físico y biológico, los dos reducen el valor de pH, se muestra que existe diferencia significativa ($0,00 < 0,05$) en cuanto la variación de pH al comparar el tratamiento físico con el biológico demostrando que estos dos procesos actúan de manera conjunta.

Por otra parte, la temperatura del agua en sistemas con un tiempo hidráulico de retención largo (mayor a 10 días) se acerca a la temperatura promedio del aire, de igual manera, este cambio térmico no se traduce en un aumento de la tasa de crecimiento de organismos en la columna debido a que estos organismos necesitan temperaturas óptimas para la

actividad bacteriana se encuentran en el rango de 25 a 35 °C (Madigan Michael & Martinko John, 2004).

5.3.5 Conductividad Eléctrica

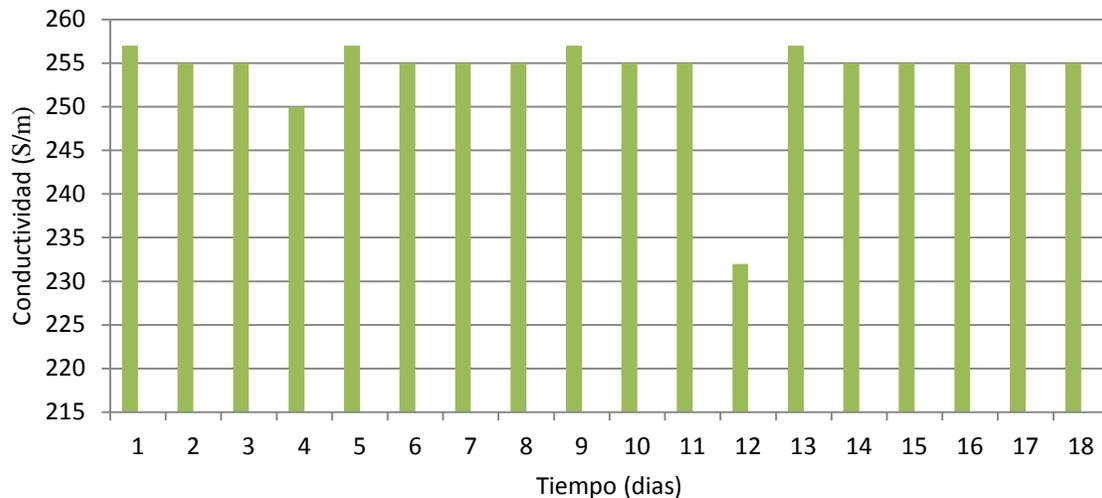


Figura 22. Variación de la conductividad eléctrica en el agua después de pasar por el tanque de filtración. Fuente: Investigador 2012.

Como se muestra en la figura 22, la conductividad eléctrica varió de 495 S/m en el agua sin tratamiento a 286 S/m, entre la muestra original del tanque del agricultor y la primera muestra cero, después de pasar por el sistema físico de filtración y antes de entrar al subsistema biológico, al comparar la conductividad hidráulica eléctrica de todos los puntos de muestreo, con la conductividad eléctrica inicial, se puede observar que en este humedal artificial se ha producido una pérdida de conductividad eléctrica cercana al 90%.

Un referente para esta pérdida de conductividad eléctrica es que el agua primero pasa por el sistema físico de filtración y al entrar en contacto con la grava que posee una alta densidad aparente redujo el espacio entre las partículas, disminuyendo el volumen de aire entre éstas y por tanto un aumento de la conductividad hidráulica, esto significa que el sistema físico de filtración y el humedal artificial comenzaron a funcionar en serie. El primero por lo tanto, recibió la mayor parte de la carga orgánica del afluente, además de eso, el hecho de que no exista un tratamiento primario aumenta la cantidad de sólidos acumulados en el sistema físico. Nivala, J., and Rousseau, D.P. (2009).

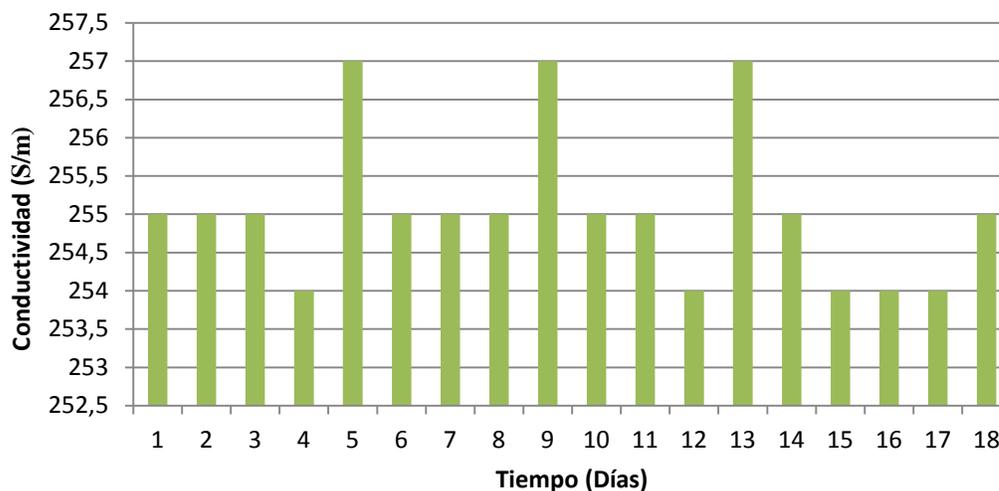


Figura 23. Variación de la conductividad eléctrica en el agua después de pasar por el Humedal artificial.

La figura 23, muestra adicionalmente, la conductividad eléctrica varió directamente con la viscosidad del agua, que a su vez es función de la temperatura que aumento durante el estudio como se mencionó anteriormente. Otra razón de que la conductividad eléctrica presentará una reducción se atribuye fundamentalmente a la evaporación del agua que

llevan a cabo las plantas al transpirar, de tal modo que las sales en el biosistema se concentraron en las macrófitas. (Abu-Hamdeh, N.H. 2003). La variación que presenta la conductividad eléctrica puede estar explicando el cambio en la estructura del ensamble de plantas acuáticas como lo encontrado en las Lagunas Verdes (Ecuador) por Terneus (2002), ya que en los puntos donde aumenta la conductividad eléctrica se encuentra riqueza menor de las tres macrófitas, y por el contrario en las zonas de menor cobertura hay mayor número de especies.

Según el Ministerio de agricultura en su Decreto Nacional 3930 de 2010, la conductividad eléctrica del agua pura es <280 S/m, poco contaminada 280 S/m y 430 S/m, contaminada 430 S/m y 600 S/m y excesivamente contaminada > 860 S/m, bajo este parámetro el agua paso de ser contaminada a ser poco contaminada cumpliendo los requisitos para el uso de cultivos agrícolas en Colombia.

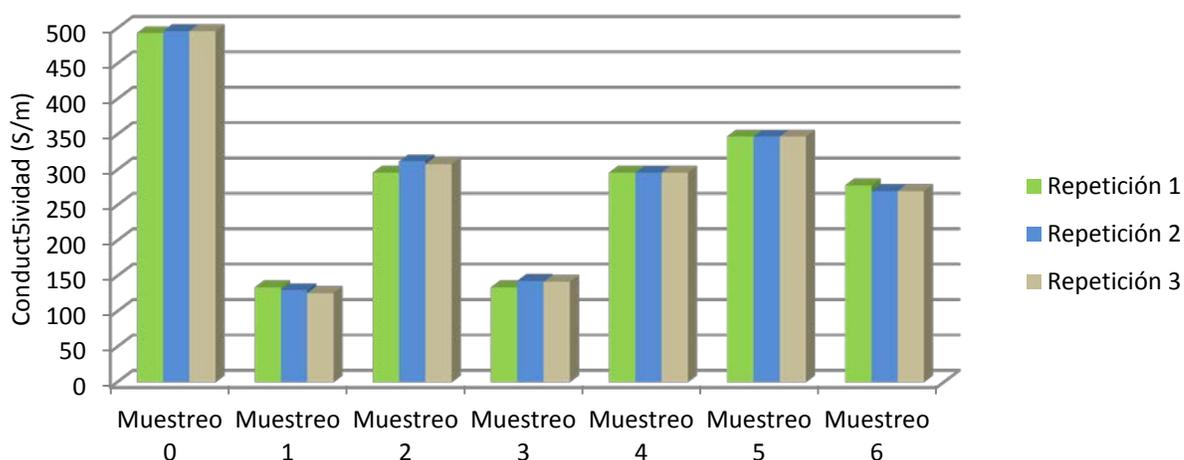


Figura 24. Variación de la conductividad eléctrica durante el estudio con los dos subsistemas. Fuente: Investigador, 2012

ANOVA Conductividad eléctrica

H_0 : No se encuentra diferencia significativa entre el valor de la conductividad eléctrica antes y después del tratamiento físico y/o biológico depurante.

H_a : Existe diferencia significativa entre el valor de la conductividad eléctrica antes y después del tratamiento físico y/o biológico depurante.

X: 0.05.

Tabla.9. Resultados muestrales para la conductividad eléctrica durante el estudio.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	298671,175	2	149335,587	41,309	,000
Within Groups	140988,944	39	3615,101		
Total	439660,119	41			

Fuente: Investigador 2012.

Decisión: Se rechaza H_0

Conclusión: Los datos de la tabla 9, muestran de que existe diferencia significativa ($0,00 < 0,05$) en cuanto la variación de la conductividad eléctrica luego del tratamiento depurante.

Tabla. 10. Prueba t para muestras Independientes. Conductividad eléctrica

Tratamiento	Valor t	Sig. (2-tailed)	Resultado
Físico vs Biológico	5,174	0,000	0,000<0,05
Física vs sin tratamiento	-18,882	0,000	0,000<0,05
Biológico vs sin tratamiento	-12,181	0,000	0,000<0,05

Fuente: Investigador 2012.

Conclusión: Los datos muestran de que existe diferencia entre el tratamiento físico y biológico, los dos reducen el valor de conductividad eléctrica, de igual manera se muestra que existe diferencia significativa ($0,00 < 0,05$) en cuanto la variación de la

conductividad al comparar el tratamiento físico y biológico con agua sin tratamiento, existe reducción de la conductividad.

La figura 24, muestra el comportamiento general de la conductividad eléctrica durante los seis muestreos, en un humedal artificial los microorganismos alteran las substratos cambiando su conductividad eléctrica y esto varía la impedancia, además se establece una relación a nivel de la rizósfera debido a que esta zona captura una gran cantidad de elementos como el Na y el cloro provocando la reducción de los sólidos disueltos y salinidad provocando disminución de los niveles de conductividad eléctrica. La principal fuente natural de las sales minerales en el agua es la erosión de las rocas y minerales. Otras fuentes secundarias incluyen la deposición atmosférica de sales oceánicas (sales en el agua de lluvia), el agua salina de las aguas subterráneas y el aumento de la intrusión de agua de mar en los acuíferos de las aguas subterráneas. Productos químicos de fertilizantes, que lixivian a las fuentes de agua, también pueden afectar a la calidad del agua de riego Nivala, J., and Rousseau, D.P. (2009).

5.3.6 TDS (sólidos totales disueltos)

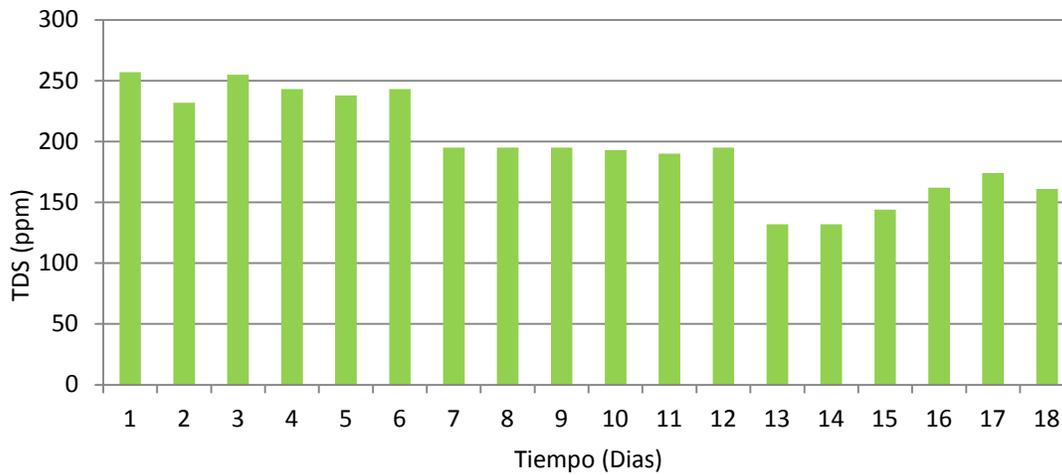


Figura 25. Variación de los TDS en el agua después de pasar por el tanque de filtración.

De acuerdo a lo mostrado en la figura 25, los TDS y la conductividad eléctrica están estrechamente relacionados, cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica. La mayoría de los sólidos que permanecen en el agua tras una filtración de arena, son iones disueltos. El cloruro de sodio por ejemplo se encuentra en el agua como Na^+ y Cl^- . El agua de alta pureza que en el caso ideal contiene solo H_2O sin sales o minerales tiene una conductividad eléctrica muy baja. La temperatura del agua afecta a la conductividad eléctrica de forma que su valor aumenta de un 2 a un 3 % por grado Celsius. Este parámetro se relaciona estrechamente con el metabolismo microbiano de la rizósfera en la macrófita (Pedescoll, A, 2009).

Los resultados arrojan que los TDS disminuyeron del muestreo inicial de 248ppm (A) a 162 ppm (B). La obtención de TDS está relacionado con los movimientos de escorrentía

agrícola, lixiviación del suelo y aguas contaminadas de la superficie. (Puigagut, J. 2007). La reducción se debe en gran parte al recirculado del agua en el sistema físico de filtración. Los mecanismos de remoción de TDS ocurrieron por vías de sedimentación y filtración, gracias a la alta densidad de vegetación a nivel del biosistema, pero es importante resaltar el papel que desarrolló la granulometría y densidades en el sistema físico. Como consecuencia de la reducción de TDS se dio el aumento del ingreso de la luz provocando una alza fotosintética conllevando al aumento de la productividad y ganancia de oxígeno como resultado de este proceso. Ver figura 26.

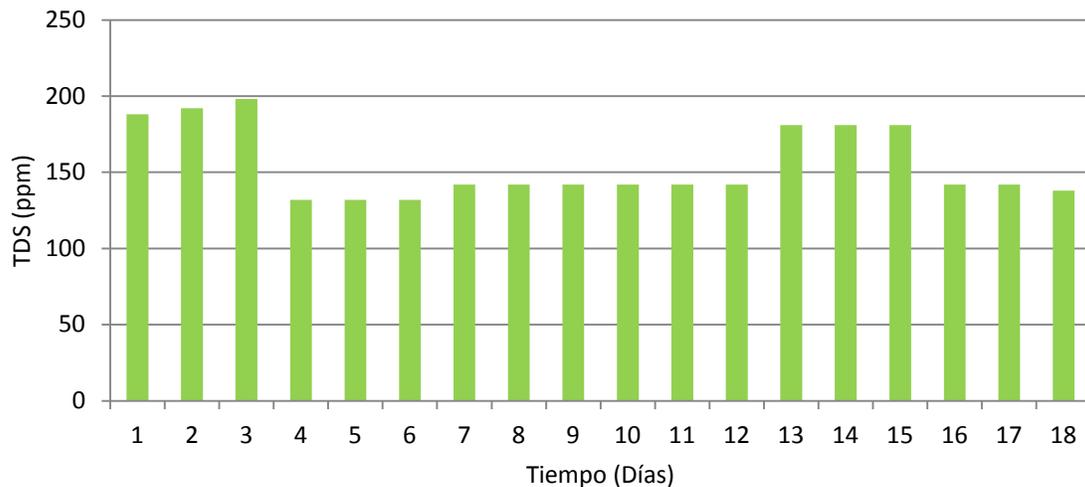


Figura 26. Variación de los TDS en el agua después de pasar por el Humedal artificial.

Es importante mencionar que los TDS observados en el agua en un alto porcentaje son de origen grasoso donde no se descarta que su origen sea de labores domésticas, debido a que la zona ha eliminado sus aguas residuales a pozos sépticos durante varios años y solo hace 2 años se inició la ampliación y adecuación del acueducto y el alcantarillado en las zonas rurales. (Plan de Ordenamiento territorial. POT, 2000).

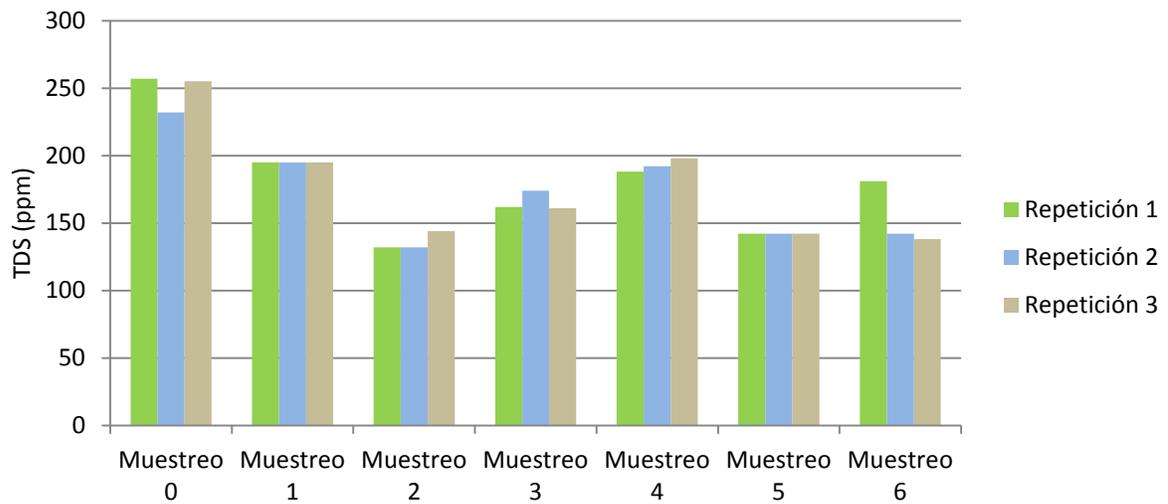


Figura 27. Variación de los TDS durante el estudio con los dos subsistemas.

ANOVA

H_0 : No se encuentra diferencia significativa entre el valor de TDS antes y después del tratamiento físico y/o biológico depurante.

H_a : Existe diferencia significativa entre el valor de TDS antes y después del tratamiento físico y/o biológico depurante.

X: 0.05.

Tabla.11. Resultados muestrales para TDS durante el estudio.

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	47199,111	2	23599,556	35,470	,000
Within Groups	25948,222	39	665,339		
Total	73147,333	41			

Fuente: Investigador 2012.

Decisión: Se rechaza H_0

Conclusión: Los datos de la tabla 11, muestran de que existe diferencia significativa ($0,00 < 0,05$) en cuanto la variación de TDS antes y después del tratamiento depurante.

Tabla. 12. Prueba t para muestras Independientes. TDS

Tratamiento	Valor t	Sig. (2-tailed)	Resultado
Físico vs Biológico	4,226	0,000	0,000<0,05
Física vs sin tratamiento	-6,922	0,000	0,000<0,05
Biológico vs sin tratamiento	-13,766	0,000	0,000<0,05

Fuente: Investigador 2012.

Conclusión: Los datos muestran de que existe diferencia entre el tratamiento físico y biológico, los dos reducen el valor de TDS luego del proceso, de igual manera se muestra que existe diferencia significativa ($0,00 < 0,05$) en cuanto la variación de TDS al comparar el tratamiento físico y biológico con el agua sin tratamiento, existe reducción.

La figura 27, muestra la reducción general del material en el bloque de agua lo que permite el aumento de la luz en el bloque de agua favoreciendo las condiciones para la aparición de organismos fotosintéticos generadores de oxígeno. La figura 28 muestra la modificación de TDS en un proceso de fitodepuración.

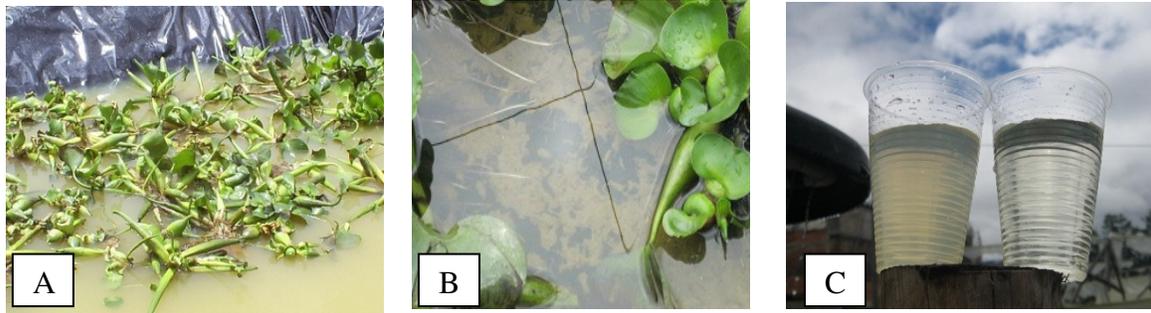


Figura 28: Reducción de TDS durante el estudio. TDS al iniciar el proceso de fitodepuración (A). TDS al finalizar el proceso de biodepuración (B). Comparación del agua antes y después del proceso de fitodepuración. (C). Fuente: Investigador 2012.

Evaluación Microbiológica

La evaluación microbiológica aparece en la tabla 5. A continuación se presentan las gráficas correspondientes a los resultados obtenidos con la técnica de filtración de membrana y el número más probable en los diferentes muestreos.

Tabla. 13. Evaluación microbiológica

	AGUA SIN EL TRATAMIENTO	AGUA DEL POZO CON EL TRATAMIENTO					
ANALISIS	MUESTRA CERO	MUESTRA UNO	MUESTRA DOS	MUESTRA TRES	MUESTRA CUATRO	MUESTRA CINCO	MUESTRA SEIS
F.M	Mayor a 2400 NMP por 100 ml	mayor a 200 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC
NMP	Mayor a 2400 NMP por 100 ml	10 NMP por 100 ml	menor a 100 UFC	4 NMP por 100 ml	Mayor a 100UFC X ml	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC
Recuento coliformes totales - Técnica	Mayor a 2400 NMP por 100 ml	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	160 UFC/ml	15 UFC/ml	9 UFC/ml

NMP							
Recuento de coliformes fecales - Técnica NMP	Mayor a 2400 NMP por 100 ml	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	menor a 100 UFC	50 UFC/ ml	50 UFC/ ml	0 UFC/ ml

F.M= Recuento microbiano por filtración de membrana - medio de cultivo endo.

NMP = Valor referencia. Prueba presuntiva recuento de coliformes. Número más probable. Fuente. Investigador. 2012.

Los resultados para las dos técnicas en algunos casos, son iguales, en otros son similares, pero su significado es el mismo y es que es evidente la contaminación fecal del agua de riego utilizada en esta finca.

En la técnica por filtración de membrana, se observa como el recuento de UFC del agua de riego original era de Mayor a 2400 NMP por 100 ml en la muestra posterior al proceso de filtración física fue de Mayor a 100UFC X ml y después de pasar por el sistema biológico fue de menor a 100 UF. En cada uno de los muestreos se evidencia una disminución, lo que permite confirmar que paulatinamente disminuye el recuento microbiano, acción que puede explicarse porque el sistema biológico en los rizomas de las macrófitas está activo y está realizando su actividad de depuración. Igualmente, el sistema biológico implantado permite el crecimiento de algas y algunos protozoos que también ejercen su acción limpiadora correspondiente a las cadenas alimenticias que hacen parte de los sistemas biológicos. De esta manera el sistema se mantiene en equilibrio ecológico generando unas condiciones adaptativas tanto para las macrófitas como para los microorganismos que habitan en la rizósfera de estas plantas (Puigagut, J, 2007).

Las pruebas realizadas con el método de NMP permiten ver la presencia de coliformes totales y confirman la presencia de coliformes fecales. De acuerdo a los estudios de la Universidad Nacional de Colombia (2011) una serie de plantas incluidas las espinacas poseen una cierta tolerancia al grado de contaminación por coliformes, pero esa calidad puede mejorarse a través de un sistema de tratamiento de aguas como el presentado en esta investigación logrando cumplir con los parámetros exigidos en el Decreto 1594/84 que trata sobre criterios admisibles presentado por Unión Técnica de la Sabana 2010 y la FAO en el 2010.

De acuerdo a la tabla 5 los resultados del análisis microbiológico mostró concentraciones elevadas de coliformes totales y fecales durante la primera y segunda semana (2400 NMP/100 ml y 1600 NMP/100 ml respectivamente) en el agua tratada en el biosistema durante la tercera y cuarta semana, se observa una remoción total de 94.17% para coliformes totales y 91.25% para fecales lo que indica una eficiencia alta del humedal para eliminar microorganismos patógenos, este resultado posee relación con la normatividad Colombiana NOM-33-ECOL-1993, en donde el límite máximo permisible de coliformes fecales en el agua de riego es de 240 NMP/100 ml.

De acuerdo a lo arrojado por los resultados microbiológicos, expresados como coliformes/100 ml, mostró que el pozo subterráneo está contaminado con coliformes fecales y con coliformes totales. Sin embargo, los coliformes fecales, aún en concentraciones bajas, exceden la normativa, la cual indica que en el agua potable para

consumo humano debe haber total ausencia de este tipo de microorganismos de origen fecal.

La posible cercanía de pozos sépticos a los pozos de agua es una situación reiterada en áreas campesinas como la del estudio, lo cual hace presumir que podría ser éste el origen de la contaminación fecal del agua. El punto será aclarado con otro estudio espacio-temporal de la calidad del agua en los mismos pozos, que comienza en enero del 2013. La investigación registrará cómo evoluciona la contaminación y determinará el origen humano o animal de los coliformes.

Es de tener en cuenta que la falta de manejo adecuado para excretas de animales domésticos y desechos humanos pueden llegar a afectar la calidad de esta agua generando altos grados de contaminación como los registrados.

Con relación a los datos obtenidos de hongos al iniciar el estudio no se encontraron organismos de este reino, es característico que alrededor de la segunda semana de muestreo se generó un incremento tanto de coliformes como de hongos, es muy posible que haya existido algún tipo de contaminación sobre el biosistema, no se descarta una excreta animal o alguna caída de resto de materia vegetal proveniente del cultivo. En cuanto a los actinomicetos que son más representativos en suelo o aguas estancadas se incrementaron en este mismo periodo de tiempo apoyando la teoría de que se pudo haber generado contaminación en el biosistema por suelo, a pesar de esta situación se puede ver la rápida recuperación de las aguas generando un mayor grado de confianza en este tipo de sistemas de fitodepuración hídrica.

Con relación a los datos obtenidos por las algas el crecimiento tomo un crecimiento constante, esto indica que se generaron condiciones aeróbicas fotosintéticas para este tipo de individuos que por medio de la fotosíntesis producen materia orgánica. A diferencia de las plantas terrestres, el bióxido de carbono que se usa en el proceso de fotosíntesis se obtiene directamente del agua (o sea bióxido de carbono disuelto en agua). Las algas necesitan nutrientes para poder vivir y desarrollarse. El pH y el oxígeno disuelto se usan como indicadores del crecimiento de algas siendo para este estudio favorables para estos microorganismos. Como las algas consumen bióxido de carbono, el pH del agua aumenta cuando éstas crecen. El oxígeno al ser un producto de la fotosíntesis, aumenta con el crecimiento de las algas. (Pedescoll, A, 2009).

Evaluación biológica de las macrófitas

Se evaluó el comportamiento de las tres especies en un proceso de depuración de aguas provenientes de un pozo, que se presenta en la figura 29.

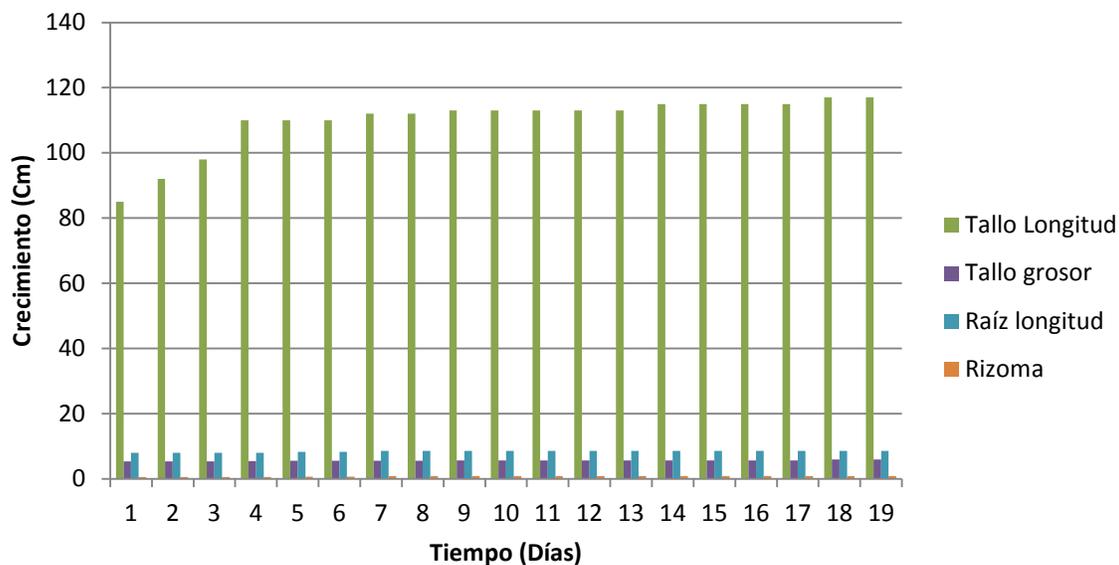


Figura 29. Comportamiento del crecimiento de *Eichornnia crassipes* durante el estudio.

Fuente: Investigador 2012.

Tabla.14. Porcentaje de Crecimiento en las plantas de *Eichornnia crassipes* durante el estudio.

DIA	ROSETA (cm)	HOJA (cm)	RAIZ (cm)	PECIOLO LONGITUD (cm)	PECIOLO ANCHO (cm)	PESO (g)
0	7	3	10	11	3	302,3
1	7	3	10	11	3	303
3	9	3	13	12	4	305
6	9	3	13	12	4	310
9	12	4	15	12	5	312
12	12	4	17	12	5	312
15	14	5	17	14	6	312
18	15	7	17	14	7	312
Porcentaje de crecimiento	114%	133%	70%	27%	133%	3%

Fuente: Investigador 2012.

Tabla. 15. Tasa de crecimiento en las plantas de *Eichornnia crassipes* durante el estudio.

DIA	ROSETA (cm)	HOJA (cm)	RAIZ (cm)	PECIOLO LONGITUD (cm)	PECIOLO ANCHO (cm)	PESO (g)
0						
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,29	1,00	1,30	1,09	1,33	1,01
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02
9	1,33	1,33	1,15	1,00	1,25	1,01
12	1,00	1,00	1,13	1,00	1,00	1,00
15	1,17	1,25	1,00	1,17	1,20	1,00
18	1,07	1,40	1,00	1,00	1,17	1,00
Media Geométrica	1,12	1,13	1,08	1,04	1,13	1,00

Fuente: Investigador 2012.

Se logró identificar un crecimiento superior en la roseta, hoja y ancho del peciolo de *Eichornnia crassipes*, esto se debe a que en estas zonas existe una mayor acumulación de agua, tejido aerenquimatoso esponjoso y mayor tasa de vacuolas. Seguidamente la rizósfera es la de mayor crecimiento, este se debe a que a mayor área radicular es proporcional a la capacidad de absorción e intercambio metabólico microbiano. La zona con menor crecimiento fueron el peciolo en su longitud y el peso, esto se debe a que morfológicamente *E. crassipes* es una planta de baja de habito achaparrado generado evolutivamente debido a tener una baja tasa de resistencia a corrientes aéreas, con respecto a peso los especímenes pesados mantuvieron su peso desde el inicio de la investigación mostrando una excelente capacidad adaptativa frente las condiciones del humedal artificial. (Balasubramaniana, et al 2012).

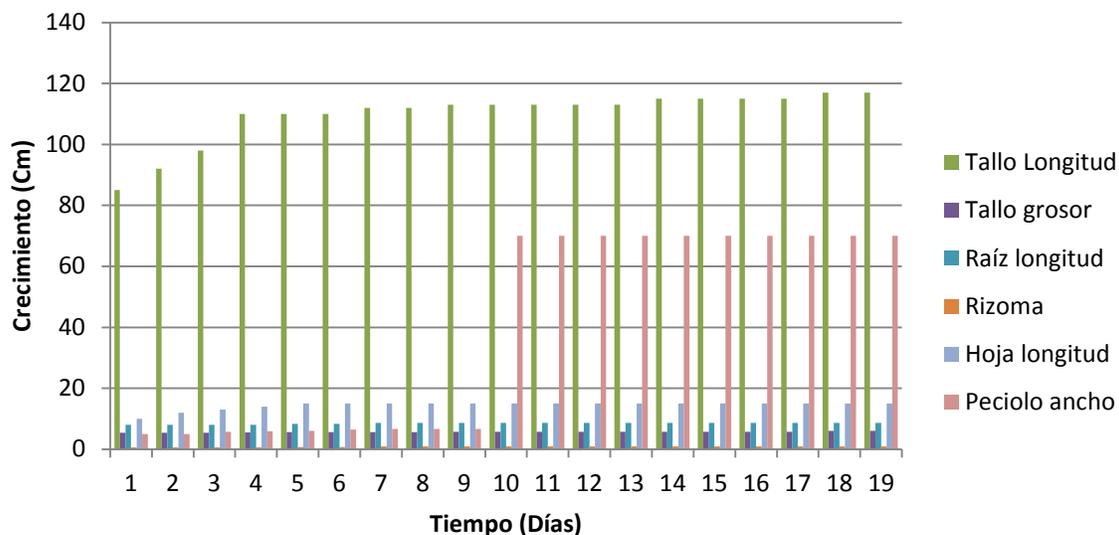


Figura. 30. Comportamiento del crecimiento de *Scirpus spp* durante el estudio. Fuente: Investigador 2012

Tabla.16. Porcentaje de Crecimiento en las plantas de *Scirpus spp* durante el estudio.

DIA	HOJA (cm)	RAIZ (cm)	PECIOLO LONGITUD (cm)	PECIOLO ANCHO (cm)	PESO (g)
0	13,7	7,3	4,2	0,5	220,3
1	13,9	7,7	4,6	0,5	225,4
3	15,9	7,8	4,6	0,5	225,9
6	16,3	8,1	4,6	0,7	232,2
9	16,7	8,5	4,6	0,7	235,6
12	16,7	8,9	4,6	0,7	237,8
15	16,7	8,9	4,6	0,9	237,8
18	16,7	8,9	4,6	0,9	237,8
Porcentaje de crecimiento	21,9%	21,9%	9,5%	80,0%	7,9%

Fuente: Investigador 2012

Tabla.17. Tasa de crecimiento en las plantas de *Scirpus spp* durante el estudio.

DIA	HOJA (cm)	RAIZ (cm)	PECIOLO LONGITUD (cm)	PECIOLO ANCHO (cm)	PESO (g)
0					
1	1,01	1,05	1,10	1,00	1,02
3	1,14	1,01	1,00	1,00	1,00
6	1,03	1,04	1,00	1,40	1,03
9	1,02	1,05	1,00	1,00	1,01
12	1,00	1,05	1,00	1,00	1,01
15	1,00	1,00	1,00	1,29	1,00
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Media Geométrica	1,30	1,30	1,49	1,37	1,38

Fuente: Investigador 2012

Se logró identificar crecimiento superior en la longitud y ancho del peciolo de *Scirpus spp*, esto se debe a que en estas zonas existe una mayor acumulación de agua y tejido meristemático que promueve la elongación de la macrófita, esto se debe a que estas plantas son altamente competitivas con el recurso lumínico, se observó que el peso también aumentó significativamente, este aumento se debe a que a mayor área radicular es proporcional a la capacidad de absorción e intercambio metabólico microbiano. La zona con menor crecimiento fueron el peciolo en su longitud y el peso, esto se debe a que la macrófita posee un hábito de vida con gran biomasa aérea donde se reserva una mayor cantidad de agua, minerales y nutrientes necesarios para el metabolismo celular.. (Balasubramaniana, et al 2012).

Eichornnia crassipes mostró un aumento general de su biomasa con especial atención sus raíces que crecieron de manera promedio 11,7 cm, la roseta de la planta varía de 0,6 cm a 11 cm, la hoja posee un crecimiento promedio de 4,75 cm y la raíz que es

fundamental en el proceso de biodepuración posee un promedio de 11,7 cm siendo un 30% del tamaño de la planta.

Analizando los datos obtenidos, el incremento de la biomasa está marcado por la cantidad y diámetro de los peciolos que tuvieron como promedio 14,1cm que es aproximadamente un 50% de la biomasa en un individuo. Los peciolos a medida que transcurrió el estudio se fueron dividiendo y separando de las plantas iniciales generando una rápida propagación; a medida que cada nuevo retoño iba creciendo se observó que los peciolos tomaron una coloración rojiza debido al aumento de fotopigmentos para capturar mayor luz solar. Las raíces a medida que iban madurando se modificaron de una raíz principal a ser plumosa, esto con el propósito de tener mayor área de cobertura. Con respecto al color claro de las primeras etapas, a medida de su madurez no mayor a ocho días la tonalidad fue convirtiéndose en azulada-fucsia, esto se debe a que a medida que la planta madura aumenta su producción de antocinina que utiliza como defensa frente a los predadores. Ver figura 31.



Figura 31. Coloración de Bulbo y raíz en *Eichornnia crassipes* durante el estudio.

Fuente: Investigador 2012

Eichornnia crassipes es una especie que más nutrientes remueve, su elevado consumo de Nitrógeno demuestra la utilización de una amplia gama de micro y macronutrientes para procesar proteínas estructurales. Rodríguez et al. (2005).

En el humedal artificial las plantas actuaron como base para el crecimiento de la biopelícula encargada de la biodegradación, así como la filtración mecánica de las partículas. La figura 1, muestra el desarrollo del crecimiento de *Eichornnia crassipes*. La vegetación distribuyó y redujo la velocidad del agua lo que favoreció la sedimentación de los sólidos suspendidos. La vegetación originó un importante gradiente de luz, viento y temperatura. Rodríguez et al. (2005).

Con respecto a *Eichornnia crassipes* que presenta una adaptación muy importante y es el desarrollo de un tejido tubular poroso (aerénquima) en hojas y tallos que permite el transporte de oxígeno a la rizósfera. Este oxígeno transportado incrementó el potencial redox, siendo más favorable para el crecimiento de la raíz permitiendo la reoxidación y precipitación de iones tóxicos. La vegetación mantuvo una mayor inercia térmica respecto a los fuertes cambios de temperatura día-noche, lo que supuso valores más bajos en el momento del muestreo (medio día) en la zona vegetada que en la parte sin vegetación, aspecto que confirma la importante inercia térmica de la vegetación (Brix 1994).

Los porcentajes de cobertura de la especie *Lemna spp* se estimaron teniendo en cuenta imágenes fotográficas y observaciones directas tomando como referencia marcaciones a cada cincuenta centímetros. Esta especie presentó un alto grado de cobertura en un tipo

de 15 días 80%, formando un denso colchón. El aumento en la cobertura de *Lemna spp* podría tomarse también como una especie indicadora del estado trófico del agua del pozo indicando su relación con descargas de acueductos y alcantarillados de la zona, esta especie solo accede a los nutrientes disponibles en la columna de agua (Nasu y Kugimoto 1981, Terneus 2002). En estudios realizados por Robinson et al. (2006) se menciona la capacidad de *Lemna spp* para absorber metales pesados y agentes químicos contaminantes. Teniendo en cuenta lo anterior se puede sugerir que esta especie ayuda a mantener la calidad de agua del humedal artificial (Terneus, C. 2002).

5.3.8 Fauna asociada al Humedal artificial

Se conto con la colaboración del personal del laboratorio de ecología de la Universidad Pedagógica Nacional en el reconocimiento de las diferentes especies asociadas al humedal artificial.

Los individuos fueron clasificados taxonómicamente como se describe a continuación:

Tabla 18. Registro de fauna asociada al Humedal artificial.

Clase	Orden	Familia	Genero/Subfamilia	Especie
Insecta	Diptera	Chironomideae	<i>Chironiminae</i>	<i>sp</i>
Insecta	Coleoptera	Hidrophylidae	<i>Berosus</i>	<i>sp</i>
Amphibia	Anura	Hylidae	<i>Dendropsophus</i>	<i>labialis</i>

Fuente: Laboratorio de Ecología. Universidad Pedagógica Nacional. 2012.

La familia Chironomidae según la guía ilustrada de Roldan, G. 1999, son bioindicadores de aguas contaminadas, son un alimento para especies como *Dendropsophus labialis*, la familia Hydrophilidae son conocidos como barrenderos acuáticos debido a que se alimentan de detritos o materia en descomposición, algunos pueden ser predadores de dípteros, muchos adultos son omnívoros, consumiendo tanto materiales vivos y muertos. Son bioindicadores de aguas limpias y poco contaminadas, esto significa que debido a su aparición y bajo un estudio más detallado pueden ser un parámetro claro de calidad de las aguas de los humedales artificiales.

Con respecto a *Dendropsophus labialis* (Rana sabanera) su ecología muestra que no puede ser tomada como bioindicadora de calidad, esto a que ha generado una adaptación fisiológica a diferentes a gentes contaminantes a través de su piel.

5.3.9 Evaluación de Metales pesados

Los resultados de los análisis de metales pesados de las aguas sin tratamiento y con tratamiento por parte del biosistema que fueron llevadas al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, se presentan en la tabla 7, en la que aparecen los resultados emitidos y los valores referenciados por el Ministerio de Agricultura de Colombia. 2010. los resultados arrojaron la ausencia de metales pesados en las aguas provenientes del pozo. Los resultados originales se presentan en Anexo 5.

Tabla 19. Resultados de análisis de laboratorio. Metales pesados.

Parámetro	Unidades	Método	Parámetro Referente*	Resultado	
				Agua sin tratamiento	Agua con tratamiento
Mercurio	Mg/L	Absorción Atómica	0,01	<0,003	<0,003
Plomo	Mg/L	Absorción Atómica	0,5	<0,05	<0,05
Arsénico	Mg/L	Absorción Atómica	0,1	<0,003	<0,003
Cadmio	Mg/L	Absorción Atómica	0,01	<0,01	<0,01

*.Ministerio de Agricultura de Colombia. 2010. Artículo 40. Decreto Nacional 3930.

Referido a los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso hídrico para uso agrícola.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los valores de metales pesados en el agua del pozo están por debajo de la normatividad Colombiana, este resultado que no era el esperado por el investigador, podría estar dado porque el agua proviene de un pozo profundo que fue perforado recientemente y si hubiese presencia de metales pesados por lixiviación o escorrentía estarían al fondo de este acuífero. Por otra parte, la manguera con la que se está extrayendo nunca ha llegado al fondo del pozo sino que está ubicada a unos metros arriba, lo que permite pensar que esta inferencia es correcta.

La cercanía al río Bogotá asegura que de alguna manera puede tener influencia en la calidad original de esa fuente, considerando que recoge las aguas residuales de siete

municipios y que también traen consigo aguas de escorrentía de ganado vacuno, porcino, equino, aviar y por lo tanto por escorrentía o lixiviación va formando los acuíferos y pozos gracias a que los suelos de esta zona son arcillosos y van acumulando el agua lluvia y procedentes de acuíferos superficiales a lo largo de la sabana de Bogotá. Tomado de la Publicación No. 27 “Aspectos Geoambientales de la Sabana de Bogotá”. Ingeominas, p. 243.

Fase 4. Validación del agua de riego depurada

Los resultados obtenidos en el cultivo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla.20. Registro de crecimiento con agua sin tratar por el biosistema.

PLANTA REGADA CON AGUA SIN TRATAR									
	<i>Spinacia</i> o VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
Crecimiento (Cm)	Número de hojas	2	2	2	2	3	3	5	5
	Área foliar	1,5	1,7	2,2	3,2	3,7	4,5	5,6	6,8
	Altura	2	2	2,3	2,5	2,9	3,8	4,5	5,6
	Raíz longitud	1,5	1,7	1,9	2,3	2,5	2,8	3,2	4,6
Peso (gr)	Masa fresca total	220	224	228	232	245	267	315	336
	Área foliar	2	2	2	3	3	3	4	4
A-P	Necrosis	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Clorosis	A	A	A	A	A	A	A	A

Fuente: Investigador 2012

Tabla.21. Registro de crecimiento con agua tratada por el biosistema.

INDIVIDUO	PLANTA REGADA CON AGUA TRATADA								
	<i>Spinacia o</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
Crecimiento (Cm)	Número de hojas	2	3	3	3	4	5	6	8
	Área foliar	2,8	3,4	3,8	6,7	6,9	7,3	7,8	8,9
	Altura	2	3	5	5	6	7	7	8
	Raíz longitud	2,5	2,6	2,8	3,9	4,1	4,8	5,3	6,5
Peso (gr)	Masa fresca total	278	298	312	348	378	387	413	456
	Área foliar	5	5	6	6	7	7	7	7
A-P	Necrosis	P	P	A	A	A	A	A	A
A-P	Clorosis	P	P	A	A	A	A	A	A

Fuente: Investigador 2012

Tabla22. Porcentaje de crecimiento de espinaca (*Spinacia oleracea*) durante el estudio

Estructura	Agua sin tratar	Agua tratada	Diferencia
Masa Fresca Total	746%	1256%	510.6%
Altura	250%	500%	250.4%
Área Foliar	228,60%	433,30%	204.7%
Raíz Longitud	113,30%	286,70%	173.4%
Número de hojas	400%	550%	150.0%

Fuente: Investigador 2012

En la tabla 22, se observa las variaciones que tuvieron los ejemplares de espinaca (*Spinacia oleracea*) con agua tratada y sin tratar, al evaluar se identifican las mayores diferencias en la masa fresca total (510.6%) y altura (250.4%); se resalta que todas las estructuras muestreadas tuvieron un aumento significativo con el agua tratada. La influencia del agua con o sin tratamiento en el crecimiento inicial de plántulas se aprecia

más claramente en número de masa fresca total, altura y área foliar, esto se debe a que en las primeras etapas de la plántula la raíz es la encargada directa de fijar la planta al suelo para aumentar la absorción de nutrientes macro y micro a través de esta estructura, a continuación viene una etapa de crecimiento para tener un punto de aumento de peso. Ver figura 32.

Las menores elongaciones se presentaron cuando las semillas fueron regadas con agua tratada, esto probablemente se debió al incremento paulatino de la conductividad eléctrica. Por observaciones directas del investigador el suelo en el cultivo de la hortaliza presenta una alta tasa de sales, fenómeno que es reconocido por la alta acumulación de sales minerales en los suelos debido a fenómenos de respuesta a un excesivo uso de agroquímicos y otros productos que se han ido reteniendo en el suelo. (Acevedo *et al.*, 2005).



Figura 32. Disposición de los transectos de cultivo experimental de *Spinacia oleracea*.

A: plantas regadas con agua sin tratamiento. B: plantas regadas con agua proveniente del “sistema humedal”. Fuente: Investigador 2012.

“Según la Universidad Nacional de Colombia e Ingeominas, en su estudio tomado de la Publicación “Aspectos Geoambientales de la Sabana de Bogotá. 2009”, a la profundidad a la que se encuentra el pozo en estudio, el agua no cumple con las características físico-químicas y microbiológicas aptas para el riego de cultivos hortícolas, además de lo estipulado por el Ministerio de agricultura en su Decreto Nacional 3930 de 2010; esto se debe a que a esta profundidad se encuentran aguas que han sufrido un proceso de infiltración desde la superficie, el agua se infiltra a través de las fisuras de las rocas más sólidas del suelo ocasionando el transporte de materiales contaminantes desde las diferentes capas externas. De acuerdo a Ingeominas en el 2009, la mayoría de pozos de 50 a 80 m captan aguas del periodo cuaternario formadas por una gran matriz arcillosa y lentes de arena, que no poseen una larga duración debido a que su origen en una lente de graba, lo que se conoce como un acuífero colgante de baja recarga. Para encontrar aguas con un grado óptimo para uso agrícola es necesario perforar hasta el complejo acuífero más importante en la Sabana de Bogotá, desde el punto de vista de abastecimiento y pureza, es el denominado complejo Guadalupe, que se encuentra ubicado aproximadamente a 1.500 m de profundidad, según un estudio del Instituto Colombiano de Minería y Geología, Ingeominas” (2009).

De acuerdo a lo soportado por los referentes químicos, microbiológicos y biológicos se observa claramente que el biosistema es altamente eficaz en la remoción de material contaminante, esto se debe a la generación de un innovador sistema híbrido donde se combinaron dos subsistemas que apuntan a la mejora de la calidad de aguas de riego coincidiendo en una alta tasa con lo citado en Europa y demás citaciones

referenciadas en el marco teórico. En los últimos años, el agua se ha transformado en un recurso al cual se le ha dado una connotación diferente. En este estudio se evaluó el grado de contaminación del recurso hídrico utilizado para el riego de hortalizas de consumo humano, hoy en día el recurso hídrico ha llegado a un grado alarmante de agentes contaminantes que si no son tenidos en cuenta el día de hoy, seguramente las próximas generaciones serán las que heredaran los errores ambientales de esta generación.

Garantizar el uso sustentable del agua es un desafío que no puede ser asumido por grupos aislados o acciones individuales, sino por acciones amables ambientalmente que incorporen a los distintos usuarios del recurso. De acuerdo a lo anterior, el contexto de limpieza de las aguas a través de medios no contaminantes está encaminado en un marco sostenible que involucre la población humana en un contexto, económico, social y ambiental para un bien preciado llamado agua.

CONCLUSIONES

El diseño y construcción del humedal artificial con los subsistemas físico y biológico es una iniciativa viable que puede resolver el problema de manejo de aguas de riego, es de bajo coste, fácil operación y mantenimiento para la comunidad que lo utilice. Este tipo de biosistema es innovador en la medida que no ha sido utilizado para la depuración de aguas de riego en el país y puede mejorar la inocuidad de los cultivos.

Los métodos químicos, físicos y biológicos permitieron evidenciar la depuración del agua de riego en el biosistema “humedal artificial” en un lapso de tiempo corto, dando respuesta a las necesidades del cultivador, es fácilmente reproducible, puede adaptarse a cualquier espacio físico y llevarlo a la escala que sea requerido.

El trabajo conjunto del sistema físico de filtración y el sistema biológico se evidenció por las interrelaciones que se establecieron entre los resultados obtenidos en las mediciones físicas, químicas y biológicas. El trabajo de los lechos y de las macrófitas, así como la acción microbiológica de los rizomas en forma conjunta se observó en la totalidad de los resultados.

El crecimiento y desarrollo del cultivo de espinaca se vió favorecido con el agua de riego depurada proveniente del biosistema, se determinó un aumento en el área foliar, peso húmedo y mejora ostensible en su morfología lo que significa que el agua de riego juega un papel protagónico en términos de productividad e inocuidad del cultivo.

RECOMENDACIONES

Debido a que se encontró fauna que no fue instalada en el humedal pero que se instaló en el sistema biológico en forma espontánea, sería importante estudiar la posible acción que tendría en el proceso de depuración y su papel como bioindicador.

Se recomienda efectuar un estudio más detallado de las hortalizas regadas con este tipo de agua durante un tiempo más largo, con el propósito de observar su evolución y respuesta las nuevas características fisicoquímicas y microbiológicas que tiene y la acción que se genera en el suelo.

Es necesario generar procesos pedagógicos que sensibilicen al agricultor simultáneamente a la puesta en marcha de soluciones o procesos de mejora como los que se plantean en esta investigación, para que se relacione con este tipo de alternativas ambientales, que se sienta partícipe y sea responsable frente a el proceso de mejoramiento.

BIBLIOGRAFÍA

Adcock, P., Gill, L & Barlow. J. (2000). Tratamiento de efluentes industriales en humedales. Argentina. Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Edición 50.

Angelier, E. (2002). Ecología de las aguas corrientes. Zaragoza, España. Editorial Acribia.

Aquatic ecosystem restoration foundation. (2009). Biology and control of aquatic plants: a best management practices handbook. lyn a. gettys, william t. haller, and marc bellaud, editors. Aquatic ecosystem restoration foundation.

Bastian,R & Hammer, D.A. (1993). The use of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Recycling, in Moshiri, G.A., ed; Constructed Wetlands for water Quality Improvement: Lewis Publishers, Chelsea, MI.

Balasubramaniana, D., Arunachalama, K., Dasb, A & Arunachalama, A. (2012). Decomposition and nutrient release of Eichhornia crassipes (Mart.) Solms. Under different trophic conditions in wetlands of eastern Himalayan foothills. Ecological Engineering (44). 111-122

Bergmann, W. (1993). Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Alemania. Gustav Fischer Verlag, Jena.

Berezowsky, M. (1996). Constructed Wetlands for Remediation of Urban Wastewaters. Toronto. Boojun Technologies Ltd.

Brix H. (1994). Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present statusand future perspectives. *Water Science and Technology* 30(8), 209-223.

Brix H. (1994) Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 29, 71-78.

Brix, H. (2001). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science Technology* 35(5), pp. 11-17.

Campos, C., Cárdenas, M & Guerrero, A. (2008). Comportamiento de los indicadores de contaminación fecal en diferente tipo de aguas de la sabana de Bogotá. Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ciencias. Bogotá, Colombia.

Carranza, C (2009). Tomado de la Publicación No. 27 “Aspectos Geoambientales de la Sabana de Bogotá”. Ingeominas, p. 243.

Cirujano, S. & Medina, L. (2002). Plantas acuáticas de las lagunas y humedales de Castilla-La Mancha. Real Jardín Botánico & Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Madrid.

Calidad del sistema hídrico de Bogotá (2011) – 1 a ed – Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana: Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría de Ambiente: Empresa de Acueducto Y alcantarillado de Bogotá.

Canals,R., Ferrero, V., Iriarte, A., Cárcamo, A., San Emeterio, L & Villanueva Eva. (2011). Emerging conflicts for the environmental use of water in high-valuable rangelands. Can livestock water ponds be managed as artificial wetlands for amphibians? *Ecological Engineering*. (37). 1443-1452.

Claro, R. (2005). Estudio Agroclimático de la cuenca alta del río Bogotá y del río Ubaté-suárez. Bogotá. Ideam.

Carranza, C., Lancho, D & Chaves, B (2009). Análisis de crecimiento de lechuga y espinaca (*Lactucasativa* L.), (*Spinacia oleracea*) cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. Agron. Colomb. 27(1), 41-48.

Correll, D & Johnston, C. (1970). Manual Of The Vascular plants Of Texas. Texas. Texas Research Foundation. Renner.

Comisión de Supervivencia de Especies (CSE). (2009). Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN)

Cooper, C & Findlay, B. (2011). Constructed Wetlands in Water Pollution Control. Cambridge. Cambridge University Press.

Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca. (1993). Por el cual se adopta el reglamento general para el funcionamiento del distrito de riego y drenaje de la Ramada.

Corporación autónoma regional de Cundinamarca, CAR. (2006). Informe del recorrido por el río Bogotá, para la identificación de puntos críticos en su dinámica hidráulica.

Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca. Acuerdo CAR 43. (2006). Objetivos de calidad en la cuenca del Río Bogotá”.

Corporación Autónoma Regional De Cundinamarca. (2010). Informe de calidad del agua del río Bogotá. Documento interno Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible.

Cooper, P. (2009). What can we learn from old wetlands? Lessons that have been learned and some that may have been forgotten over the past 20 years. Elsevier. (246). 11-26.

Curt, M. (2009). Constructed wetlands: A strategy for sustainable wastewater treatment at small treatment works, *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental management* 18 (2): 211 – 235

Departamento Administrativo de Medio Ambiente. (2004). SDA, Proyecto de Descontaminación y Recuperación de la Cuenca del Río Bogotá. Visión, antecedentes, propuestas, planes de desarrollo, esquema regional e inversiones. Bogotá.

Duncan, C & Groffman, P. (1994). Comparing microbial parameters in natural and constructed wetlands. *J. Environ. Qual.* 23, pp 298.

Durán, Z. (2010). Características morfofisiológicas de las aguas de riego. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.

Estrada, G. I. (2010). Humedales artificiales de flujo Subsuperficial (hafss) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Tesis de Pregrado. Universidad tecnológica de Pereira facultad de tecnologías escuela de química. Pereira.

Empresa De Acueducto Y Alcantarillado De Bogotá, Unión Técnica De La Sabana. (2010). Definición de la alternativa a seguir para el tratamiento de las aguas residuales de Bogotá.

Evaluación Ambiental y plan de Gestión Ambiental, Adecuación Hidráulica Y Recuperación Ambiental Río Bogotá. Car. 2010.

Findlay, G. (2002). El proceso de CBR y lechos de juncos de Severn Trent. Curso de Aplicación de Tecnologías Blandas a la depuración de aguas residuales. Proyecto Agua. EGEVASA. Valencia.

Fernández, J., De Miguel, E., Curt, M. (2011). Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación. Fundación Global Nature. Universidad Politécnica de Madrid. p. 31- 39.

Fernández, J. (2001). Filtro autoflotante de macrófitas para la depuración de aguas residuales. Publicado en “El Agua un bien para todos. Conservación, recuperación y usos” (P. Ramos ed). Ed. Universidad de Salamanca. (84). 171-179.

Gil, E. (2009). Remoción y recuperación de metales pesados de aguas residuales industriales. Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. No 18. 34-45

Gale, P., Reddy, K & Graetz, D. (1993). Nitrogen removal from reclaimed water applied to constructed and natural wetland microcosms. *Water Environ.* (65).162-178

García, I & Dorronsoro, C. (2005). Contaminación por metales pesados. Tecnología de suelos. Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Granada, Granada, España. (45).90-110.

Gola, G., Negri, G & Cappeletti, C. (1965). Tratado de Botánica. 2da. edición. Editorial Labor S.A., Barcelona, 1110 p.

González, S. y L. Mejía. (1995). Contaminación con cadmio y arsénico en suelos y hortalizas de un sector de la cuenca del río Bogotá. *Suelos Ecuatoriales* (25). 51-56.

Gopal, B. (1998). Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potencial y problemas. Proceedings 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Brasil.

Gleason, H & Cronquist, A. (1991). Manual Of The Vascular Plants Of Northeastern United States And Adjacent Canada. New York, Estados Unidos. 2a Ed. The New York Botanical Garden. Bronx.

Hijosa, M., Sidrach, R., Cardona, B & Bécares, E. (2012). Comparison of interannual removal variation of various constructed wetland types. *Science of the Total Environment.* (430). 174-183

Hsua, C., Hwey-Lian Hsiehb., Lei Yangc., Sheng-Hai Wua., Jui-Sheng Changd., Shu-Chuan Hsiaoa., Hui-Chen Sue., Chao-Hsien Yehe., Yi-Shen Hof & Hsing-Juh Lina. (2011). Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering*. (37). 1533-1545.

Griffin, P. (2002). Constructed wetlands: A strategy for sustainable wastewater treatment at small treatment works, *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental management* 13 (6): 441 – 446.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1997). Estadísticas del medio ambiente. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente.

Kabata-Pendias, A. (2000). Trace elements in soils and plants. Florida, Estados Unidos. 3a. ed. CRC Press, Boca Raton.

Kadlec, H & Knight, R. (1996). *Treatment wetlands*. Lewis Publishers en CRC press. (95). 893-911

Kuschk, P., Weissner, A., Kossolapov, D.B., Kappelmeyer & U, Stottmeister. (2001). Experimental strategies to investigate the influence of helophytes on the redox reactions in their rhizosphere. ISEB. Meeting Phytoremediation. Leipzig, Germany.

Knowlesa, P., Dotrob, G., Nivalac, J & García, E. (2011). Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. *Ecological Engineering* (37) 99-112.

Lara, J. (1999). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña, Máster en ingeniería y gestión ambiental. Barcelona. 122-130

Lasat, M. (2000). The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil. American Association for the Advancement of Science, Environmental Protection Agency (EPA), Washington DC.

Lind, D., Marchal, S & Wathen, E. (2008). Estadística aplicada a los negocios y la Economía, Decimotercera edición. Editorial Mc. Graw Hill.

Liua, S., Baixing, B & Wang, L. (2011). The layer effect in nutrient removal by two indigenous plant species in horizontal flow constructed wetlands. Ecological Engineering. (37). 2101-2104.

Liua, X., Suiliang Huanga., Tingfangzi Tanga., Xuegong Liub & Miklas Scholzc. (2012). Growth characteristics and nutrient removal capability of plants in subsurface vertical flow constructed wetlands. Ecological Engineering. (44). 189-198.

Llorente, M. & Alvarez, J. (2012). Comparison of Biogenic Methane emissions from unmanaged Estuaries, Lakes, Oceans, Rivers and Wetlands. (10). Atmospheric Environment. 5-31.

Madigan, M., Martinko, J & Parker, J. (2004). Brock. Biología de los microorganismos. Madrid . Editorial Pearson Prentice Hall .

Marín, G. (2006). Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Madrid. Tratamiento y control de calidad de aguas.

Marina, R., Agudelo, C., Jaramillo, M & Peñuela, C. (2011). Comparison of the removal of chlorpyrifos and dissolved organic carbon in horizontal sub-surface and surface flow wetlands. *Science of the Total Environment*. (431). 271-277.

Martinez, A & Visvesvara, G. (1997). Free-living, amphizoic and opportunistic amebas. *Brain Pathol.* (7). 583-595

Mendoza. P. (2006). Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón. Valencia, España. Publicaciones Server. Universidad de Valencia,

Ministerio del Medio Ambiente-Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (2005). Humedales Interiores de Colombia: Bases Técnicas para su Conservación y Uso Sostenible.

Miranda L., Carranza, D & Fischer, G. (2008). Calidad del agua de riego en la Sabana de Bogotá. Tesis de Maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia.

Montenegro, R. (2005). Contaminación química de suelos y cultivos. Estrategias para la productividad de los suelos agrícolas. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Capítulo Tolima, Bogotá.

Moreno, M. (1991). Depuración por lagunaje de aguas residuales. Bogotá. Manual de operadores. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia.

Navarro, J., Aguilar, I & López, J. (2009). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. En: *Revista Ecosistemas*.

Departamento de Biología Vegetal. Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Valencia. (2).10- 24.

Nichols, DS. (1983). Capacity of natural wetlands to remove nutrients from wastewater. J. Water Pollut. Control Fed. (55). 495-505

Ning, N.,Watkins, S., Gawnea, B & Daryl L. Nielsen. (2012) Assessing the potential for using wetlands as intermediary storages to conjunctively maintain ecological values and support agricultural demands. Water research. 115 (4), 15-30.

Novotny, V., Olem, H. (1994) Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution. New York: Van Nostrand Reinhold. 1054.

Nichols, A. (2000). Document Aquatic Macrophyte Community Index. Publicaciones Server. Universidad de Valencia, Valencia, España

Odum, E. (1985). Ecología. Tercera Edición. Editorial Omega. Madrid, España.

Oficina de Transferencia de Tecnología (OTT). 2004. Humedales artificiales, una opción para tratar aguas residuales de poblaciones pequeñas. Disponible en (Internet): <http://www.dicat.csic.es/rdcsic/rdqu19esp.htm>.

Pérez, O., M. & Rojo, C. (2003). Función depuradora de los humedales I: una revisión bibliográfica sobre el papel de los macrófitos. Humedales mediterráneos. (1).115-122.

Reilly, C. (2006). Metal contamination of food. Its significance for food quality and human health. Blackwell Science Ltd., Oxford, UK.

Riss W., Ospina R & Gutiérrez J. (2002). Construction of a biological indication system for aquatic macroinvertebrates of the Savanna of Bogotá. *Caldasia* 24(1): 135- 156.

Roldan, A. (2000). Guía Para El Estudio De Los Macroinvertebrados Acuáticos Del Departamento De Antioquia (Colciencias-Fondo Fen, Bogotá)" En: Colombia 1988. Ed: Presencia *Isbn: 9589129048 V. Pags. 217*

Roldan, A. (2008). Fundamentos De Limnología Neotropical En: Colombia. Ed: Editorial Universidad De Antioquia. 440

Romero, A. (2008). Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. 3 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. 17- 899

Ronald, M & Bartha, R. (2002). Ecología Microbiana y microbiología Ambiental. Madrid, España. Editorial Pearson Cuarta Edición.

Rump, H. & krist, H. (1992). Laboratory manual for the examination of water, waste water and soil. vch.weinheim. 190 pp.

Santos, C & Cambra, J. (2005). Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la directiva Marco del agua. Ministerio del medio ambiente Español.

Stefanakis, A & Tsihrintzis, V. (2012). Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*. (181-182). 416-430.

Sims, A., Horton, H., Gajaraj, Shashikanth., McIntosh, S., Miles, R., Mueller, R., Reed, R & Hu, Z. (2012). Temporal and spatial distributions of ammonia-oxidizing archaea and bacteria and their ratio as an indicator of oligotrophic conditions in natural wetlands. *Water research*. 100 (2), 1-9.

Shelef, O., Gross, A & Rachmilevitch, S. (2012). The use of *Bassia indica* for salt phytoremediation in constructed wetlands. *Water research*. 112 (3), 20-29.

Rzedowski, G. & Rzedowski, J. (2001). *Flora Fanerogámica Del Valle De México*. 2a Michoacán, México. Ed. Instituto De Ecología Y Comisión Nacional Para El Conocimiento Y Uso De La Biodiversidad.

Rzedowski, G. & Rzedowski, J. (2001). *Manual De Malezas De La Región De Salvatierra, Guanajuato*. En: Rzedowski, J. Y G. Calderón De R. (Eds.).

Otálora, R. (2011). *Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de caño Gandúl*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería Química. Bogotá

Price, Michael. (2003). *Agua subterránea*. México. Editorial Limusa.

Riss, E. (2002). *Evaluación de la calidad del agua*. Madrid, España. Editorial Pearson Sexta Edición.

Serrano, J; García; C & Hernández, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial* (Disponible en internet): [https://upcommons.upc.edu/eprints/bitstream/2117/2474/1/JGarcia_and_Acorzo .pdf](https://upcommons.upc.edu/eprints/bitstream/2117/2474/1/JGarcia_and_Acorzo.pdf)

Sánchez, R & Lugo, A. (1993). Protozoos en lechos de raíces. Cienc. y tecnol. 15, pp18.

Shutes, B. (1998). Rooting out pollution: is natural treatment sustainable?. Inagural lecture. England. Middlesex University.

Simpson, R. (2009). Dynamics of nitrogen, phosphorus, and heavy metals in Delaware River freshwater tidal wetland. U.S. Environmental Protection Agency, Final Report, Corvallis Environmental Research Lab, Corvallis, OR.

Smith, S. (2009). *Experimental and natural hybrids in North American Typha* (Typhaceae). The American Midland Naturalist. (78).257-287.

Tanga, Y., Wanga, L., Jia, Y., Li, J., Zhanga, W., Wanga, H & Sunb, Y. (2011). Response of soil microbial respiration of tidal wetlands in the Yangtze River Estuary to different artificial disturbances. Ecological Engineering. (37), 1638-1646

Tebbutt, T. (2002). Fundamentos de control de la calidad de agua. México. Editorial Limusa.

Wang, H., Wang, R., Yub, Y., Mitchell, M & Zhang, L. (2011). Soil organic carbon of degraded wetlands treated with freshwater in the Yellow River Delta, China. Journal of Environmental Management. (92). 2628-2633.

Water treatment solutions. (2010). Protocolo de manejo de aguas Universidad Javeriana: Alcaldía Mayor De Bogotá, Secretaria Distrital De Ambiente: Empresa De Acueducto Y Alcantarillado De Bogotá, 2010. Calidad del sistema hídrico de Bogotá. -- 1a ed. -- Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

Welza, P., Ramondb, J., Cowanb, D., Prinsa, A & Burton, S. (2011). Ethanol degradation and the benefits of incremental priming in pilot-scale constructed wetlands. *Ecological Engineering*. (37). 1453-1459.

Withey, P & Cornelis van Kooten, G. (2011). The effect of climate change on optimal wetlands and waterfowl management in Western Canada. *Ecological Economics*. (70) 798-805.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2000). Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Office of Research and Development. Cincinnati. 12- 97.

U.S. Environmental Protection Agency Constructed Treatment Wetlands. EPA 843-F-03-013. Office of Water. August 2008. (Disponible en internet): <http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/ConstructedW.pdf>

United States Environmental Protection Agency. (2000). Wetlands: Subsurface flow. Wastewater. Technology. Fact Sheet EPA 832-F-00- 023.

Vargas, O. y Mejía, L (2005). Evaluación de la contaminación por Hg y Pb en suelos hortícolas de la cuenca alta del río Bogotá y del efecto del Hg y Pb de las aguas de riego y de suelos en varias hortalizas. Universidad Nacional de Colombia, Cartagena, Colombia II Simposio Internacional de Geoquímica Ambiental. Ingeominas.

Vargas, O. & L. Mejía. (2005). Evaluación de la contaminación por Hg y Pb en suelos hortícolas de la cuenca alta del río Bogotá y del efecto del Hg y Pb de las aguas de riego y de suelos en varias hortalizas. II Simposio Internacional de Geoquímica Ambiental. Ingeominas, Universidad Nacional de Colombia, Cartagena, Colombia

Vega , R. & González, J. (1984). Estudio De Las Posibilidades De Agua Subterránea En El Área De Chía. Trabajo De Grado. Departamento De Geología. Universidad Nacional De Colombia, Bogotá.

Vélez, O, M. (2010). Mecanismos de limpieza de aguas residuales. Tesis de Maestría. Facultad de ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá

Water Research Commission (South Africa). (2002). Constructed wetlands: The answer to small scale wastewater treatment in South Africa.

Water treatment solutions. (2010). Protocolo de manejo de aguas. Fact Sheet EPA 832-F-00- 023. Disponible en Internet. Office of Research and Development. Cincinnati. 2000. p. 12- 97. EPA/625/R-99/010. Office of Research and Development. Cincinnati. 2000. p. 12-97. EPA/625/R-99/010.

Wildeman, T. (2003). Wetland Design for Mining Operations: Bitech Public Richmond, B.C

Zambrano, F. (2000). Bogotá y su región. Una mirada de larga duración. En: memorias del foro S.O.S., sabana de Bogotá, Bogotá. Corporación autónoma regional de Cundinamarca.

Zayed, A., E. Lytle, and N. Terry. (2008). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. Environ. Quarterly, (27).715-727

Zayed, A., E. Lytle, & N. Terry. (2008). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. Environ. Quarterly, (27).715-728

ANEXOS

Anexo 1: Hoja de muestreo de macrófitas acuáticas.

<i>HOJA DE CAMPO PARA MACRÓFITOS ACUÁTICOS</i>					
Río		Colector			
Subcuenca		Fecha			
Localidad - Municipio		Hora			
Estación		Anchura			
Profundidad		Coordenadas			
<i>Organismo/Cobertura</i>	<i>Rara</i>	<i>Ocasional</i>	<i>Frecuente</i>	<i>Abundante</i>	<i>Dominante</i>

<i>ESQUEMA DE COBERTURA</i>

<i>COMENTARIOS</i>
<i>MUESTRA TOMADAS SI NO</i>

presenta a continuación:

	<i>ABUNDANCIA DE CADA ESPECIE</i>	<i>PORCENTAJE DE COBERTURA</i>
<i>ESCALA</i>	<i>DESCRIPTOR</i>	<i>CLASE</i>
<i>1</i>	<i>Rara</i>	<i>Individuos aislados</i>
<i>2</i>	<i>Ocasional</i>	<i>1-10%</i>
<i>3</i>	<i>Frecuente</i>	<i>10-50%</i>
<i>4</i>	<i>Abundante</i>	<i>50-70%</i>
<i>5</i>	<i>Dominante</i>	<i>>70%</i>

ANEXO 2: Registro de crecimiento de macrófitas.

Ind. 1	<i>E. crassipes</i> / VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
C E	Roseta	7	7	7	7	7	8	8	8
	Hoja	3	3	3	4	4	4	4	5
	Raíz longitud	10	10	10	10	12	12	12	12
	Peciolo longitud	11	11	11	11	11	11	11	11
	Peciolo ancho	3	3	4	4	5	5	5	5
A-P	Floración	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Necrosis	A	A	P. Pc-H	P. Pc-H	P. Pc-H	P. Pc-H	P. Pc-H	P-T-H
A-P	Clorosis	A	A	A	P	P	A	A	A
gr	Peso húmedo	302.5	302.7	305.6	305.7	306.8	306.9	307.1	308.2
°C	Temperatura agua	17	18	17	17	16	15.5	16.5	16
A. Ausente P. Presente T. Tallo H. Hoja Pc. Peciolo.									

Ind. 2	<i>E. crassipes</i> / VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
C E	Roseta	7	7	7	7	9	10	12	12
	Hoja	5	5	7	7	9	9	12	13
	Raíz longitud	12	12	12	12	12	12	13	13
	Peciolo longitud	10	10	10	10	10	10	10	10
	Peciolo ancho	7	7	7	7	7	7	7	7
A-P	Floración	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Necrosis	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Clorosis	P	P	P	P	P	P	A	A
gr	Peso húmedo	440.3	440.9	444.0	480.2	486.4	486.9	488.2	483.0
°C	Temperatura agua	17	18	17	17	16	15.5	16.5	16

Ind 3	<i>E. crassipes</i> / VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
C E	Roseta	2	2	2	2	4	4	4	4
	Hoja	3	4	4	5	5	5	5	5
	Raíz longitud	5	5	5	5	5	5	5	5
	Peciolo longitud	3	3	3	3	3	3	4	4
	Peciolo ancho	5	5	5	5	5	5	5	5
A-P	Floración	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Necrosis	A	P. Pc-H	P. Pc-H	P-T-H				
A-P	Clorosis	P	P	P	P	P	P	A	A
gr	Peso húmedo	369.0	369.0	369.0	369.0	369.0	369.0	369.2	369.3
°C	Temperatura agua	17	18	17	17	16	15.5	16.5	16

Ind. 4	<i>E. crassipes/</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
C r e c i m i e n t o	Roseta	5	5	5	5	6	6	6	6
	Hoja	3	3	3	4	4	4	4	5
	Raíz longitud	10	10	10	10	12	12	12	12
	Peciolo longitud	9	9	9	10	10	10	10	10
	Peciolo ancho	4	4	4	4	5	5	5	5
A-P	Floración	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Necrosis	A	A	P. Pc-H	P. Pc-H	P. Pc-H	P. Pc-H	P. Pc-H	P-T-H
A-P	Clorosis	A	A	A	P	P	P	A	A
gr	Peso húmedo	389.0	389.7	389.7	389.7	389.7	389.7	389.7	389.7
°C	Temperatura agua	17	18	17	17	16	15.5	16.5	16

Ind. 1	<i>Scirpus. Spp</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
C r e c i m i e n t o	Tallo Longitud	110	110	110	110	110	111	113	113
	Tallo grosor	5,4	5,4	5,4	5,6	6,3	6,8	7,2	7,9
	Raíz longitud	8	8	8,2	8,3	8,3	8,6	8,9	9,6
	Rizoma	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9	0,9
	Hojalongitud	14	14	14	14	14	14	14	14
	Peciolo ancho	5	5	5,7	5,9	6	6,4	6,5	6,7
A-P	Floración	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Necrosis	P	P	P	P	A	A	A	A
A-P	Clorosis	P	P	P	A	A	A	A	A
gr	Peso húmedo	77,8	80,3	80,4	80,7	80,9	90,5	91	93,6
°C	Temperatura agua	17	18	17	17	16	15.5	16.5	16

Ind. 2	<i>Scirpus. Spp</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
cm Crecimiento	Tallo Longitud	160	160	160	160	160	163	163	163
	Tallo grosor	7	7	7	7,6	7,8	8	8	8
	Raíz longitud	11	11	11	11	12	12	12	13
	Rizoma	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	10
	Hojalongitud	14	14	14	14	14	14	14	14
	Peciolo ancho	7	7	7,4	7,7	7,9	8	8,2	8,5
A-P	Floración	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Necrosis	P	P	P	P	A	A	A	A
A-P	Clorosis	P	P	P	A	A	A	A	A
gr	Peso húmedo	133	135	135,7	136,3	136,4	136,6	137,3	137,7
°C	Temperatura agua	17	18	17	17	16	15.5	16.5	16

Ind. 3	<i>Scirpus. Spp</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
cm Crecimiento	Tallo Longitud	33,5	33,5	34	36,8	36,7	36,7	37,5	37,9
	Tallo grosor	2,4	2,6	2,8	3,2	3,6	4,6	4,9	5,7
	Raíz longitud	5	5,6	5,8	6,6	6,9	7,4	7,8	8,3
	Rizoma	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	Hojalongitud	11	12,4	12,9	13,3	13,4	13,7	13,9	13,5
	Peciolo ancho	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,6	2,9	3,6
A-P	Floración	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Necrosis	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Clorosis	A	A	A	P	P	A	A	A
gr	Peso húmedo	67,9	70,4	72,1	74,4	77,2	80,8	90,3	90,3
°C	Temperatura agua	17	18	17	17	16	15.5	16.5	16

Ind. 4	<i>Scirpus. Spp</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
cm	Crecimiento Tallo Longitud	30,4	30,8	33,5	37,2	37,9	39,6	40,2	42,9
	Tallo grosor	2,5	2,8	2,9	2,9	3,6	3,8	3,88	4,3
	Raíz longitud	5	5	6,4	7	7,8	9,3	10,5	11,4
	Rizoma	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	Hoja longitud	11,4	12,5	12,5	12,8	12,9	12,9	13	13
	Peciolo ancho	1	1,3	1,5	2,5	2,9	3,3	3,8	3,9
A-P	Floración	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Necrosis	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Clorosis	A	A	A	P	P	A	A	A
gr	Peso húmedo	140,2	144	144,6	148,3	150,4	153,2	155,8	156,8
°C	Temperatura agua	17	18	17	17	16	15.5	16.5	16

Ind 5	<i>Scirpus. Spp</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
cm	Crecimiento Tallo Longitud	40,3	40,5	42,5	44,3	44,6	44,9	45,2	45,7
	Tallo grosor	4,2	4,6	4,8	5,3	5,9	6,3	6,7	6,9
	Raíz longitud	7,3	7,7	7,8	8,1	8,5	8,4	8,9	8,9
	Rizoma	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9
	Hojalongitud	13,7	13,9	14,3	14,5	14,7	14,9	15,3	15,8
	Peciolo ancho	3,3	3,7	3,9	4,5	4,9	5,5	5,8	5,9
A-P	Floración	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Necrosis	A	A	A	A	A	A	A	A
A-P	Clorosis	A	A	P	P	P	P	A	A
gr	Peso húmedo	220,3	225,7	225,9	226,9	232,2	233,4	235,6	237,9
°C	Temperatura agua	17	18	17	17	16	15.5	16.5	16

Anexo 3: Registro de crecimiento de Espinaca. *Spinacia oleracea*

INDIVIDUO	INDIVIDUO 1								
	<i>Spinacia o</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
Crecimiento (Cm)	Número de hojas	2	3	3	4	4	4	5	6
	Área foliar	2,1	3,8	4,4	5,6	6,5	7,2	7,7	8,2
	Altura	2	2	4	4	5	6	7	7
	Raíz longitud	1,5	1,8	1,9	2,7	2,9	3,5	3,7	4,6
Peso (gr)	Masa fresca total	223	250	338	357	389	399	410	423
	Área foliar	2	2	3	3	5	5	5	5
A-P	Necrosis	A	P	P	P	A	A	A	A
A-P	Clorosis	A	A	A	A	A	A	A	A

INDIVIDUO	INDIVIDUO 2								
	<i>Spinacia o</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
Crecimiento (Cm)	Número de hojas	2	3	3	3	4	5	6	8
	Área foliar	2,8	3,4	3,8	6,7	6,9	7,3	7,8	8,9
	Altura	2	3	5	5	6	7	7	8
	Raíz longitud	2,5	2,6	2,8	3,9	4,1	4,8	5,3	6,5
Peso (gr)	Masa fresca total	278	298	312	348	378	387	413	456
	Área foliar	5	5	6	6	7	7	7	7
A-P	Necrosis	P	P	A	A	A	A	A	A
A-P	Clorosis	P	P	A	A	A	A	A	A

INDIVIDUO	INDIVIDUO 3								
	<i>Spinacia o</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
Crecimiento (Cm)	Número de hojas	3	5	6	9	10	12	14	14
	Área foliar	5,3	6,8	7,6	7,9	8,3	8,6	8,9	9,5
	Altura	5	5	5	5	7	7	9	9
	Raíz longitud	1,5	1,8	1,9	2,7	2,9	3,5	3,7	4,6
Peso (gr)	Masa fresca total	223	250	338	357	389	399	410	423
	Área foliar	2	2	3	3	5	5	5	5
A-P	Necrosis	A	A	A	A	A	P	A	A
A-P	Clorosis	P	P	A	P	A	A	A	A

INDIVIDUO	INDIVIDUO 4								
	<i>Spinacia o</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
Crecimiento (Cm)	Número de hojas	2	3	3	3	4	4	5	6
	Área foliar	2	3,5	3,8	4,2	5,2	6,1	6,6	7,2
	Altura	1	1	1,3	2,5	3,1	3,2	4,5	5,3
	Raíz longitud	1,6	2,4	2,9	3,1	3,7	4,7	4,9	5,8
Peso (gr)	Masa fresca total	120	136	145	156	215	267	276	287
	Área foliar	3	3	3	4,5	4,7	5,9	6,3	6,9

A-P	Necrosis	A	A	A	A	P	A	A	A
A-P	Clorosis	P	P	A	P	A	A	A	A

INDIVIDUO	INDIVIDUO 5								
	<i>Spinacia o</i> VARIABLE	DIA 0	DIA 1	DIA 3	DIA 6	DIA 9	DIA 12	DIA 15	DIA 18
Crecimiento (Cm)	Número de hojas	2	2	2	3	5	9	9	12
	Área foliar	0,6	0,6	0,6	0,12	0,12	1,15	1,2	2,3
	Altura	1	1	1	2,3	2,6	2,8	3,3	4,9
	Raíz longitud	0,3	0,4	0,4	1,15	1,23	1,25	1,45	1,56
Peso (gr)	Masa fresca total	24	35	65	98	115	123	127	134
	Área foliar	1,3	1,5	1,5	2,3	2,5	2,7	2,8	3,3
A-P	Necrosis	P	P	A	A	A	A	A	A
A-P	Clorosis	A	A	A	P	P	A	P	A

ANEXO 4: Resultados de calidad de 22 fincas.

El grupo CEPARIUM del Programa de Bacteriología de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca ha estado trabajando con microorganismos de importancia en plantas. Por ser un Programa que trabaja para la salud humana, no solo se preocupa por ayudar al médico a identificar una enfermedad en el hombre sino que también trabaja en el diagnóstico de la salud en animales con veterinarios y plantas con Ingenieros Agrónomos y agricultores, pues el ambiente que rodea al ser humano también influye en su salud y calidad de vida.

Igualmente, la calidad del agua es nuestra preocupación y por lo tanto los microorganismos que se encuentran en ella y el posible efecto que tienen como patógenos para plantas, animales y personas, nos han llevado a realizar un estudio en el cual requerimos de su colaboración para conocer las condiciones de los cultivos que ustedes manejan en su finca como alternativa económica para su calidad de vida.

A continuación se le realizarán unas preguntas las cuales serán consignadas en este formulario. Al final le agradecemos verificar que todo lo que usted ha respondido este claramente consignado y nos confirme con su nombre o firma que hicimos la interpretación correcta de sus respuestas.

DATOS DEL CULTIVO

Área _____ metros ____ Hectáreas ____
Identificación del Sistema de riego _____

TIPO DE RIEGO	Consumo aproximado de agua en mts ³ /día	Fuente principal de agua	Componentes del sistema de riego	Profundidad a la cual se toma el agua del río	Flujo aproximado del agua/hora
Riego por superficie					
Riego por aspersión					
Riego por microaspersión					

Riego por goteo					
Riego subterráneo					

Identificación del cultivo

TIPO DE VARIEDAD VEGETAL	AREA SEMBRADA EN METROS CUADRADOS	ENFERMEDADES IDENTIFICADAS EN EL CULTIVO POR EL CULTIVADOR	FERTILIZACIÓN QUE USA EN EL CULTIVO	PLAGUICIDAS QUE USA EN EL CULTIVO

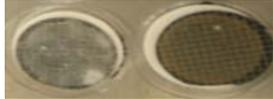
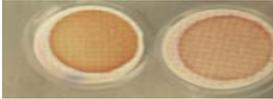
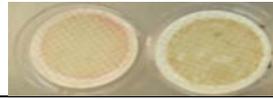
Grupo de trabajadores que tengan contacto con el agua de riego

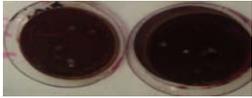
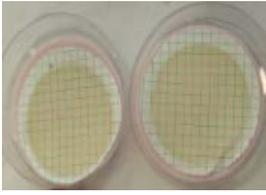
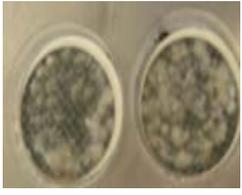
TRABAJADORES QUE MANEJAN AGUA DE RIEGO	EDAD	GENERO M/F	Tiene usted contacto directo con el agua que utiliza para el riego? SI/NO Cúal?	Presenta o ha presentado lesiones en manos u otras partes del cuerpo SI/NO	Descripción de las lesiones	Alguna vez ha tomado agua de riego o ha lavado algún utensilio en los que consume alimento mientras realiza su trabajo	Después de haber utilizado el agua como bebida o para lavar utensilios ha presentado diarrea o vómito SI/NO SIEMPRE/ALGUNAS VECES/NUNCA
TRABAJADOR 1							
TRABAJADOR 2							
TRABAJADOR 3							
TRABAJADOR 4							
TRABAJADOR 5							
TRABAJADOR 6							
TRABAJADOR 7							
TRABAJADOR 8							
TRABAJADOR 9							
TRABAJADOR 10							

 Nombre del Entrevistador
 entrevistado

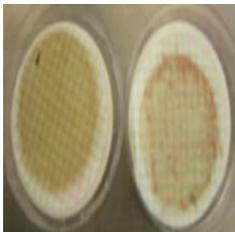
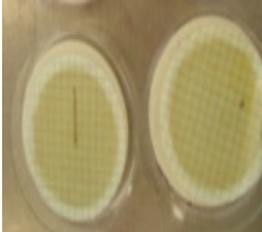
 Nombre o firma del

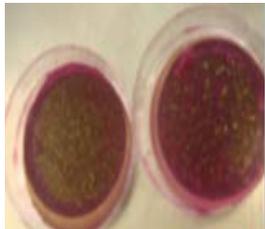
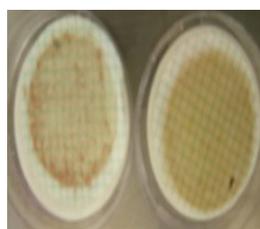
Anexo 4. Resultados de la calidad del agua de riego en las 22 fincas del Muestreo previo al estudio.

UBICACIÓN DE MUESTREO	FILTRACION DE MEMBRANA				
CHOCONTA	AGAR ENDO	AGAR CETRIMIDE	AGAR SABOURAUD	AGAR ESTÁNDAR	NEMATODOS
<i>El Rosal - Fresas</i>					
Entrada	incontables colonias cremosas rosadas	20 colonias amarillas verdosas pequeñas, poca fluorescencia	incontables colonias naranjas cremosas e incontables blancas cremosas incontables algodonosas una colonia blanca de consistencia dura	colonias rosadas y amarillas cremosas incontables	No se observaron estructuras similares a nematodos,
Fotografías					
posible identificación	posible <i>Erwinia sp.</i>	posible <i>Pseudomona Sp.</i>	<i>Scedosporium sp.</i> , y levaduras	posible <i>Pseudomona</i> y/o <i>Xantomona sp.</i> Esporulados <i>Corynebacterium sp.</i>	No se observaron estructuras similares a nematodos,
descripción microscópica gram (endo), observación cámara fluorescencia (cetrimide) azul lactofenol(sabureaud), directo (nematodos)	cocobacilos Gram negativos	Bacilos Gram negativos		Bacilos Gram negativos en cadena (rosadas) y Bacilos Gram negativos Esporulados	
Salida	incontables colonias rosadas y incontables colonias cremosas incoloras	35 colonias amarillas verdosas pequeñas, con fluorescencia	incontables colonias rojas cremosas pequeñas y blancas cremosas incontables pequeñas	colonias amarillas incontables cremosas	<i>Estomatoestelite</i> delgada, hialino, cuerpo agudo, no observación de cola.
fotografías					
posible identificación	posible <i>Erwinia Sp.</i>	Posible <i>Pseudomona sp.</i>	levaduras	Posible <i>Corynebacterium sp.</i>	<i>Meloidogyne sp.</i>
Descripción microscópica gram (endo), observación cámara fluorescencia (cetrimide) azul lactofenol(sabureaud), directo (nematodos)	cocobacilos Gram negativos	Bacilos Gram negativos		bacilos Gram positivos esporulados	
	FILTRACION DE MEMBRANA				

EL LAUREL - FRESAS	AGAR ENDO	AGAR CETRIMIDE	AGAR SABOURAUD	AGAR ESTÁNDAR	NEMATODOS
Entrada	incontables colonias verdes brillo metalico e incontables colonias rojas opacas	incontables colonias biege cremosas, con poca fluorescencia	incontables colonias rojas incontables colonias transparentes colonia blanca dura abundantes colonias amarillas algodonosas	colonias negras y amarillas incontables	Estomato estelite delgada, hialino, cuerpo agudo, no observación de cola.
fotografías					
posible identificación	posibles <i>E. coli</i> y <i>Erwinia</i> sp.	posible <i>Pseudomona</i> Sp.	levaduras y <i>Phytium</i> sp.	posible <i>Pseudomona</i> y/o <i>Xantomona</i> sp. Posible <i>Corynebacterium</i> sp.	<i>Meloidogyne</i> sp.
Descripción microscopica gram (endo), observacion camara fluorescencia (cetrimide) azul lactofenol(sabureaud), directo (nematodos)	bacilos Gram negativos	cocobacilos Gram negativos		Cocobacilos Gram negativos (negras) y bacilos Gram positivos esporulados	
Salida	sin crecimiento	incontables colonias biege cremosas, con poca fluorescencia	incontables colonias rojas incontables colonias transparentes colonia blanca dura abundantes colonias amarillas algodonosas	colonias negras y amarillas incontables	Estomatoestelite. Cuerpo ovoide, largo con cola fina en punta con un estilete robusto delgada, hialino, cuerpo agudo, no observacion de cola.
Fotografías					
posible identificación	sin crecimiento	posible <i>Pseudomona</i> Sp.	levaduras y <i>phytium</i> sp	posible <i>Pseudomona</i> y/o <i>Xantomona</i> sp. Posible <i>Corynebacterium</i> sp.	<i>Meloidogyne</i> sp. Y <i>Heterodera</i> spp.
descripción microscopica gram (endo), observacion camara fluorescencia (cetrimide) azul lactofenol(sabureaud), directo (nematodos)	sin crecimiento	cocobacilos Gram negativos		Cocobacilos Gram negativos (negras) y bacilos Gram positivos esporulados	

UBICACIÓN DE MUESTREO	FILTRACION DE MEMBRANA				
Suesca. La puerta de Oro	AGAR ENDO	AGAR CETRIMIDE	AGAR SABOURAUD	AGAR ESTÁNDAR	NEMATODOS
Entrada	2 colonias verdes brillantes grandes, 2 colonias cremosas rosadas palidas y 10 colonias cremosas rosadas pequeñas 3 cremosas rojas grandes	7 colonias cremosas amarillas grandes	incontables colonias algodonosas blancas, 3 colonias algodonosas amarillas y 16 colonias cremosas blancas	71 colonias cremosas amarillas pequeñas y 2 colonias cremosas blancas palidas	No se observaron estructuras similares a nematodos,
fotografías					
posible identificación	Erwinia Carotovora, E. coli y otras fermentadoras	posible Xantomona o Pseudomona	colonia blanca algodonosa, Scedosporium sp., algodonosas amarillas Phytium y cremosas blancas posible bacteria	posibles Clavivacter y Pseudomona	No se observaron estructuras similares a nematodos,
Descripción microscópica gram (endo), observacion cámara fluorescencia (cetrimide) azul lactofenol(sabureaud), directo (nematodos)	cocobacilos Gram negativos y Bacilos Gram negativos	Bacilos Gram negativos		Bacilo Gram positivos no esporulados (amarillas) y cocobacilos Gram negativos	
salida	16 colonias rojas pequeñas	incontables colonias cremosas incoloras	2 colonias algodonosas blancas, 6 colonias algodonosas amarillas, 1 colonia cremosa verde y 10 colonias cremosas blancas	70 colonias cremosas blancas palidas pequeñas	No se observaron estructuras similares a nematodos,
fotografías					
posible identificación	Posible Erwinia	posible Pseudomona	Algodonosas blancas Scedosporium sp., algodonosas amarillas Phytium cremosa verde Aspergillus, cremosas blancas bacteriana	posible Pseudomona	No se observaron estructuras similares a nematodos,
descripcion microscopica gram (endo), observacion camara fluorescencia (cetrimide) azul lactofenol(sabureaud),	cocobacilos Gram negativos	Bacilos Gram negativos		Cocobacilos Gram Positivos	

UBICACIÓN DE MUESTREO					
SESQUILE. La puerta de Oro	FILTRACION DE MEMBRANA				
sesquile	AGAR ENDO	AGAR CETRIMIDE	AGAR SABOURAUD	AGAR ESTÁNDAR	NEMATODOS
frescuras del campo-calabacin					
Entrada	incontables colonias verdes brillantes e incontables colonias rojas opacas	incontables colonias cremosas amarillas pequeñas	incontables colonias algodonosas blancas, 10 colonias duras verdes, 2 colonias cremosas cafes y 1 colonia algodonosa amarilla	abundantes colonias cremosas amarillas pequeñas	No se observaron estructuras similares a nematodos, hay presencia de mosquitos verdes
fotografias					
posible identificacion	Erwinia Carotovora, E. coli y otras fermentadoras	posible Xantomona o Pseudomona	colonia blanca algodonosa, Scedosporium sp., algodonosas amarillas Phytium, Duras verdes Alternaria y cremosas cafes posible bacteria	posibles Clavivacter y Pseudomona	No se observaron estructuras similares a nematodos.
descripcion microscopica gram (endo), observacion camara fluorescencia (cetrimide) azul lactofenol(sabureaud), directo (nematodos)	bacilos Gramn negativos pequeños y	Bacilos Gram positivos no esporulados		Bacilos Gram positivos no esporulados	
salida	incontables colonias verdes brillantes y 52 colonias rosadas opacas	incontables colonias cafes pequeñas e incontables colonias cremosas amarillas pequeñas	abundantes colonias algodonosas blancas, 5 colonias algodonosas amarillas y 1 colonia algodonosa verde	abundantes colonias cremosas amarillas pequeñas	No se observaron estructuras similares a nematodos, hay presencia de mosquitos verdes

fotografías					
posible identificación	Posibles E. coli y Erwinia Sp	posible Pseudomona y esporas de hongos	Algodonosas blancas Scedosporium sp., algodonosas amarillas Phytium y Algodonosa verde Alternaria sp.	posible Pseudomona	No se observaron estructuras similares a nematodos.
descripcion microscopica gram (endo), observacion camara fluorescencia (cetrimide) azul lactofenol(sabureaud), directo (nematodos)	bacilos Gramn negativos pequeños y cocobacilos Gram negativos	Cocobacilos Gram negativos (café) y Bacilos Gram positivos no esporulados (amarillas)		Bacilos Gram positivos no esporulados	

Anexo 5: Informe metales pesados. Agua sin tratamiento.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
INSTITUTO DE ENSAYOS E INVESTIGACIONES
LABORATORIO DE INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS

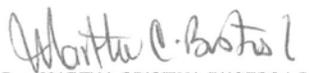


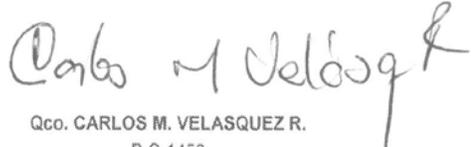
INFORMACIÓN DEL CLIENTE			
Cliente:			
Empresa:			ANALISIS N°: 30154
Persona a contactar:	SR. GERMÁN MELO QUINTANA	Cotizacion N°:	264
Dirección / Ciudad:	CRA. 102 B No. 148- 40 CASA 136	Orden de trabajo:	200
Tel: Fijo/Fax/Movil:	4712514	Recibida por:	
Fecha de Registro:	4/09/2012	Fecha de Entrega:	17/09/2012

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
Municipio:	CHÍA	Departamento:	CUNDINAMARCA
Procedencia:	AGUA SIN TRATAR		
Punto de Captación:	POZO		
Fecha de Muestreo:	4/09/2012	TIPO MUESTRA:	AGUA CRUDA

RESULTADOS			
Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Mercurio	mg/L	Absorción Atómica	<0,003
Plomo	mg/L	Absorción Atómica	<0,05
Arsénico	mg/L	Absorción Atómica	<0,003
Cadmio	mg/L	Absorción Atómica	<0,01

OBSERVACIONES
 La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervisión del mismo


Dra. MARTHA CRISTINA BUSTOS LOPEZ
 Coordinador Laboratorio Ing Ambiental


Qco. CARLOS M. VELASQUEZ R.
 P.Q 1450

Anexo 5: Informe metales pesados. Agua con tratamiento.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
INSTITUTO DE ENSAYOS E INVESTIGACIONES
LABORATORIO DE INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS

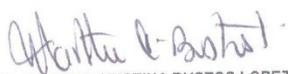


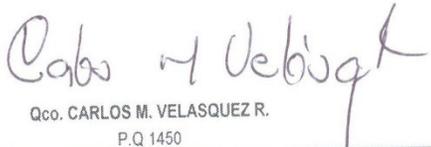
INFORMACIÓN DEL CLIENTE			
Cliente:		ANÁLISIS N°:	30155
Empresa:		Cotización N°:	264
Persona a contactar:	SR. GERMÁN MELO QUINTANA	Orden de trabajo:	200
Dirección / Ciudad:	CRA. 102 B No. 148-40 CASA 136	Recibida por:	
Tel: Fijo/Fax/Movil:	4712514	Fecha de Entrega:	17/09/2012
Fecha de Registro:	4/09/2012		

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
Municipio:	CHÍA	Departamento:	CUNDINAMARCA
Procedencia:	AGUA TRATADA		
Punto de Captación:	POZO	TIPO MUESTRA:	AGUA TRATADA
Fecha de Muestreo:	4/09/2012		

RESULTADOS			
Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Mercurio	mg/L	Absorción Atómica	<0,003
Plomo	mg/L	Absorción Atómica	<0,05
Arsénico	mg/L	Absorción Atómica	<0,003
Cadmio	mg/L	Absorción Atómica	<0,01

OBSERVACIONES
 La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervisión del mismo


 Dra. MARTHA CRISTINA BUSTOS LOPEZ
 Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental


 Qco. CARLOS M. VELASQUEZ R.
 P.Q 1450



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
INSTITUTO DE ENSAYOS E INVESTIGACIONES
LABORATORIO DE INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE			
Cliente:		ANÁLISIS N°:	30155
Empresa:		Cotización N°:	254
Persona a contactar:	SR. GERMAN MELO QUINTANA	Orden de trabajo:	200
Dirección / Ciudad:	CRA. 102 B No. 146-40 CASA 138	Recibida por:	
Tel: Fijo/Fax/Movil:	4712514	Fecha de Entrega:	17/09/2012
Fecha de Registro:	4/09/2012		

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
Municipio:	CHÍA	Departamento:	CUNDINAMARCA
Procedencia:	AGUA TRATADA		
Punto de Captación:	POZO	TIPO MUESTRA:	AGUA TRATADA
Fecha de Muestreo:	4/09/2012		

RESULTADOS			
Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Mercurio	mg/l	Absorción Atómica	<0.003
Ploomo	mg/l	Absorción Atómica	<0.05
Arsénico	mg/l	Absorción Atómica	<0.003
Cadmio	mg/l	Absorción Atómica	<0.01

C:\Users\GERM
2\metales 2 002

Mártha Cristina Bustos López
Dra. MÁRTHA CRISTINA BUSTOS LOPEZ

Carlos M. Velásquez R.
Dco. CARLOS M. VELASQUEZ R.
P.Q. 1450

