

BIOSISTEMA INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.  
DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN

ÁNGELA MARÍA ARANGO GARTNER

UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE  
MANIZALES  
2007

BIOSISTEMA INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.  
DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN

ÁNGELA MARÍA ARANGO GARTNER

Trabajo presentado como requisito para optar al título de  
Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Director  
I.Q. Nelson Rodríguez Valencia  
Candidato a Doctor en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE  
MANIZALES  
2007

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Manizales, Julio de 2007

A Dios, por su Omnipresencia

A mis padres Diego y Amparo, por ser mi principio y mi fin

A Juan David, por creer en mi.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Corporación Autónoma Regional de Caldas, CORPOCALDAS.

Al Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFÉ.

Al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agroquímicos y Aguas, MULTILAB AGROANALÍTICA.

A Heliconias El Rosario.

Al Ingeniero Químico, Candidato a Doctor en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Nelson Rodríguez Valencia.

Al Ingeniero Químico, Especialista en Estadística, Diógenes Ramírez.

Al Doctor José Fernando Gutiérrez Jaramillo.

Al Señor Uriel López Posada.

A las Bacteriólogas Ana Delia Gaona Ferro y Mónica María Jiménez Muñoz, Profesionales del Laboratorio Ambiental de CORPOCALDAS.

Finalmente, a mis familiares, amigos y a todas las personas que me colaboraron en la realización de este trabajo.

**BIOSISTEMA INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS  
DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN**

## RESUMEN

En el presente estudio se diseñó, construyó y evaluó un biosistema de tratamiento de aguas residuales domésticas a pequeña escala, utilizando una combinación de sistemas de humedales de flujo libre y flujo subsuperficial, realizando un aprovechamiento de los residuos generados en la depuración.

Se evaluó la remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Suspendidos Totales, Nitrógeno, Fósforo y Patógenos realizada por el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) en el humedal de flujo libre y de la *Heliconia* en el humedal de flujo subsuperficial, además se determinó el crecimiento del material vegetal utilizado y se evaluó el lombricompostaje como una ecotecnología para el aprovechamiento de dicho material.

Las aguas residuales domésticas provenientes de la cocina, el lavadero y las duchas (aguas grises), fueron canalizadas y llevadas a una recámara donde se retienen elementos gruesos y metales que puedan entrar al sistema, se homogenizan y se reparten a las trampas de grasas (dos ubicadas en paralelo). Después de ser retirada la grasa, las aguas pasan a otra recámara donde se mezclan con las aguas provenientes de los sanitarios (aguas negras) para luego pasar a los tanques sépticos (tres ubicados en paralelo), donde sólidos en suspensión se descomponen por procesos anaeróbicos formando más líquidos, los lodos que van al fondo y natas flotan. Posteriormente las aguas son recogidas en una última recámara para ser llevadas al humedal de flujo libre y luego a los humedales de flujo subsuperficial para terminar de ser depuradas.

El biosistema fue monitoreado periódicamente, realizando análisis físico químicos a las aguas residuales, luego de alcanzado el estado estable se realizaron cuatro (4) monitoreos. Como criterio de estado estable se estableció que la variación de la remoción de DBO<sub>5</sub> entre la entrada y salida del sistema de humedales fuera menor del 4%.

En el caso del humedal de flujo libre se sembraron *E. crassipes* y *P. stratiotes* de manera que cubrieran el 75% del área superficial efectiva, lo que representó 50 kg de *E. crassipes* y 4 kg de *P. stratiotes* y en el caso del humedal de flujo subsuperficial se sembraron rizomas de *Heliconias* con una densidad de 20 plantas/m<sup>2</sup>, estos rizomas fueron enterrados en la grava 10 cm hacia arriba del cuello. Los tipos de heliconias sembrados fueron: *Heliconia stricta* Huber cv. Las Cruces, *Heliconia wagneriana* cv. roja, *H. psittacorum* x *H. marginata* cv. Crema y *Heliconia bihai* ev: Bucky., donados por Heliconias El Rosario, Chinchiná, Caldas.

Además, se determinaron la temperatura máxima, mínima y media, la humedad relativa, la precipitación y el brillo solar.

La biomasa fue cosechada y caracterizada. Dicha biomasa se llevó a CENICAFÉ donde se realizaron los ensayos de degradación mediante el proceso de lombricultura y se calcularon el tiempo de proceso, los rendimientos de transformación en abono orgánico y

se le realizaron los siguientes análisis: N – P – K – Ca – Mg – Fe – Mn - Zn – Cu – B, Humedad y Cenizas.

Los análisis físico químicos del agua residual doméstica mostraron remociones de DBO<sub>5</sub>, calculada entre la entrada al humedal de flujo libre y la salida del biosistema comprendida entre 92,92% y 94,03%, remociones de DQO entre 85,00% y 91,21% y remociones de sólidos suspendidos totales entre 77,23% y 87,35%, que cumplen con la Legislación Colombiana, la cual exige remociones de DBO<sub>5</sub> y SST mayores del 80%. Las remociones de nitrógeno total estuvieron comprendidas entre 39,44% y 70,80%, las de nitrógeno amoniacal entre 30,59% y 47,10%, las de nitratos entre 40,62% y 80,49% y las de fosfatos entre 66,61% y 98,88%. La remoción de coniformes totales y coniformes fecales fue de 99,99%.

Del material vegetal utilizado la mayor tasa de crecimiento la presentó *E. crassipes* 0,208 [kg/m<sup>2</sup>\*día], seguida por las *Heliconias* 0,100 [kg/m<sup>2</sup>\*día] y por último la *P.stratiotes* 0,008 kg/m<sup>2</sup>\*día].

Debido a que en el humedal de flujo libre el espejo de agua está expuesto a la atmósfera, se generaron olores y proliferación de vectores que pueden transmitir enfermedades.

El lombricompostaje es una buena alternativa para el aprovechamiento de la biomasa generada ya que el abono orgánico obtenido es un recurso capaz de proporcionar cantidades notables de nutrientes esenciales, principalmente, nitrógeno, fósforo y potasio y puede ser utilizado como abono en huertas, viveros y el almácigos de café.

## CONTENIDO

	pág
1. INTRODUCCIÓN	18
2. OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. HIPÓTESIS	22
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
5. APORTES AL CONOCIMIENTO	24
6. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	25
7. JUSTIFICACIÓN	26
8. ESTADO DEL ARTE	28
8.1. LEGISLACIÓN AMBIENTAL	
8.2 SISTEMAS DE HUMEDALES PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	29
8.3 PLANTA EMERGENTE UTILIZADA EN EL PRESENTE ESTUDIO	31
8.3.1 <i>Heliconias</i>	32
8.4 PLANTAS FLOTANTES UTILIZADAS EN EL PRESENTE ESTUDIO	34
8.4.1 <i>Eichhornia crassipes</i>	34
8.4.2 <i>Pistia stratiotes</i>	35
8.5 LOMBRICULTURA	35
8.6 TRABAJOS REALIZADOS CON PLANTAS ACUÁTICAS FLOTANTES Y EMERGENTES	39
8.6.1 Proyecto Life Medio Ambiente. Nuevos filtros verdes con macrófitas en flotación para la región mediterránea Española	39
8.6.2 Procedimiento de depuración de aguas residuales y vertidos contaminantes en base a cultivos de macrófitas emergentes convertidas en flotantes	40

8.6.3 Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas	41
8.6.4 Valor nutritivo del repollito de agua ( <i>P. stratiotes</i> ) y su posible uso en la alimentación animal	41
8.6.5 Influencia del Soporte y Tipo de Macrófita en la Remoción de Materia Orgánica y Nutrientes en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal	42
8.6.6 Wetland piloto para tratamiento de un efluente metalúrgico	43
8.6.7 Comparación de diferentes plantas acuáticas en la depuración de aguas residuales con humedales de flujo subsuperficial	44
8.6.8 Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con <i>Phragmites australis</i> para el tratamiento de aguas residuales domésticas	44
8.6.9 Tratamiento de efluentes de reactores anaerobios utilizando macrófitas	45
8.6.10 Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas Residuales	46
8.6.11 Uso del jacinto de agua en la depuración de aguas residuales	46
8.6.12 Variaciones al sistema de filtro anaeróbico de flujo ascendente, humedal de flujo subsuperficial como alternativa de tratamiento de aguas residuales de pequeños y medianos municipios de Colombia	47
9. MATERIALES Y MÉTODOS	49
9.1 CANALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	49
9.2 DISEÑO DEL BIOSISTEMA	54
9.2.1 Trampa de Grasas	54
9.2.2 Tanque Séptico	54
9.2.3 Humedal de flujo libre	55
9.2.4 Humedal de flujo subsuperficial	56
9.3 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE Y OPERACIÓN DEL BIOSISTEMA	58
9.4 IMPERMEABILIZACIÓN DE LOS HUMEDALES	62
9.5 VEGETACIÓN	61
9.6 EVALUACIÓN DEL SISTEMA	63
9.7 BIOSISTEMA DE LOMBRICOMPOSTAJE A PARTIR DE MACRÓFITAS	65

10. PRESUPUESTO	65
11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
11.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LAS AGUAS RESIDUALES	67
11.2 REMOCIONES REALIZADAS POR EL BIOSISTEMA CONSTRUIDO	71
11.2.1 Remoción de carga en estado estable en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno	74
11.2.2 Remoción de carga en estado estable en términos de Sólidos Suspendidos Totales	75
11.2.3 Remoción en estado estable de Nitrógeno	75
11.2.4 Remoción en estado estable de fósforo	76
11.2.5 Remoción en estado estable de patógenos	77
11.2.6 Remoción efectuada en cada uno de los humedales	80
11.2.7 Carga per cápita	86
11.3 SANEAMIENTO BÁSICO Y LEGISLACIÓN COLOMBIANA	87
11.4 BIOMASA COSECHADA	89
11.4.1 Balance de nutrientes	93
11.4.2 Aporte de Nitrógeno y Fósforo a la columna de agua y sedimentos	95
11.5 RELACIÓN ENTRE CONDICIONES AMBIENTALES, REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	96
11.6 OLORES Y VECTORES DE TRANSMISIÓN DE ENFERMEDADES GENERADOS	98
11.7 LOMBRICOMPOSTAJE COMO ECOTECNOLOGÍA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA GENERADA	101
11.8 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL BIOSISTEMA EVALUADO.	105
11.9 RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL CORRECTO MANTENIMIENTO FUNCIONAMIENTO DEL BIOSISTEMA	
12. CONCLUSIONES	111
13. RECOMENDACIONES	113
14. BIBLIOGRAFÍA	114

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág</b>
Tabla 1. Análisis físico químicos y microbiológicos realizados en el sistema de tratamiento	53
Tabla 2. Análisis de biomasa y abono orgánico	53
Tabla 3. Materiales y Precios	65
Tabla 4. Costo de los análisis físico químicos y microbiológicos	66
Tabla 5. Costo de análisis de biomasa y abono orgánico	66
Tabla 6. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 1. Noviembre 21 de 2006	67
Tabla 7. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 2. Noviembre 30 de 2006	68
Tabla 8. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 3. Diciembre 6 de 2006	68
Tabla 9. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 4. Diciembre 13 de 2006	69
Tabla 10. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 5. Enero 3 de 2007	69

Tabla 11. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 6. Enero 16 de 2007	70
Tabla 12. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 1. Noviembre 21 de 2006	71
Tabla 13. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 2. Noviembre 30 de 2006	72
Tabla 14. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 3. Diciembre 6 de 2006	72
Tabla 15. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 4. Diciembre 13 de 2006	73
Tabla 16. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 5. Enero 3 de 2007	73
Tabla 17. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 6. Enero 16 de 2007	74
Tabla 18. Remociones efectuadas por cada uno de los humedales. Año 2006	80
Tabla 19. Remociones efectuadas por cada uno de los humedales. Año 2007	80
Tabla 20. Cargas per cápita	86
Tabla 21. Resumen de condiciones ambientales. Noviembre de 2006, Diciembre de 2006, Enero de 2007	90
Tabla 22. Biomasa cosechada	90

Tabla 23. Caracterización de la biomasa cosechada. <i>E. crassipes</i>	91
Tabla 24. Caracterización de la biomasa cosechada. <i>P. stratiotes</i>	91
Tabla 25. Caracterización de la biomasa cosechada. <i>Heliconias</i>	91
Tabla 26. Disponibilidad de Nitrógeno y Fósforo Humedal Flujo Libre	92
Tabla 27. Disponibilidad de Nitrógeno y Fósforo Humedales Flujo Subsuperficial	92
Tabla 28. Características proceso transformación de biomasa cosechada	101
Tabla 29. Caracterización abono orgánico producido	103
Tabla 30. Caracterización del lombricompuesto obtenido a partir de los sustratos de pulpa de café sola y mezclada con mucílago	103
Tabla 31. Fertilizante comercial grado 17 – 6 – 18 – 2	104
Tabla 32. Materiales y Precios sistema convencional de tratamiento ARD zona rural	106

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág</b>
Figura 1. <i>H. stricta</i>	33
Figura 2. <i>H. rostrata</i>	33
Figura 3. <i>H. psittacorum x spathocircinata</i>	33
Figura 4. <i>H. strelitzia reginae</i>	33
Figura 5. Flor de <i>E. crassipes</i>	34
Figura 6. <i>E. crassipes</i>	34
Figura 7. Planta adulta de <i>P. stratiotes</i>	35
Figura 8. Humedal de flujo libre con <i>P. stratiotes</i>	35
Figura 9a. Lavadero	50
Figura 9b. Lavaplatos	50
Figura 9c. Ducha	50
Figura 10. Esquema de tratamiento de Aguas Residuales Domésticas	51
Figura 11. Tanque tipo bebedero	52
Figura 12. Trampa de grasas	52

Figura 13. Tanque séptico	53
Figura 14. Esquema Humedal Flujo Libre	56
Figura 15. Humedal de Flujo Libre	56
Figura 16. Humedal de Flujo Subsuperficial	57
Figura 17. Esquema Humedales Flujo Subsuperficial	58
Figura 18. Recámara 1	59
Figura 19. Trampa de grasas	60
Figura 20. Excavaciones humedales flujo libre y subsuperficial	60
Figura 21. Rizomas <i>Heliconias</i>	62
Figura 22 a. Especies de <i>Heliconias</i> sembradas	62
Figura 22 b. Especies de <i>Heliconias</i> sembradas	63
Figura 23. Lombricultivo a partir de las macrófitas cosechadas en el presente estudio	64
Figura 24. Remociones de $DBO_5$ efectuadas por los humedales	83
Figura 25. Remociones de SST efectuadas por los humedales	81
Figura 26. Remociones de DQO efectuadas por los humedales	82
Figura 27. Remociones de NTK efectuadas por los humedales	83

Figura 28. Remociones de $\text{NH}_3$ efectuadas por los humedales	83
Figura 29. Remociones de $\text{NO}_3$ efectuadas por los humedales	84
Figura 30. Remociones de $\text{PO}_4$ efectuadas por los humedales	84
Figura 31. Diagrama de dispersión DBO vs T promedio de seis días	97
Figura 32. Diagrama de dispersión DBO vs HR promedio de seis días	97
Figura 33. Diagrama de dispersión SST vs HR promedio de seis días	98
Figura 34. Diagrama de dispersión SST vs T promedio de seis días	98
Figura 35. Esquema convencional de tratamiento de Aguas Residuales Domésticas	107
Figura 36. Tanque séptico perforado para evacuación de lodos	110
Figura 37. Llaves de paso para evacuación de lodos	110

## 1. INTRODUCCIÓN

Se estima que el 80% de las enfermedades y más de un tercio de los fallecimientos en los países en desarrollo se deben al consumo de agua contaminada y que en promedio hasta la décima parte del tiempo productivo de cada persona se pierde a causa de enfermedades relacionadas con ésta (OPS, 2006).

A pesar de los grandes esfuerzos sin precedentes del decenio anterior, estos no han sido suficientes, pues en la actualidad una persona de cada tres carece de agua potable en cantidad y calidad, imprescindibles para la salud y la dignidad (OPS, 2006). Adicionalmente, se reconoce que los residuos líquidos son causas del deterioro de las fuentes hídricas y que el uso de tecnologías de depuración de bajo costo de aguas residuales podrían ser importantes factores de progreso de la humanidad.

En Colombia, la solución a las deficiencias y coberturas de estos servicios públicos, han sido eje fundamental de los compromisos de los gobiernos y autoridades locales. Desde 1987, con el inicio del proceso de descentralización, a los municipios se les transfirió un papel protagónico por ser la instancia de mediación que organiza la negociación y ejecución de los proyectos, la gestión de los recursos financieros a su vez los responsables del ordenamiento territorial local.

El país cuenta con un régimen integral para la prestación de los Servicios Públicos Domiciliarios soportado por la ley 142 de 1994, que abarca todos los aspectos esenciales desde la planeación y regulación pasando por la prestación, gestión y consumo hasta su evaluación, inspección, control y vigilancia. Esta ley Constituye la expresión de un verdadero vuelco que parte de la Constitución Política Nacional de 1991.

La complementariedad entre las universidades, la sociedad civil, las empresas prestadoras de servicios públicos, los municipios y el Estado es fundamental y todos los actores son claves para diseñar estrategias cuyo objetivo es responder para que la población tenga acceso al agua y saneamiento, constituyéndose en un punto nodal de la

organización institucional referida al agua y en general a todos los mecanismos de toma de decisiones sobre acciones de protección al medio ambiente.

CORPOCALDAS en su Plan Trienal 2004-2006, tiene como objetivo una gestión integral del agua que permita lograr una relación sostenible entre la oferta natural y el aprovechamiento del recurso, teniendo en cuenta que este es limitado y requiere una administración adecuada para garantizarlo a todas las actividades humanas. Siguiendo tales lineamientos, enmarcados en el programa de la Gestión Integral del Recurso Hídrico, se diseñó, construyó y evaluó un biosistema de tratamiento de aguas residuales domésticas de bajo costo, que no sólo actúe como sistema depurador, sino que la biomasa pueda ser utilizada para la producción de abono orgánico, lo que representa un manejo sostenible de los recursos naturales ya que se obtienen tanto beneficios ambientales como económicos.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y evaluar un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas a pequeña escala, utilizando una combinación de sistemas de humedales de flujo libre y flujo subsuperficial, realizando un aprovechamiento a los subproductos generados en el proceso de depuración.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.2.1 Evaluar la capacidad depuradora, medida en términos de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) en el humedal de flujo libre y de las *Heliconias* en el humedal de flujo subsuperficial

2.2.2 Evaluar, periódicamente, la remoción de carga orgánica, en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales (ST) y Sólidos Suspendidos Totales (SST), al igual que la remoción de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y microorganismos patógenos (coliformes) realizada por el biosistema de tratamiento.

2.2.3 Determinar, mensualmente, la tasa de crecimiento, en kg/m<sup>2</sup> - día, del material vegetal utilizado en la experimentación y evaluar las plagas y enfermedades incidentes sobre el mismo.

2.2.4 Evaluar la influencia de algunas variables climáticas (temperatura y humedad relativa) sobre el crecimiento de las plantas y los porcentajes de remoción de materia orgánica.

2.2.5 Evaluar el lombricompostaje, como una ecotecnología para el aprovechamiento de la biomasa generada.

2.2.6 Determinar los costos de construcción, operación y mantenimiento del biosistema evaluado.

### **3. HIPÓTESIS DE TRABAJO**

3.1 La utilización de macrófitas para el tratamiento de aguas residuales domésticas permite obtener efluentes que cumplen con lo dispuesto en la Legislación Ambiental Colombiana, en términos de  $DBO_5$  y SST.

3.2 Los costos de tratamiento de aguas residuales domésticas empleando macrófitas son menores que los generados con tratamientos convencionales.

3.3 Es posible utilizar la lombricultura para la transformación del material vegetal generado en abono orgánico.

#### **4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En Colombia es evidente el deterioro de la calidad del agua, como consecuencia de los vertimientos provenientes de las industrias y de los asentamientos urbanos, deterioro que es un peligro para la vida e integridad física del ser humano.

Las aguas residuales domésticas, son vertidas, en su mayoría a los cauces de los ríos, que antes podían diluir los agentes contaminantes, pero que en la actualidad, la mayor carga contaminante, por un lado y la disminución de los caudales debido al incremento de las concesiones y a la creciente deforestación de los bosques, hace inviable cualquier solución que se base exclusivamente en la capacidad autodepuradora del cuerpo receptor. Esto ha planteado, la necesidad de tratar las aguas antes de ser vertidas.

Para el caso de pequeñas comunidades, se han utilizado habitualmente fosas de infiltración o sistemas sépticos para tratamiento de aguas residuales domésticas, que además de ser de difícil mantenimiento, no son eficientes en la depuración de dichas aguas.

Dado que en la zona rural de Caldas y del Municipio de Manizales es baja la infraestructura de alcantarillado, se hace necesario entonces, proponer sistemas de depuración de aguas residuales domésticas con bajo costo de ejecución y mantenimiento, para pequeñas comunidades que no disponen de sistema de alcantarillado y que no pueden reunir sus efluentes con otras, dada la distancia entre las mismas.

## **5. APORTES AL CONOCIMIENTO**

La acelerada contaminación del recurso hídrico en Colombia y el convencimiento de agotabilidad del mismo nos llevan a plantear soluciones para la consecución de un buen estado ecológico de las aguas y los ecosistemas acuáticos, como mejor garantía de cantidad y calidad del recurso (enfoque ecológico para el uso sostenible del agua), para lograr este objetivo, diseñar y construir biosistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas de bajo costo es una buena alternativa porque además de ser una solución eficiente es novedosa ya que en Caldas no existe ningún sistema similar.

Por otra parte el aprovechamiento de la biomasa da un valor agregado al sistema, las heliconias, no han sido utilizadas para este fin, presentan altas tasas de crecimiento y tienen gran aporte en el aspecto paisajístico lo que les da un gran potencial ambiental y económico.

Las plantas acuáticas además de ser utilizadas en alimentación animal, podrían servir como sustrato para lombrices y producir abono orgánico.

En nuestro medio se ha presentado el problema del mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas instalados, con las alternativas anteriormente citadas lo que se busca es que la comunidad se apropie de ellos y además de mantenerlos para que sean eficientes en la depuración de aguas, obtengan beneficios no sólo ambientales sino económicos.

## 6. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

- El biosistema fue construido para el tratamiento de aguas residuales domésticas generadas en una finca de máximo 20 habitantes, debido a que se realizó un estudio a pequeña escala. Así los costos fueron menores y hubo más facilidades de operación y mantenimiento. Dependiendo de los resultados obtenidos en la investigación y de la factibilidad técnica y económica del proyecto, se podrán diseñar biosistemas a mayor escala. Además, por costos y tiempo, el biosistema fue construido sólo en una población de Caldas, lo que implica que fue evaluado solamente para unas condiciones ambientales y de posición geográfica y el rendimiento del sistema depende de las condiciones ambientales predominantes en la zona.
- El estudio se realizó solamente con dos plantas acuáticas *E. crassipes* y *P. stratiotes* y una planta emergente, *Heliconia*. Los resultados de investigaciones anteriores muestran la eficiencia de remoción de carga orgánica y sólidos en suspensión de estas plantas, además Colombia es el país que mayor número de especies de *Heliconias* posee, especialmente en la zona cafetera y su gran belleza les da un valor agregado significativo además de los aspectos paisajísticos que proporcionan.
- Sólo se evaluó un sistema de depuración con una secuencia definida, primero el biosistema de flujo libre y luego el biosistema de flujo subsuperficial. Se construyó primero el humedal de flujo libre ya que en este se retiran la mayor cantidad de sólidos en suspensión que ocasionarían colmatación del sistema si la secuencia fuera diferente.

## 7. JUSTIFICACIÓN

En la Conferencia de Río de Janeiro en 1992 se definió el Desarrollo Sostenible como: *El que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales renovables, en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades.*

En este sentido se hace necesaria la modernización de los procesos de administración y usos del recurso hídrico en Caldas, buscando una gestión integral que permita lograr una relación sostenible entre la oferta natural y el aprovechamiento del recurso, teniendo en cuenta que este es un recurso limitado y que requiere de un uso adecuado para garantizarlo a todas las actividades humanas.

En Caldas es evidente el problema de la depuración de aguas residuales domésticas a nivel rural, razón por la cual se debe investigar sobre el tratamiento adecuado de aguas residuales domésticas generadas en pequeñas comunidades. A este problema se puede hacer frente a través de costosas plantas de tratamiento convencionales que requieren de una gran infraestructura, un alto costo de mantenimiento y un elevado consumo energético, además de personal especializado para su manejo. En nuestro medio estas elevadas inversiones no siempre son posibles, se hace necesario entonces, proponer “sistemas blandos” de tratamiento cuya característica principal es imitar el proceso de autodepuración de las aguas residuales a través de especies de plantas que lo hacen como proceso natural en lagunas y ríos, consumen poca energía convencional y son de bajo costo.

Mediante la aplicación de la Normatividad Ambiental vigente, donde se establecen los parámetros y límites permisibles de vertimiento, articulados con los instrumentos económicos y la implementación de planes de saneamiento y manejo de vertimientos de los municipios y las pequeñas comunidades se puede considerar que un biosistema de

tratamiento de aguas residuales domésticas ayudará a prevenir los niveles de carga contaminante.

En los últimos años, el tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas ha despertado un gran interés por el potencial que han presentado para la depuración de las mismas. Estos sistemas han logrado proporcionar un tratamiento integral, en donde no solamente se remueven eficientemente materia orgánica y sólidos en suspensión, sino que también se logran reducir nutrientes, sales disueltas y microorganismos patógenos.

Desde el punto de vista de sostenibilidad esta es una buena solución, porque además de obtener un efluente de buena calidad, se generan productos con un alto valor agregado.

## 8. ESTADO DEL ARTE

### 8.1 LEGISLACIÓN AMBIENTAL COLOMBIANA

Con base en la normatividad vigente, la cual se relaciona en los párrafos siguientes, CORPOCALDAS formuló el Plan de Acción Trienal PAT 2004-2006. Dentro de este plan se encuentra el proyecto “Gestión Integral del Recurso Hídrico” que tiene como objetivo mejorar la oferta del recurso en calidad, cantidad y disponibilidad para los diferentes usos.

La construcción del biosistema de tratamiento de aguas residuales domésticas debe servir como avance importante en el saneamiento y tratamiento de vertimientos líquidos en el departamento de Caldas.

Para la formulación del proyecto se consideran las principales normas de carácter ambiental:

- **Constitución Política de 1991**
- Llamada la *Constitución Ecológica*, en efecto en ella se reconocen principios fundamentales relacionados con el medio ambiente desde el postulado del Estado Social de Derecho.
- **Código Nacional de Los Recursos Naturales Renovables y la Protección al medio ambiente.** Decreto Ley 2811 de 1974. Reglamenta la preservación y manejo del recurso hídrico bajo la premisa que las aguas son de utilidad pública e interés social.
- **Código Sanitario Nacional (Ley 9 de 1979).** Reglamenta que se deben prever algunas obras, como la construcción de un sistema de alcantarillado y la disposición de aguas negras mediante pozos sépticos y una red de alcantarillados con pozos de aguas fecales y además pozos de inspección de aguas fluviales.
- **Decreto 1541 de 1978.** Reglamenta los usos del agua.
- **Decreto 1594 de 1984.** Fija normas básicas sobre el ordenamiento del recurso agua, la destinación genérica de las aguas superficiales, subterráneas, marítimas,

estuarinas y servidas y los criterios de calidad que deben emplearse para el uso y destinación adecuados del recurso. Asigna capítulos específicos sobre el vertimiento de los residuos líquidos y sus registros. Finalmente, el decreto presenta las tasas retributivas.

- **Ley 99 de 1993.** Crea el Sistema Ambiental Nacional SINA, con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial como ente rector. Esta Ley da una serie de directrices sobre el manejo y aprovechamiento de los distintos recursos naturales, entre ellos el recurso agua.
- **Decreto 3100 de 2003. Decreto 3440 de 2004.** En estos Decretos se contempla lo relacionado con el establecimiento de la tarifa mínima y su aporte regional, el establecimiento de metas individuales y sectoriales de reducción de carga contaminante, define los sujetos pasivos de la tasa, los mecanismos para su recaudo y lo relativo a la fiscalización y control del cobro.

El artículo 12 del Decreto 3100 establece que los usuarios prestadores del servicio de alcantarillado sujetos al pago de la tasa retributiva deberán presentar a la Autoridad Ambiental competente el plan de Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, de conformidad con la reglamentación que para el efecto expida el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el cual deberá contener las actividades e inversiones necesarias para avanzar en el saneamiento y tratamiento de los vertimientos.

- **Resolución 1433 de 2004.** Por la cual se reglamente el Artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre planes de saneamiento y manejo de vertimientos y se adoptan otras determinaciones.

## 8.2 SISTEMAS DE HUMEDALES PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

La Ley 357 de 1997, define “Son humedales las extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes dulces, salobres o saladas, incluidas extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

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 medio de los microorganismos
- Lograr altos niveles de depuración con un bajo consumo de energía y mantenimiento.

Los sistemas de humedales se describen típicamente por la posición de la superficie del agua y/o el tipo de vegetación presente. Los humedales naturales son sistemas de flujo libre superficial en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera; estos incluyen los fangales (especialmente con vegetación de musgos), las zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea) y las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea y plantas macrófitas emergentes).

Un humedal de flujo subsuperficial (FS, *subsurface flow wetlands*) está diseñado para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento y está construido en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. Como medio se utiliza grava, arena u otro tipo de materiales del suelo. El medio se planta con la vegetación emergente y por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio. Las principales ventajas de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de olores y mosquitos y la prevención de que las personas entren en contacto con el agua residual. En contraste, la superficie del agua en los pantanales naturales y en los humedales naturales de flujo libre superficial (FLS, *free water surface wetlands*) está expuesta a la atmósfera.

La mejora en la calidad del agua en los humedales naturales ha sido observada durante muchos años y ha llevado al desarrollo de humedales artificiales para duplicar en ecosistemas construidos los beneficios de la calidad del agua y hábitat de los humedales naturales. Se considera que las reacciones biológicas se deben a la actividad de los microorganismos adheridos a las superficies disponibles de sustrato sumergido. En el caso de los humedales FLS esos sustratos son las porciones sumergidas de las plantas vivas, los detritos vegetales y la capa béntica del suelo. En humedales FS el sustrato sumergido disponible incluye las raíces de las plantas que crecen en el medio y la

superficie misma del suelo. Dado que el área del sustrato en un humedal FS puede sobrepasar el área del sustrato disponible en humedales FSL, las tasas de reacción microbiana suelen ser mayores en los primeros para muchos contaminantes. Como resultado, un humedal FS puede tener una menor superficie que un humedal FSL para los mismos caudales y parámetros de calidad del agua.

Los humedales son capaces de eliminar elementos eutrofizantes, especialmente P y N, también descomponen la materia orgánica por medio de los microorganismos adheridos al sistema radicular de las plantas y favorecen la disminución de sólidos en suspensión al quedarse adheridos en las raíces de las plantas. Algunas especies de plantas tienen la capacidad de absorber cantidades importantes de metales pesados o descomponer fenoles, por lo que el sistema es también válido para tratar vertimientos industriales.

Las principales ventajas de los humedales son:

- Proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados.
- Son menos costosos de construir y son menos costosos para operar y mantener que los procesos convencionales de tratamiento diseñados para un nivel equivalente de calidad de efluente.
- Son muy efectivos en la remoción de DBO, DQO, SST, metales y algunos compuestos orgánicos y microorganismos patógenos de las aguas residuales domésticas. La remoción de N y P también es posible.
- Facilidad de cosecha de biomasa que puede ser retirada mediante cortes periódicos para que el sistema siga bombeando nutrientes. Esta biomasa puede ser utilizada en alimentación animal, con fines energéticos y como plantas decorativas.

### 8.3 PLANTA EMERGENTE UTILIZADA EN EL PRESENTE ESTUDIO

Las plantas emergentes, tienen las raíces sumergidas en el agua, pero parte de sus tallos y de sus hojas sobresalen del agua y se comportan como plantas en contacto con el aire.

Estas plantas realizan a la transferencia del oxígeno hacia la zona radicular, donde se realiza el proceso de depuración. Las plantas degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los contaminantes, pero también proporcionan una extensa superficie donde se posibilita el crecimiento bacteriano y se filtran los sólidos en suspensión.

8.3.1 *Heliconias* ([www.grancanariaweb.com/edgar/botanica/heliconia](http://www.grancanariaweb.com/edgar/botanica/heliconia)). Las heliconias son plantas monocotiledóneas, con un crecimiento rizomatoso que emite brotes o vástagos. Cada uno de estos está compuesto por un tallo técnicamente llamado pseudo tallo. Las hojas están compuestas por un pecíolo y una lámina colocadas en posición dística. De acuerdo a la disposición de éstas, se pueden identificar tres hábitos de crecimiento: Musoide, cuando las hojas están en posición vertical y con pecíolos muy largos, Zingiberoide, con hojas en la mayoría de los casos séciles y dispuestas en forma más o menos horizontal y canoide, cuando la hojas presentan pecíolos medianos y se disponen oblicuamente. Sus inflorescencias son hermafroditas pues poseen una parte masculina (estambres) y una femenina (pistilo).

El género heliconia, presenta de 225 a 250 especies en el mundo; siendo Colombia el que mayor número de especies tiene (aproximadamente 93). Estas son de vital importancia ecológica, ya que debido a su crecimiento rizomatoso son aptas para contrarrestar los movimientos de tierra en las laderas erosionadas de barrancos y pueden depurar aguas residuales. La gran mayoría de especies habitan regiones húmedas y lluviosas, pero algunas pocas se pueden hallar en zonas secas. Aunque la mayoría de Heliconias alcanzan su máximo esplendor vegetativo en las zonas bajas y húmedas de los trópicos a elevaciones por debajo de los 600 metros de altura, un gran porcentaje de las especies suelen encontrarse en elevaciones medias, en hábitats de bosques húmedos de niebla.

Las especies mas llamativa suelen habitar zonas abiertas de crecimiento secundario, en las orillas de los ríos o bordeando las carreteras o en zonas abiertas en la selva.

En los trópicos americanos, los Colibríes son los polinizadores exclusivos de las Heliconias rojas, amarillas, rosas y naranjas, los murciélagos que se alimentan de néctar son los polinizadores de las Heliconias verdes.

Las Heliconias son el único género en la familia de las *Heliconiaceas*, que es un miembro de un gran orden botánico llamado orden de los *Zingiberales*. Hay varias características que hacen de este, un orden de fácil reconocimiento, entre esas características podemos incluir las hojas largas y grandes inflorescencias de vistosos colores. La mayoría de taxónomos reconocen ocho familias en el orden de los *Zingiberales*, a saber: *Musacea* (bananos y plátanos), *Strelitziacea* (aves del paraíso), *Lowiaceae*, *Heliconiaceae* (heliconias), *Zingiberaceae* (los gingers), *Costaceae* (Costus), *Cannaceae* (las cannas y chirillas) y *Marantaceae* (las calateas).



**Figura 1.** *H. stricta*  
(Fuente [www.grancanariaweb.com](http://www.grancanariaweb.com))



**Figura 2.** *H. rostrata*  
(Fuente [www.grancanariaweb.com](http://www.grancanariaweb.com))



**Figura 3.** *H. psittacorum x spathocircinata*  
*Fire Opal*  
(Fuente [www.grancanariaweb.com](http://www.grancanariaweb.com))



**Figura 4.** *H. strelitzia reginae*  
(Fuente [www.grancanariaweb.com](http://www.grancanariaweb.com))

#### 8.4 PLANTAS FLOTANTES UTILIZADAS EN EL PRESENTE ESTUDIO

Estas plantas son flotantes de forma natural y tienen la ventaja de que el contacto entre las raíces y el agua residual es total y presentan una gran superficie.

8.4.1 *Eichhornia crassipes* ([www.atlas.drpez.org/Eichhornia-crassipes](http://www.atlas.drpez.org/Eichhornia-crassipes)). Pertenece a la familia de las Pontederiáceas y su país de origen es Brasil. Es una planta perenne acuática, provista de un grueso rizoma. Las hojas dispuestas en forma de roseta están sostenidas por pecíolos extrañamente engrosados que favorecen la flotación. Las hojas son de color verde bastante oscuro, brillantes y mas o menos acorazonadas. El pedúnculo floral sostiene las flores de color azul violáceo reunidas en espigas terminales, de 10 cm de longitud aproximadamente. La floración estival dura poco tiempo, de dos a tres días como máximo, sus raíces son de color similar a las flores y alcanzan 40 cm de longitud aproximadamente. Su multiplicación se realiza fácilmente mediante la división de los estolones que la planta produce. Crece a una temperatura comprendida entre 16°C y 30°C, con un rango óptimo comprendido entre 20°C y 26°C. Para crecer necesita de iluminación intensa.



**Figura 5.** Flor de *E. crassipes*  
(Fuente [www.atlas.drpez.org](http://www.atlas.drpez.org))



**Figura 6.** *E. crassipes*  
(Fuente [www.atlas.drpez.org](http://www.atlas.drpez.org))

8.4.2 *Pistia stratiotes* ([www.atlas.drpez.org/Pistia-stratiotes](http://www.atlas.drpez.org/Pistia-stratiotes)). Su nombre común es lechuga o repollito de agua. Pertenece a la familia de las Aráceas. Esta especie es la única que conforma el género *Pistia* dentro de las Aráceas y goza de una amplia distribución en todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Tiene hojas flotantes modificadas en forma de roseta, de las cuales las centrales son aéreas. Tienen raíces bien desarrolladas, con caliptra pero sin pelos absorbentes, que sirven principalmente para asegurar el equilibrio de la planta sobre el agua. El aerénquima se encuentra en el órgano que hace de flotador, en este caso la lámina foliar. Su tamaño es de 5 a 20 cm de circunferencia aproximadamente. Su propagación es por estolones, aunque también se puede propagar por semillas, en condiciones favorables se multiplica muy rápidamente en la superficie, puede incluso convertirse en plaga. Deben de eliminarse periódicamente las plantas sobrantes para evitar que oscurezca en exceso el humedal perjudicando a las otras plantas. Crece a temperaturas comprendidas entre 17°C y 30°C, con iluminaciones muy altas.



**Figura 7.** Planta adulta de *P. stratiotes*  
(Fuente [www.atlas.drpez.org](http://www.atlas.drpez.org))



**Figura 8.** Humedal de flujo libre con *P. stratiotes*  
(Fuente [www.atlas.drpez.org](http://www.atlas.drpez.org))

## 8.5 LOMBRICULTURA

Según Dávila *et. al*, la lombricultura es un sistema para el manejo de residuos orgánicos que permite producir abono y proteína animal, utilizando lombrices de tierra adaptadas

para vivir en condiciones de alta densidad, tales como. la lombriz roja (*Eisenia foetida*) que se reproduce bastante, se mantiene cerca de la superficie, se alimenta de materiales en proceso de descomposición, se adapta a las condiciones adversas de temperatura, humedad y pH, lo cual facilita trabajarla en cautiverio.

La lombricultura es una actividad sencilla que puede emprender cualquier agricultor para manejar adecuadamente los residuos orgánicos generados en el campo. El uso de lombrices para la producción de abono orgánico presenta, entre otras, las siguientes ventajas:

1. La lombriz circula por el material orgánico, segregando un líquido viscoso con propiedades enzimáticas que ayudan a iniciar la descomposición y el cual le permite deslizarse creando pequeños orificios, facilitando la circulación del aire y el agua en el material, a la vez que se va alimentando del mismo, acelerando y simplificando así su proceso de descomposición.
2. El alimento que ingiere la lombriz, va atravesando todo su sistema digestivo, hasta ser expulsado como su propio estiércol, que se conoce como lombricompuesto. Este producto, similar a la tierra fértil, es de excelente calidad física, química y microbiológica. Se puede utilizar como abono en la misma finca o se puede comercializar.
3. En todo este proceso, la lombriz se va reproduciendo y multiplicando. En la medida en que se va obteniendo más biomasa de lombrices, se puede ampliar el lombricultivo hasta lograr el tamaño necesario para manejar todos los residuos. También se pueden utilizar como fuente de proteína para alimentación animal de aves de corral, peces, cerdos, etc. o se pueden comercializar.
4. La producción propia de un abono de excelente calidad, así como de una fuente de proteína, contribuye a disminuir los costos de producción, ya sea por su aplicación directa o por su venta.
5. Debido al efecto benéfico de la aplicación del lombricompuesto, se podrán ir mejorando progresivamente los lotes de la finca. La incorporación de este material a los suelos mejora significativamente las poblaciones de microorganismos que descomponen la materia orgánica y la convierten en nutrientes (mineralización). También favorece el desarrollo de microorganismos que se asocian a las plantas y les

aportan nutrimentos, como el rizobio que aporta N y las micorrizas que aportan P, mejorando así la nutrición de la planta.

Para construir un lombricultivo se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

**Camas:** Para organizar el cultivo, se utilizan camas construidas en esterilla, guadua o ladrillo; de 1 m de ancho, altura de 40 cm y la longitud según la disponibilidad del terreno. El piso puede ser en cemento (3 partes de suelo + 1 parte de cemento), tela plástica, esterilla o algún material que permita aislar el cultivo del suelo, con el fin de evitar el ataque de posibles plagas (planarias, sanguijuelas, hormigas, etc.); y con una pendiente entre el 2 y 5% para evitar la inundación cuando se utiliza demasiado riego. También se pueden utilizar como camas, canastas plásticas con el fondo perforado y las paredes laterales cerradas.

**Cerramiento:** Es recomendable techar para aislar el cultivo de la lluvia directa, proporcionar sombra y mejores condiciones para el trabajo de la lombriz. Además se facilita la manipulación de los materiales (pulpa, lombricompost y lombrices). El techo puede construirse en teja de cartón o de zinc, con una altura de 2,5 a 3 m. Es conveniente cerrar la caseta donde se encuentran las camas con polisombra o malla, para evitar la entrada de aves y otros depredadores.

**Área:** Esta depende de la velocidad de transformación del residuo por parte de la lombriz, para residuos con altos contenidos de celulosa y lignina, se puede tratar una tonelada/m<sup>2</sup> – año. Para esto, se trabaja con una densidad alta de lombrices, de aproximadamente 5 kg de lombriz pura/m<sup>2</sup> de cama que corresponde aproximadamente a 20-25 kg de lombriz comercial, es decir mezclada con sustrato.

**Inicio:** Como la lombriz roja se multiplica muy rápido, es mejor no iniciar el cultivo con toda la lombriz necesaria, sino empezar a producirla en los mismos lombricultivos. Se puede iniciar con el 20%, y en menos de dos años se puede tener el tamaño necesario de lombricultivo para manejar todo el residuo.

Se empieza depositando una capa inicial de 10 a 15 cm de pie de cría de lombrices; si es necesario completar la altura, se puede depositar en el fondo de la cama material orgánico descompuesto. Así, se asegura que la lombriz disponga de un medio para refugiarse si las siguientes condiciones del alimento no son las adecuadas: pH=6-8, T=20-25 °C, Humedad=75-85%.

**Alimento:** Como alimento, se puede utilizar cualquier residuo orgánico. Para mantener el lombricultivo con alimentación constante, se debe tener una fosa cubierta que permita el almacenamiento y la disponibilidad del material en las épocas fuera de cosecha.

**Forma de alimentación:** Se utilizan capas delgadas, de máximo 4 cm, para evitar el calentamiento del alimento cuando se usa muy fresco, facilitar la aireación del cultivo, asegurar la transformación del material y mantener las lombrices alimentándose en la parte superior. Se puede alimentar una o dos veces por semana, dependiendo de la cantidad de lombrices y el tipo de alimento. Para camas con 5 kg de lombriz pura/m<sup>2</sup> se debe alimentar con una cantidad de 20 kg de material orgánico por semana.

**Riego:** El cultivo se debe remojar para mantener la humedad cercana al 80%, puede hacerse un riego de máximo 1 litro de agua/m<sup>2</sup>-día.

**Sistema de recolección de los productos:** La separación de la lombriz y la cosecha del abono se pueden hacer dos o tres veces al año, dependiendo de la velocidad de descomposición del material. Para la captura de las lombrices, se utilizan mallas plásticas con alimento. Al terminar esta separación, se procede a retirar el lombricompostado de la parte inferior de la cama.

**Productos:** Para ciclos de producción entre 4 y 6 meses, el incremento de lombrices es de por lo menos el 50%. El rendimiento en la producción de lombricompostado es entre 35 y 40%, es decir aproximadamente 127 kg por ciclo y por metro cuadrado. Las lombrices separadas se utilizan para ampliar el cultivo, como pie de cría para nuevos cultivos o como fuente de proteína para alimentación animal. El lombricompostado obtenido se utiliza como abono orgánico.

## 8.6 TRABAJOS REALIZADOS CON PLANTAS ACUÁTICAS FLOTANTES Y EMERGENTES

Primero se mencionaran los trabajos realizados a nivel internacional y por último los trabajos realizados en el ámbito nacional.

8.6.1 Proyecto Life Medio Ambiente. Nuevos filtros verdes con macrófitas en flotación para la región mediterránea Española. (Fundación 2001 Global Nature, 2005). La depuración de las aguas residuales de las cuencas mediterráneas españolas es todavía muy deficitaria. La Cuenca del río Segura, especialmente de los ríos Segura, Guadalentín y Mula, es quizás el ejemplo más grave de la situación.

Una parte del problema, común a buena parte de España, es la falta de depuración de las aguas urbanas y el mal funcionamiento de las depuradoras existentes. En el conjunto de la Cuenca del Río Segura, de las 207 depuradoras inventariadas, solo 87 realizan su labor adecuadamente, dos están abandonadas, 59 no funcionan y 59 presentan un funcionamiento deficiente. Carboneras (Almería), es otro ejemplo de mal funcionamiento de las depuradoras instaladas hasta la fecha, con serios problemas de olores, gasto energético y costos de mantenimiento excesivos. Por otra parte, se encuentran numerosos núcleos de población aislados que, aunque dispongan de sistemas de alcantarillado, no pueden reunir sus efluentes con los de otros núcleos dada la distancia entre los mismos.

A lo largo del año 2001, la Fundación Global Nature, en colaboración con el grupo de Agroenergética del Departamento de Producción Vegetal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid y el ayuntamiento de Lorca (Murcia), preparó una propuesta para el proyecto piloto centrado en la gestión sostenible de los recursos hídricos en el Municipio de Lorca (Murcia) para presentar a la convocatoria 2002 del Programa LIFE Medio Ambiente de la Comisión Europea. El sistema Filtro de Macrófitas en Flotación ha sido desarrollado por la Escuela Técnica de Ingenieros Agrónomos de Madrid como un nuevo método de depuración mediante humedales artificiales.

Este sistema se basa en la utilización de macrófitas emergentes, que de forma natural se encuentran enraizadas en el terreno (*Typha*, *Scirpus*, *Iris*, *Sparganium*), y que aquí se transforman artificialmente en flotantes. Al flotar, las plantas forman un tapiz de raíces y rizomas que ocupa todo el volumen del colector (laguna o canal), forzando a que todo el agua circule por la esponja de raíces que soporta microorganismos que degradan la materia orgánica. El sistema de Filtros de Macrófitas en Flotación elimina los elementos eutrofizantes, particularmente el P y el N, así como metales pesados y fenoles.

**Objetivos del proyecto:**

- Demostración de la eficacia de un sistema de depuración de aguas residuales innovador mediante plantas macrófitas flotantes. La novedad de estos Filtros de Macrófitas en Flotación consiste en convertir macrófitas emergentes enraizadas en flotantes, de forma natural. Su poder de filtración, en trabajos experimentales previos, ha demostrado ser superior al de filtros verdes que utilizan especies vegetales enraizadas o flotantes.
- Promoción de estos nuevos sistemas en las regiones mediterráneas, donde se favorece la actividad de las plantas y los hace especialmente aptos para núcleos turísticos, a veces lejanos de los cascos urbanos y con mayor población en verano, época de máxima actividad de los filtros.
- Promoción de nuevos sistemas de filtración no sometidos a una economía de escala, aplicables a pequeñas comunidades y a diversos sectores (urbano, ganadero e industrial), baratos en su ejecución y mantenimiento.

8.6.2 Procedimiento de depuración de aguas residuales y vertidos contaminantes en base a cultivos de macrófitas emergentes convertidas en flotantes (González, 2002). La presente invención describe un sistema de aguas residuales y efluentes contaminantes, basado en la utilización de plantas acuáticas del tipo macrófitas emergentes acondicionadas para mantenerse en flotación sobre la superficie de canales, lagunas o balsas por los que discurre el agua contaminada. Las plantas forman un manto flotante sobre la superficie acuática, manteniendo sumergido el sistema radicular y los rizomas y bases de los tallos. La parte sumergida presenta una gran superficie específica sobre la que se fija una abundante flora microbiana, cuyo crecimiento se favorece por el oxígeno que bombean las hojas hacia dicha zona. El conjunto formado por las raíces y

microorganismos actúa como filtro que elimina la materia orgánica disuelta, además de los compuestos minerales (P y N entre otros) que son absorbidos principalmente por las plantas. Periódicamente, la biomasa flotante puede ser retirada fácilmente y utilizarse para fines energéticos o industriales.

8.6.3 Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. (Hidalgo *et. al.*, 2005). Se analizan procesos y aplicaciones de los sistemas de depuración de aguas residuales con plantas acuáticas y su importancia en las distintas actividades industriales, mineras y domésticas. Se describen los sistemas más utilizados para estos fines, enfatizando el rol que cumplen las plantas en la descontaminación, enfocando la atención hacia el rol que cumplen las macrófitas. Se analizan los sistemas naturales y los sistemas artificiales. Como conclusión general se puede afirmar que este sistema es una buena alternativa para tratar efluentes de actividades industriales, mineras, agropecuarias y domésticas.

8.6.4 Valor nutritivo del repollito de agua (*P. stratiotes*) y su posible uso en la alimentación animal. (Rodríguez *et. al.*, 2000). Para evaluar la utilización del repollito de agua como ingrediente para la preparación de alimento animal, se determinó la composición proximal, estructural y mineral y se compararon con el contenido nutricional de los forrajes más comunes de la localidad. El repollito de agua presentó porcentajes de proteína cruda, NTK, extracto etéreo, extracto libre de N, cenizas y fibra cruda, en el orden de 8,62 %; 1,32 %; 1,16 %; 46,62%; 21,12% y 19,13%. El potasio y el calcio fueron los minerales de mayor porcentaje (5,56% y 3,24 % respectivamente) con respecto al contenido de Mg, P, Na, Fe y Mn, en el orden de 1,00 %; 0,26%; 0,61%; 0,26% y 0,12%. El contenido de Cu y de Zn fue de 42 mg/L y 181 mg/L, respectivamente. Los altos niveles de fibra ácido detergente (32,71%), celulosa (18,71%), hemicelulosa (15,45%) y lignina (10,66%) evidencian la posibilidad de que los animales monogástricos no utilicen eficientemente los carbohidratos de la pared celular del repollito de agua, principalmente la hemicelulosa y la celulosa. Asimismo, podría causar una baja digestibilidad de las proteínas. La relación Ca/P del repollito presentó un valor muy por encima del rango normal para el crecimiento saludable del animal. Se recomienda realizar estudios sobre análisis de toxicidad de

polifenoles y alcaloides, asimismo, un estudio sobre la digestibilidad del repollito de agua en animales, especialmente en aves.

8.6.5 Influencia del Soporte y Tipo de Macrófita en la Remoción de Materia Orgánica y Nutrientes en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal (Zuñiga, 2004). Los humedales construidos representan una alternativa ventajosa para el tratamiento de aguas residuales domésticas de pequeñas comunidades, debido a los bajos requerimientos de energía y costos de construcción y mantenimiento, donde es necesario implementar sistemas alternativos adecuados al contexto socioeconómico.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el proceso de depuración de aguas residuales domésticas, mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial con alimentación horizontal, para una zona geográfica donde las estaciones del año están bien marcadas. Para ello se planteó como hipótesis que a través de la cuantificación y evaluación de los parámetros operacionales de humedales construidos de flujo subsuperficial con alimentación horizontal, es posible mejorar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas en una zona con un clima mediterráneo

Se construyó una unidad experimental, la cual consta de seis humedales, cada uno de 2 m de largo, 1 m de ancho y 0,6 m de profundidad. El caudal de alimentación fue de 12 L/h. El diseño de la planta permitió evaluar la capacidad de remoción de dos especies de macrófitas, que poseen altas tasas de crecimiento en invierno y verano (*Scirpus* y *Typha Latifolia*) y dos soportes de bajo costo (grava y gravilla).

Durante la puesta en marcha se realizó un seguimiento al crecimiento y adaptación de las macrófitas en el nuevo soporte, la primera etapa consistió en alimentar con agua limpia y nutrientes, para luego ser adaptadas paulatinamente al agua residual.

Se evaluó el patrón de flujo utilizando cloruro de litio como trazador, el que fue medido mediante espectrofotometría de absorción atómica. A partir de la curva de concentración de trazador a la salida v/s tiempo, se determinó que es posible utilizar un modelo de reactor de mezcla completa para representar el patrón de flujo del humedal. Sin embargo, las oscilaciones en la curva sugieren que es posible utilizar un modelo de reactores en serie con recirculación (Levenspiel, 1972). El ajuste del modelo a la curva de respuesta

del trazador permitió calcular dos parámetros, el número de reactores, 28 y la razón de recirculación, 5,6.

El seguimiento de la operación de los humedales (concentración de materia orgánica P- $\text{PO}_4^{-3}$  y N- $\text{NH}_4^+$ ), se realizó entre octubre de 2002 y diciembre del 2003. A partir de los resultados obtenidos se calculó la remoción de materia orgánica, P- $\text{PO}_4^{-3}$  y N- $\text{NH}_4^+$ . Con estos datos se realizó un análisis de varianza, el cual permitió comparar los datos de remoción en base a los valores medios, el análisis agrupa o separa cuantificando la influencia de la concentración de entrada, estación y tipo de sistema. Todos los análisis se realizaron para un 90 % de confianza.

Los resultados indican un valor medio de remoción en cuanto a materia orgánica de 44% en invierno/primavera, 65% en otoño y un 54% en verano. Los valores medios obtenidos en la remoción de amonio fueron de 63% en otoño/verano, 27% en invierno y 6% en primavera. Los resultados indican que existen altos niveles de remoción de P durante el verano/otoño con un valor medio de 40%, sin embargo, en invierno/primavera la remoción disminuye a un 6%.

Los resultados del análisis de varianza indican que existe un marcado efecto de la combinación planta/soporte, de la concentración de entrada y de las estaciones del año, sobre la remoción N- $\text{NH}_4^+$  y P- $\text{PO}_4^{-3}$ . Sin embargo, en la remoción de DQO total, no existe un efecto de la concentración de entrada. El humedal *Scirpus* creciendo en gravilla presenta la remoción más alta de materia orgánica y nutrientes. La remoción de materia orgánica demuestra una mayor estabilidad que la remoción de nutrientes.

8.6.6 Wetland piloto para tratamiento de un efluente metalúrgico. (Maine *et. al.*, 2004). El objetivo del trabajo fue evaluar la capacidad de un humedal construido a escala piloto en la remoción de contaminantes del efluente de una industria metalúrgica. Los principales contaminantes del efluente son Cr, Ni y Zn (efluente industrial), P y N (efluente doméstico). El efluente recibe un tratamiento primario previo. El humedal es del tipo de flujo superficial, de 6 m de largo por 3 m de ancho, con un tiempo de residencia de 7 días e impermeabilizado. Se dispusieron diferentes plantas acuáticas regionales enraizadas y flotantes. Se determinó semanalmente la calidad química del efluente de entrada y de salida. En sedimentos y vegetales se determinó la concentración de P, Cr, Ni y Zn. El

funcionamiento del humedal experimental resultó altamente satisfactorio. La composición del efluente de salida se vio poco afectada por la alta variabilidad del efluente de entrada. Es de destacar la disminución de variables como DQO y DBO en un orden de magnitud, la disminución de hierro, metales pesados, nitrito y nitrato en dos órdenes de magnitud. Las plantas se han adaptado perfectamente al efluente, no evidenciando fitotoxicidad.

8.6.7 Comparación de diferentes plantas acuáticas en la depuración de aguas residuales con humedales de flujo subsuperficial (Martínez *et. al.*, 2005). El objetivo de este trabajo es el estudio de la influencia del tipo de planta acuática emergente sobre la eliminación de contaminantes de un agua residual doméstica en un humedal artificial de flujo subsuperficial a escala piloto. La instalación experimental consta de cinco canales independientes. En cada uno de ellos se plantaron diferentes especies de plantas acuáticas emergentes: Carrizo común (*Phragmites australis*), masiega o mansiega (*Cladium mariscus*), lirio amarillo (*Iris pseudacorus*) y fraile o salicaria (*Lithrum salicaria*), dejando libre de plantas uno de los canales para hacer de referencia. Durante seis meses se analizaron la DQO, NTK y P a la entrada, salida y puntos intermedios de los humedales. Se obtuvieron remociones entre 84 - 91%, 34 - 55% y 17 - 41% respectivamente. Los mejores resultados fueron para la salicaria en la DQO y el P y el lirio en el N. Mediante ajuste se obtuvieron parámetros significativos de un modelo matemático clásico para estudiar la velocidad de depuración.

8.6.8 Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. (Lawrence, 2001). La investigación consistió en evaluar el comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie sembrados con *P. australis* para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

La fuente de agua residual fue captada de la red de desagües de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Las aguas residuales fueron conducidas mediante tuberías hacia un tanque y cilindros sedimentadores y posteriormente se distribuyó hacia dos pantanos instalados en serie sembrados con *Phragmites australis*. Un pantano horizontal seguido de un pantano vertical. El medio poroso de los pantanos estaba constituido por sustratos de grava y arena. El monitoreo del desempeño del sistema de tratamiento se llevó a cabo durante los meses de noviembre de 2000 y enero de 2001, con muestreo semanal. Al

hacer un análisis del comportamiento de los SST y la DBO<sub>5</sub> en el pantano horizontal se obtuvieron remociones de 97,2% y 79,6%. En el pantano horizontal se realizó la mayor remoción de carga orgánica debido a la efectiva mineralización. En contraste un pobre desempeño fue encontrado en el pantano vertical. La DQO es mayormente eliminada en el pantano horizontal (84,3%). En esta etapa el filtro de arena fue significativo para ambos pantanos con un 71,2% para el pantano horizontal y 52,8% para el pantano vertical. El nivel de eficacia en la remoción de coliformes fecales y enteroparásitos en el sistema de tratamiento fue significativo alcanzando porcentajes de 98 y 62% respectivamente.

8.6.9 Tratamiento de efluentes de reactores anaerobios utilizando macrófitas (Rodríguez, 2005). En este trabajo se está realizando estudio comparativo de la capacidad depuradora de tres plantas acuáticas flotantes (*Salvina*, *Pistia* y *E. crassipes*) y una planta acuática emergente (*Typha*) sobre efluentes de reactores anaerobios utilizados para el tratamiento de aguas residuales de beneficio de café.

Se evaluaron, durante un período de 8 meses y realizando análisis semanales, 18 lagunas de 500 litros cada una, para postratar las aguas residuales del lavado del café tratadas por digestión anaerobia, empleando 4 materiales biológicos, 3 de ellos plantas flotantes (Jacinto de agua, Lechuga de agua, *Salvinia*) y uno una planta emergente (Enea), a 3 concentraciones de DQO del afluente provenientes del SMTA instalado en Cenicafé (la granja) y utilizando un tiempo de retención hidráulico de 5 días.

Entre las plantas flotantes, el jacinto y la lechuga de agua mostraron las mayores eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub>, en el estado estable, con valores medios de 80.91% y 80.72% respectivamente, seguidos de la *Salvinia* (79.09%) y del testigo (55.93%). La planta emergente mostró una remoción media del 77.19%, mientras que el testigo en piedra presentó una remoción del 78.10%.

Los mayores porcentajes medios de remoción de DBO<sub>5</sub>, para las plantas flotantes, se presentaron en las lagunas alimentadas con los efluentes del SMTA diluidos al 10% (85.77%), seguido de las alimentadas con el efluente sin diluir (80.08%), mientras que en las lagunas alimentadas con el efluente diluido al 40%, el porcentaje de remoción fue del 74.87%. Comportamiento similar se encontró para la planta emergente.

La tasa de crecimiento para las plantas acuáticas evaluadas mostraron valores que oscilaron entre 594 y 166 toneladas/Ha-año, para el jacinto de agua; entre 629 y 228 toneladas/Ha-año para la lechuga de agua y entre 284 y 105 toneladas/Ha-año para la *Salvinia*, dependiendo de la concentración de materia orgánica en el afluente.

Se analizaron los datos experimentales y se generaron, para cada laguna de experimentación, modelos matemáticos que permiten predecir la DQO del agua residual con base en los sólidos totales y la alcalinidad de la misma y con errores medios cercanos al 30%, los cuales podrían hacer más económicos y ecológicos los monitoreos de los sistemas de tratamiento.

8.6.10 Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales. (Rodríguez *et. al.*). En este trabajo se presenta un estudio comparativo de la capacidad depuradora de cinco plantas acuáticas flotantes (*Salvinia*, *Pistia*, *Azolla*, *Lemna* y *E. crassipes*) sobre aguas residuales domésticas. Los resultados obtenidos demuestran que mediante el uso de estas plantas se pueden obtener remociones de los contaminantes más comunes de las aguas residuales domésticas, siendo significativo las remociones en carga de N entre 7 y 38 kg de NTK/Ha.día y cargas de P entre 0,9 y 13 kg de  $P_{Total}$ /Ha.día, observándose que el tamaño de la planta así como su sistema radicular influyen en la remoción de contaminantes. Las plantas utilizadas presentaron velocidades de crecimiento entre 123 y 487 g/m<sup>3</sup>.día (peso húmedo) con un contenido de proteínas entre 25 y 30% (base seca).

8.6.11 Uso del jacinto de agua en la depuración de aguas residuales (Domínguez *et. al.*, 2000). El objetivo de este estudio consistió en la verificación y cuantificación en la reducción de los principales contaminantes existentes en un agua residual piscícola, mediante el uso del jacinto de agua como un sistema de tratamiento secundario aerobio no aireado. La laguna con jacinto de agua, es un sistema de tratamiento acuático alternativo cuando se combina con una laguna convencional de estabilización principalmente en climas tropicales. Los datos experimentales obtenidos en la laguna fotosintética, frente a los obtenidos en la laguna con jacinto proporcionan una base comparativa en la eficiencia de la remoción cuando se ha operado a diferentes tiempos de

retención. Las lagunas de estudio tienen un área superficial de 137 m<sup>2</sup> y una profundidad de 1,9 m. La densidad de planta usada en la laguna con jacinto fue de 10 kg/m<sup>2</sup>.día (peso húmedo). Los efluentes provenientes del sistema combinado de lagunas presentaron una reducción del 78% en la DBO, del 80% en la DQO, del 40% en los SST satisfacen los límites establecidos por el Ministerio del Medio Ambiente para los vertimientos líquidos a cuerpos de agua receptor.

8.6.12 Variaciones al sistema de filtro anaeróbico de flujo ascendente, humedal de flujo subsuperficial como alternativa de tratamiento de aguas residuales de pequeños y medianos municipios de Colombia. (Paredes *et. al.*, 2003). Se evaluaron diferentes alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales en pequeños y medianos municipios de Colombia, que incluyen Tanque Séptico (TS), Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA), y Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS). Se empezó por estudiar el efecto de diferentes medios de soporte en FAFAs (fragmentos de llanta, anillos de guadua) alternativos al medio tradicional de grava, en unidades operando a tiempos diferentes de residencia (4, 6, 8 y 12 horas). No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en cuanto a remoción de grava y anillos de guadua variaron aproximadamente entre 50% y 70% para DQO<sub>t</sub>, y 40% y 55% para DBO<sub>5</sub>. En las unidades con fragmentos de llanta, la eficiencia media no superó el 50% para todos los parámetros. Posteriormente, descartando los fragmentos de llanta, se estudió el efecto de duplicar el tiempo de retención ya fuera conectando una segunda unidad en serie, o alimentando la mitad del caudal a una unidad de igual volumen. Nuevamente no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en cuanto a eficiencias de remoción de DQO<sub>t</sub>, y DBO<sub>5</sub> (49.5% y 56.6% en promedio respectivamente).

Una vez claro que el conjunto TS-FAFA, no permite alcanzar el mínimo del 80% de remoción en carga establecido por la legislación colombiana, se procedió a evaluar el sistema de postratamiento. Ocho (8) unidades piloto de HAFSS tratando aguas residuales domésticas provenientes de FAFAs, fueron sometidas a estudio. Tres especies vegetales de la zona cafetera colombiana; *Typha* (*Typha sp*), Junco (*Juncos sp*) y Jengibre (*Renealmia alpina*), se sembraron en medios filtrantes de grava y arena, dejando dos unidades sin sembrar como controles. Con tiempos de retención hidráulicos inferiores a 1 día se reportaron remociones de 44%-66% de DQO, 34%-69% de DBO<sub>5</sub>, 13%-70% de

SST, y reducciones en indicadores bacterianos inferiores a dos ciclos log. No se evidenciaron diferencias significativas de rendimiento según especie sembrada, medio filtrante, o entre unidades sembradas y controles. De acuerdo con los resultados obtenidos en canto a tasas de remoción de DBO<sub>5</sub>, los HAFSS pueden completar remociones del 80%, en el conjunto TS-FAFA-HAFSS. A partir de los resultados obtenidos se realizó el escalamiento a la situación real optimizando un sistema existente para el tratamiento de las aguas residuales en el corregimiento "La Florida" del municipio de Pereira, mediante mecanismos de sensibilización, participación y apropiación comunitaria. En el sistema se adecuó un sistema de rejillas y desarenador previo a un TS, se reemplazó el medio de los FAFAs por aros de guadua y se construyeron siete HAFSS con un área total de 750 m<sup>2</sup>, en los que se alternó el medio de soporte (grava y arena gruesa) y la especie vegetal sembrada (jengibre, papiro y *typha* sp). La planta optimizada se encuentra en operación desde diciembre de 2004, y se le ha realizado seguimiento. El sistema se encuentra en periodo de aclimatación tras la construcción de los humedales y ha demostrado eficiencias cercanas al 90% en recientes caracterizaciones.

## 9. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en la Finca Palonegro, vereda La Romelia, Municipio de Chinchiná Caldas. Situada a una altura de 1.381 m.s.m.m, con una temperatura media de 21,4°C, temperatura máxima de 27,1°C, temperatura mínima de 17,3°C, humedad relativa del 74%, 1.865 horas de brillo solar anual y 2.585 mm de precipitación (CENICAFÉ, 2005). Fueron tratadas las aguas residuales domésticas generadas por veinte (20) personas que permanecen constantemente en la finca.

### 9.1 CANALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Las aguas residuales domésticas provenientes de la cocina, el lavadero y las duchas (aguas grises), fueron canalizadas y llevadas a la recámara 1 (Figuras 9a, 9b y 9c) que cumple las siguientes funciones: Contiene una rejilla para retener elementos gruesos y metales que puedan entrar al sistema, homogenizar las aguas que entran al sistema y repartir dichas aguas a las trampas de grasas (dos ubicadas en paralelo), que son tanques de flotación donde la grasa sale a la superficie y es retenida, mientras el agua aclarada sale por una descarga inferior. Después de ser retirada la grasa, las aguas pasan a la recámara 2 (Figura 10), donde se mezclan con las aguas provenientes de los sanitarios (aguas negras) para luego pasar a los tanques sépticos (tres ubicados en paralelo) que son recipientes herméticos, a los cuales llegan por tubería las aguas residuales. Los sólidos en suspensión se descomponen allí por procesos anaeróbicos formando más líquidos, lodos que van al fondo y natas que flotan. Posteriormente las aguas son recogidas en la recámara 3 (Figura 10) para ser llevadas al humedal de flujo libre y luego a los humedales de flujo subsuperficial para terminar de ser depuradas.

El biosistema fue monitoreado periódicamente, tomando muestras en los ocho (8) puntos mostrados anteriormente. Luego de alcanzado el estado estable se realizaron cuatro (4) muestreos. Como criterio de estado estable se tomó que la variación de la remoción de  $DBO_5$  entre los puntos 5 y 8 fuera menor que el 4%.



**Figura 9a. Lavadero**

**Figura 9b. Lavaplatos**

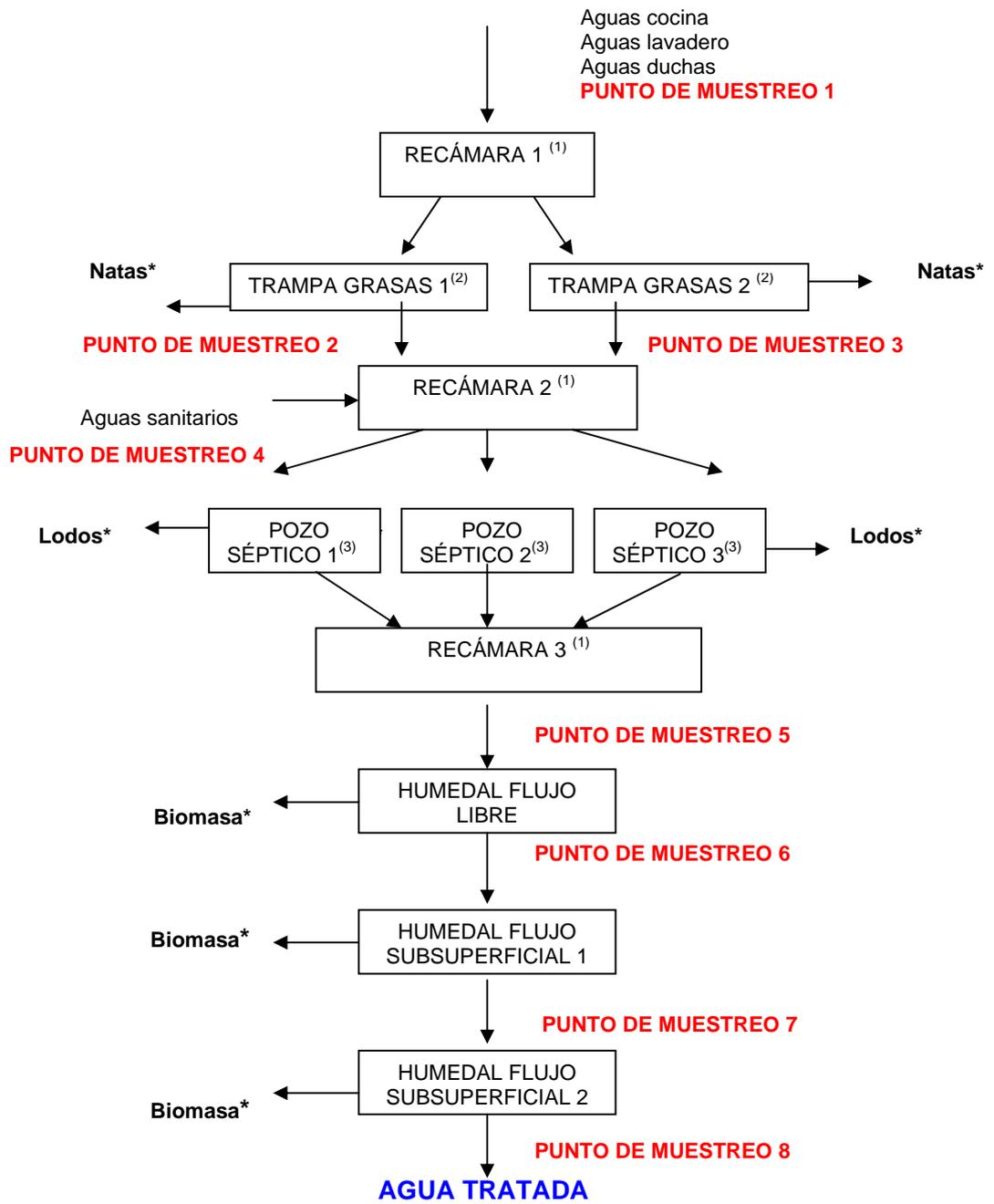


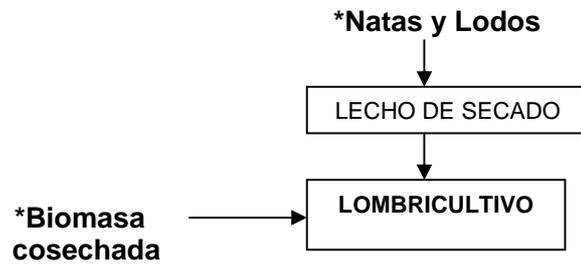
**Figura 9c. Ducha**

En la Figura 10 se muestra el proceso de tratamiento de las aguas residuales.

A las muestras puntuales se les medió en campo Caudal, pH Temperatura y Conductividad Eléctrica.

En el Laboratorio se realizaron los demás análisis relacionados en la Tabla 1.





**Figura 10. Esquema de tratamiento de Aguas Residuales Domésticas**

1. Tanque tipo bebedero. Fabricado en polietileno. Capacidad 250 Litros (Figura 11)
2. Tanque fabricado en polietileno. Capacidad 250 Litros (Figura 12)
3. Tanque séptico. Fabricado en polietileno. Capacidad 2000 Litros (Figura 13)



**Figura 11. Tanque tipo bebedero**

**Figura 12. Trampa de grasas**

Los tanques tipo bebedero, las trampas de grasas y los tanques sépticos fueron instalados siguiendo las recomendaciones dadas por Colombit, en el Manual para Pozos Sépticos (Colombit, 1998).



Figura 13. Tanque séptico

Tabla 1. Análisis físico químicos y microbiológicos realizados en el sistema de tratamiento

PARÁMETRO	MÉTODO
Caudal (Campo)	Volumetría
pH (Campo)	Electrometría
Temperatura (Campo)	Electrometría
Conductividad (Campo)	Electrometría
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Incubación 5 días – Electrodo de Membrana
Demanda Química de Oxígeno	Reflujo cerrado – Titulometría
Sólidos Totales	Evaporación - Secado 103°C-105°C
Sólidos Suspendidos Totales	Secado 103°C-105°C
Aceites y Grasas	Soxhlet
Coliformes Totales y Fecales	Filtración por membrana
Nitrógeno Total	Kjeldahl
Amoniaco	Volumetría
Nitratos	Fotometría
Fosfatos	Cloruro Estagnoso

Tabla 2. Análisis de biomasa y abono orgánico

PARÁMETRO	MÉTODO
Humedad	Secado 70°C / 24 horas
Cenizas	Incineración 475°C / 5 horas
Potasio	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Calcio	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Magnesio	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Hierro Manganeseo	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Zinc	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Cobre	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Fósforo	Espectrofotometría Visible con Molibdato-Vanadato de Amonio

Los análisis físico químicos y microbiológicos fueron realizados en el Laboratorio Ambiental de CORPOCALDAS, acreditado por el IDEAM para los parámetros pH, Conductividad Eléctrica, DBO<sub>5</sub>, DQO y SST, según resolución número 0015 del 24 de Enero de 2003, renovada según resolución número 0041 del 6 de Marzo de 2006 y en el Laboratorio de Biodigestión Anaerobia del Centro Nacional de Investigaciones de Café “PEDRO URIBE MEJÍA” y los análisis de biomasa y abono orgánico fueron realizados en el Laboratorio de Suelos Multilab Agroanalítica.

## 9.2 DISEÑO DEL BIOSISTEMA

9.2.1 Trampa de Grasas. El diseño se realizó de acuerdo con las características propias del agua residual y el caudal a tratar (RAS, 2000), teniendo en cuenta que la capacidad de almacenamiento mínimo expresada en kilogramos de grasa, debe ser por lo menos una cuarta parte del caudal de diseño, expresado en litros / minuto. Se utilizaron dos trampas de grasas de 250 L que se compraron ya construidas.

9.2.2 Tanque Séptico. El volumen útil del tanque séptico fue calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_U = 1000 + N_C(CT + KL_f) \quad (1)$$

donde,

$V_U$  : Volumen útil, m<sup>3</sup>

$N_C$ : Número de contribuyentes = **20 habitantes**

$C$ : Contribución de aguas residuales por contribuyente, L/día/habitante = **150 L/día/habitante** (RAS, 2000).

$T$ : Período de retención por tasa de contribución diaria = **1 día** (RAS, 2000)

$K$ : Tasa de acumulación de lodo digerido en días que equivale al tiempo de acumulación del lodo fresco = **57** (Para ser limpiado cada año) (RAS 2000)

$L_f$ : Contribución de lodo fresco, L/habitante = **1 L/habitante** (RAS 2000)

Reemplazando en la ecuación  **$V_U = 5140$  Litros.**

Se instalaron tres tanques de 2000 L en paralelo.

9.2.3 Humedal de flujo libre. El área superficial se calculó se acuerdo a la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{Q(\ln(C_o) - \ln(C_e))}{K_T(y)(n)} \quad (2)$$

donde,

Q: Caudal, m<sup>3</sup>/seg

A<sub>s</sub>: Área superficial, m<sup>2</sup>

K<sub>T</sub>: K<sub>20</sub><sup>(1,06)(T-20)</sup>

K<sub>20</sub>: 0,678 d<sup>-1</sup>, para aguas residuales domésticas (Borrero, 1999)

n: Porosidad 0,65 a 0,75 (los valores menores son para vegetación densa y madura) (Borrero, 1999)

asumiendo que:

Q = 3 m<sup>3</sup>/día = 3000 L/día

DBO<sub>5</sub> (afluente) = 300 mg/L (COPOCALDAS, 2004)

Remoción = 45%

DBO<sub>5</sub> (efluente) = 165 mg/L

n= 0,7 (0,65+0,75)/2

y= 0,5 m

Temperatura promedio = 22 °C

K<sub>22</sub>= 0,439

Reemplazando en la ecuación (2) se obtiene:

**A<sub>s</sub> = 12 m<sup>2</sup>**

**Volumen = 6 m<sup>3</sup>**

**Volumen/Caudal = Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) = 2 días**

**El humedal de flujo libre construido fue de 8 m (largo) x 1,5 m (ancho) x 0,5 m (profundidad)**

La profundidad de la excavación fue 0,6 m y fue el nivel del agua se mantuvo en 0,5 m. (Figura 14)

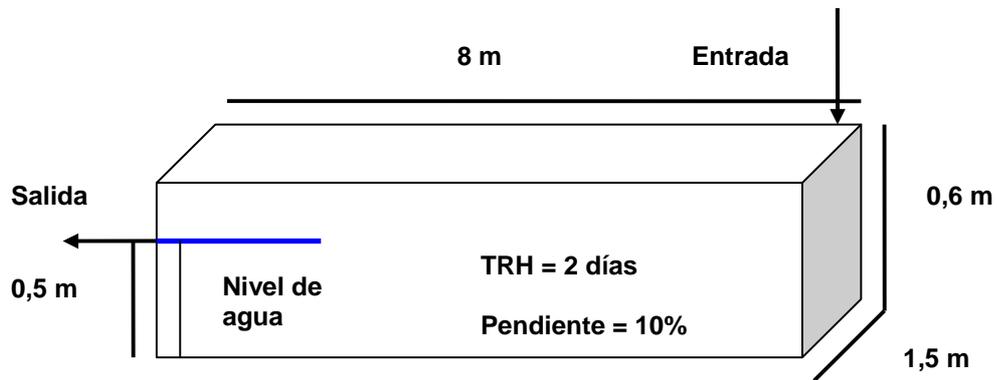


Figura 14. Esquema Humedal Flujo Libre



Figura 15. Humedal de Flujo Libre

9.2.4 Humedal de flujo subsuperficial. El área superficial se calculó se acuerdo a la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{Q(\ln(C_o) - \ln(C_e))}{K_T(y)(n)} \quad (2)$$

donde,

Q: Caudal, m<sup>3</sup>/seg

A<sub>s</sub>: Área superficial del humedal de flujo subsuperficial, m<sup>2</sup>

K<sub>T</sub>: K<sub>20</sub><sup>(1,06)(T-20)</sup>

K<sub>20</sub>: 1,104 d<sup>-1</sup>

n: Porosidad, 0,38 grava media (Borrero, 1999)

asumiendo que,

$$Q = 3 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$\text{DBO}_5 \text{ (afluente)} = 165 \text{ mg/L}$$

$$\text{DBO}_5 \text{ (efluente)} = 30 \text{ mg/L}$$

$$n = 0,38 \text{ (grava media)}$$

$$y = 0,5 \text{ m}$$

$$K_T: K_{20}^{(1,06)^{(T-20)}}$$

$$K_{22}: 1,233 \text{ d}^{-1}$$

$$\text{Temperatura promedio} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$$

Reemplazando en la ecuación (2) se obtiene:

$$A_s = 24 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen} = 12 \text{ m}^3$$

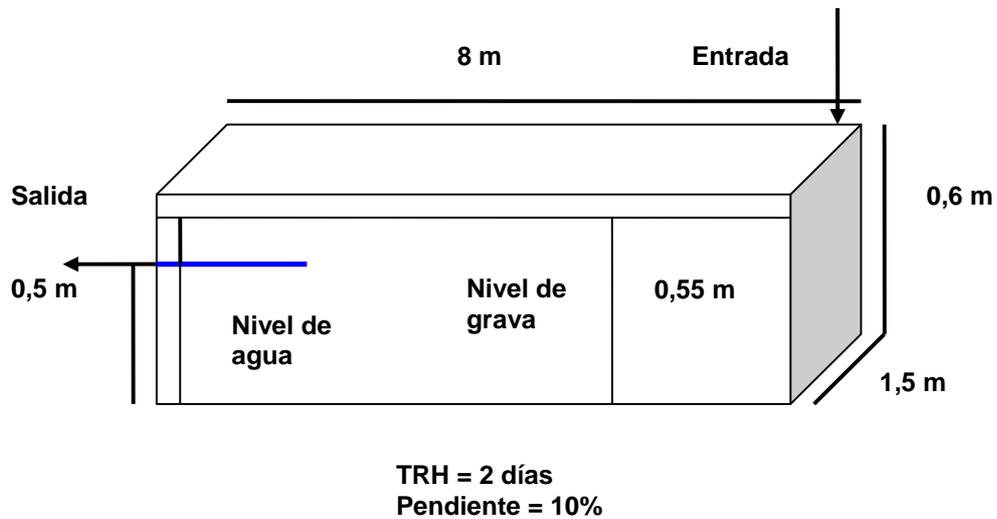
$$\text{Volumen/Caudal} = \text{TRH} = 4 \text{ días}$$

**Se construyeron dos humedales de flujo subsuperficial de 8 m (largo) x 1,5 m (ancho) x 0,5 m (profundidad).**

La profundidad de las excavaciones fue 0,6 m, se colocó grava media lavada hasta 0,55 m y el nivel del agua se mantuvo en 0,5 m. (Figura 17)



**Figura 16. Humedal de Flujo Subsuperficial**



**Figura 17. Esquema Humedales Flujo Subsuperficial**

### 9.3 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE Y OPERACIÓN DEL BIOSISTEMA

La selección del lugar apropiado para instalar el biosistema de tratamiento de aguas residuales, fue una variable importante que se estudió cuidadosamente, para ello se siguieron las siguientes normas:

- Se ubicó en un sitio donde no ocasionara contaminación a cuerpos de agua y alejado mínimo 3,5 metros (horizontal) de la casa o sus dependencias.
- No se localizó en una zona pantanosa, con un nivel freático alto o sujeto a posibles inundaciones.
- Se instaló en un sitio que permitió desarrollar la pendiente especificada para las tuberías domiciliarias.
- Se buscó un terreno que permitió realizar la menor excavación posible.
- Se ubicó lejos de árboles y arbustos que con sus ramas busquen abastecerse del agua almacenada y puedan desnivelar o romper los tanques y sus tuberías.

- **Tanques tipo bebedero (Recámaras) (Colombit, 1998)**

Se realizaron excavaciones para enterrar los tanques. El bebedero se instaló sobre una superficie plana, nivelada y lisa de mayor área que el tanque. A la recámara 1 se le instaló una rejilla para evitar el paso de elementos gruesos al sistema.



**Figura 18. Recámara 1**

- **Trampas de grasas (Colombit, 1998)**

Fueron enterradas garantizando una constante inspección y retiro de la capa de grasas acumulada. Se realizó una excavación, teniendo en cuenta la posición de los orificios de entrada (más alto) y salida (mas bajo del tanque). Sobre el fondo de la misma se vació una cama de arena, de aproximadamente 5 cm nivelada y compactada sobre el cual se apoyaron los tanques. Para nivelar las presiones se llenaron los tanques con agua hasta el nivel inferior de la tubería de salida y luego entre el espacio comprendido por las paredes del tanque y las de las excavaciones, se dispusieron capas de arena compactadas una a una con pisones.



**Figura 19. Trampa de grasas**

- **Tanque séptico (Colombit, 1998)**

Se tuvieron en cuenta las mismas recomendaciones que para la instalación de las trampas de grasas.

- **Humedales de flujo libre y subsuperficial**

Se realizaron excavaciones de 8 metros de largo, 1,5 metros de ancho y 0,5 metros de profundidad, dichas excavaciones se impermeabilizaron con AGROBLACK.



**Figura 20. Excavaciones humedales flujo libre y subsuperficial**

#### 9.4 IMPERMEABILIZACIÓN DE LOS HUMEDALES

Los dos tipos de humedales requieren que se coloque una barrera impermeable para impedir que se contamine con agua residual el subsuelo o el agua subterránea.

El fondo de los humedales fue cuidadosamente alisado con AGROBLACK (plástico negro, calibre 6) y fue nivelado cuidadosamente de lado a lado y en la totalidad de la longitud del lecho. El fondo de los humedales tenían una ligera pendiente del 10% para asegurar el drenaje, de forma que se asegure que se proporcionarán todas las condiciones hidráulicas necesarias para el flujo del sistema.

En el caso de los humedales de flujo subsuperficial el medio granular fue colocado directamente sobre el AROBLACK ya que este plástico tiene las propiedades mecánicas necesarias para soportarlo sin llegar a perforarse.

El sistema fue techado para que la lluvia no interfiera en los caudales y en el comportamiento como tal del sistema.

## 9.5 VEGETACIÓN

Es de vital importancia en ambos humedales establecer la vegetación con la densidad apropiada, en el caso del humedal de flujo libre se sembraron *E. crassipes* y *P. stratiotes* de manera que cubrieran el 75% del área superficial efectiva, lo que representó 50 kg de *E. crassipes* y 4 kg de *P. stratiotes* y en el caso del humedal de flujo subsuperficial se sembraron rizomas de *Heliconias* con una densidad de 20 plantas/m<sup>2</sup>, estos rizomas fueron enterrados en la grava 10 cm hacia arriba del cuello del mismo (Figura 23), los tipos de heliconias sembrados fueron: *Heliconia stricta* Huber cv. *Las Cruces*, *Heliconia wagneriana* cv. *roja*, *H. psittacorum* x *H. marginata* cv. *Crema* y *Heliconia bihai* cv. *Bucky*. (Figuras 24 a y 24b), donados por Heliconias El Rosario, Chinchiná, Caldas.

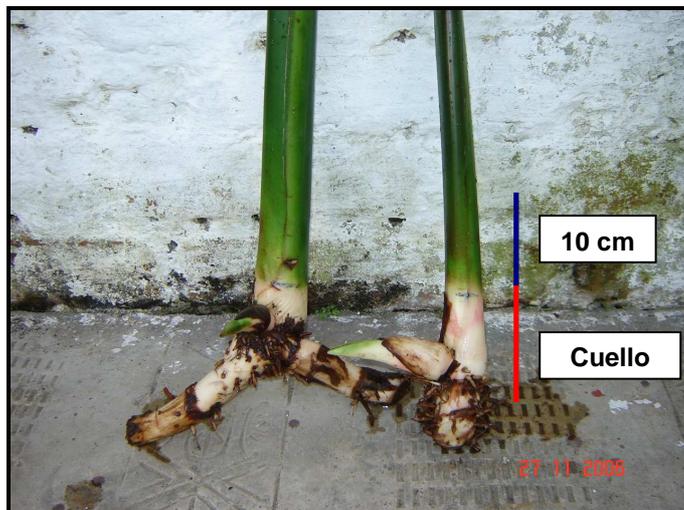


Figura 21. Rizomas Heliconias



Figura 22 a. Especies de heliconias sembradas ([www.heliconiaselrosario.com](http://www.heliconiaselrosario.com))



**Figura 22 b. Especies de Heliconias sembradas ([www.heliconiaselrosario.com](http://www.heliconiaselrosario.com))**

## 9.6 EVALUACIÓN DEL SISTEMA

Además de las variables enumeradas en la Tabla 1, se determinaron la temperatura máxima, mínima y media, la humedad relativa, la precipitación y el brillo solar en la estación Naranjal, cercana a la finca Palonegro, municipio de Chinchiná, perteneciente a CENICAFÉ.

La biomasa fue cosechada y caracterizada. Se realizaron dos cosechas y por lo tanto dos caracterizaciones. Dicha biomasa se llevó a CENICAFÉ donde se realizaron los ensayos de degradación mediante el proceso de lombricultura (Figura 25) y se calcularon el tiempo de proceso, los rendimientos de transformación en abono orgánico y se le realizaron los siguientes análisis: N - P - K - Ca - Mg - Fe - Mn - Zn - Cu, Humedad y Cenizas.

## 9.7 BIOSISTEMA DE LOMBRICOMPOSTAJE A PARTIR DE MACRÓFITAS

Se montaron lombricultivos a partir de biomasa de *E. crassipes* y *Heliconias*, dado que no se presentó incremento en la biomasa de *P. stratiotes*.

Las plantas de *E. crassipes* fueron picadas a un tamaño de partícula de aproximadamente dos centímetros y presentaron una humedad del 83,9% y un pH de 7,3.

Se montaron cuatro (4) canastillas plásticas, con un área superficial de 0,14 m<sup>2</sup> conteniendo cada una de éstas 2 kg de lombricompuesto (el cual se envió a caracterizar), 0,7 kg de lombriz roja (para tener una densidad de 5 kg de lombriz/m<sup>2</sup>) y a las cuales se les adicionó, por canastilla, 2,5 kg de *E. crassipes* fresco.

En el proceso de transformación, la parte de la planta que mostró menor velocidad de degradación fueron las raíces.



**Figura 23. Lombricultivo a partir de las macrófitas cosechadas en el presente estudio**

## 10. PRESUPUESTO

En la Tabla 3 se presentan los costos de construcción del biosistema, en la Tabla 4 se presentan los costos de los análisis físico químicos y microbiológicos realizados a las aguas residuales y en la Tabla 5 se presentan los costos de los análisis realizados a la biomasa cosechada y al abono orgánico producido.

**Tabla 3. Materiales y Precios**

<b>ELEMENTO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO</b> [\$]	<b>COSTO TOTAL</b> [\$]
Tanque séptico	3 UND	350.000/UND	1.050.000
Trampa de grasas	2 UND	75.000/UND	150.000
Tanques tipo bebedero con tapa	3 UND	145.000/UND	435.000
Tubería 2 pulgadas	100 metros	4.650/m	465.000
Tubería 4 pulgadas	80 metros	10.000/m	800.000
Codo 2 pulgadas	15 UND	1.200/UND	18.000
Codo 4 pulgadas	15 UND	5.000/UND	75.000
T 2 pulgadas	15 UND	2.500/UND	37.500
T 4 pulgadas	15 UND	6.500/UND	97.500
Llave de abertura fácil PVC	3 UND	13.000/UND	39.000
Unión macho 2 pulgadas	6 UND	5.000/UND	30.000
Unión hembra 2 pulgadas	6 UND	5.000/UND	30.000
Silka negra	2 Tubos	20.000/Tubo	40.000
Agroblack (5 m ancho x 40 m largo) Calibre 6	1 rollo	188.000/rollo	250.000
Plástico tipo invernadero (6 m ancho x 20 m largo) Calibre 6	20 m	9.200/m	190.000
Arena	2 m <sup>3</sup>	20.000/m <sup>3</sup>	40.000
Grava media	4 volquetas	250.000/volqueta	1.000.000
Puntilla 2 pulgadas	2 lb	2.500/lb	5.000
Fibra de plástico	2 rollos	7.500/rollo	15.000
Pegante para PVC	1 galón	116.000/galón	116.000
Limpiador para PVC	1 galón	56.000/galón	56.000
Oficial	30 días	42.000/día	1.260.000
Ayudante	30 días	32.000/día	960.000
Heliconias	360 rizomas	1.000/rizoma	360.000
<b>TOTAL</b>			<b>7.519.000</b>

**Tabla 4. Costo de los análisis físico químicos y microbiológicos**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>COSTO UNITARIO [\$]</b>	<b>NÚMERO DE ANÁLISIS</b>	<b>COSTO TOTAL [\$]</b>
Caudal	2.200	48	105.600
pH, Temperatura, Conductividad	8.300	48	398.400
Demanda Bioquímica de Oxígeno	38.700	48	1.857.600
Demanda Química de Oxígeno	38.700	48	1.857.600
Sólidos Totales	8.000	48	384.000
Sólidos Suspendidos Totales	9.800	48	470.400
Aceites y Grasas	33.200	48	1.593.600
Coliformes Totales y Fecales	21.900	48	1.051.200
Nitrógeno Total	19.000	48	912.000
Amoniaco	9.400	48	451.200
Nitratos	11.100	48	532.800
Fosfatos	12.200	48	585.600
<b>TOTAL</b>			<b>10.200.000</b>

**Tabla 5. Costo de análisis de biomasa y abono orgánico**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>NÚMERO DE ANÁLISIS</b>
Nitrógeno	12
Fósforo	12
Potasio	12
Calcio	12
Magnesio	12
Hierro	12
Manganeso	12
Zinc	12
Cobre	12
Humedad	12
<b>COSTO POR MUESTRA</b>	<b>\$100.000</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>\$1.200.000</b>

## 11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 11.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LAS AGUAS RESIDUALES

En la Figura 10 se describió el proceso de tratamiento de las aguas residuales domésticas y se definieron los puntos de muestreo.

De las tablas 6 a la 11 se presenta la caracterización físico química y microbiológica de las aguas residuales domésticas

**Tabla 6. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 1. Noviembre 21 de 2006**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8
Q [L/seg]	0,19	0,032	0,060	0,42	0,057	0,024	0,027	0,028
pH	7,5	5,8	6,1	6,8	5,7	6,0	6,4	6,6
T [°C]	21,7	22,0	21,8	21,5	22,1	21,6	22,4	22,8
C.E [μS/cm]	94	185	173	924	531	574	596	656
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	106	386	418	1.002	402	214	188	80
DQO [mg/L]	187	695	715	2.025	590	400	301	206
ST [mg/L]	316	---	---	1.715	---	---	---	497
SST [mg/L]	160	165	197	1.430	197	63	58	33
Aceites y grasas [mg/L]	15	35	42	98	---	---	---	46
NTK [mg/L]	4,8	---	---	211	48,0	33,3	23,4	16,2
NH <sub>3</sub> [mg/L]	1,4	---	---	61,6	25,2	23,8	15,4	8,40
NO <sub>3</sub> [mg/L]	0,65	---	---	24,1	4,63	16,5	4,90	63,4
PO <sub>4</sub> [mg/L]	0,16	---	---	12,6	4,50	4,50	1,40	0,51
CT [UFC/100 mL]	190*10 <sup>3</sup>	---	---	474*10 <sup>6</sup>	---	---	---	95*10 <sup>3</sup>
E. coli [UFC/100 mL]	143*10 <sup>3</sup>	---	---	456*10 <sup>6</sup>	---	---	---	32*10 <sup>3</sup>

Observaciones: ARD generadas por 17 personas

**Tabla 7. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 2. Noviembre 30 de 2006**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8
Q [L/seg]	0,070	0,024	0,014	0,43	0,059	0,10	0,080	0,040
pH	9,2	6,5	7,1	7,3	5,7	6,5	6,7	7,1
T [°C]	20,6	21,4	21,5	20,3	22,4	21,6	22,3	22,0
C.E [μS/cm]	132	217	212	200	497	526	778	608
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	192	271	239	515	340	152	137	95
DQO [mg/L]	480	525	430	990	790	354	268	226
ST [mg/L]	499	520	490	830	---	---	---	461
SST [mg/L]	259	152	112	671	258	70	59	42
Aceites y grasas [mg/L]	20	15	21	64	---	---	---	4
NTK [mg/L]	8,40	9,80	9,80	50,4	39,2	39,2	28,0	19,6
NH <sub>3</sub> [mg/L]	ND	ND	ND	33,6	22,4	20,3	17,5	15,4
NO <sub>3</sub> [mg/L]	41,3	14,6	17,3	47,9	12,3	4,60	3,00	57,0
PO <sub>4</sub> [mg/L]	0,49	0,59	0,48	7,60	4,20	3,10	1,90	0,71
CT [UFC/100 mL]	126*10 <sup>3</sup>	259*10 <sup>3</sup>	187*10 <sup>3</sup>	286*10 <sup>7</sup>	---	---	---	74*10 <sup>3</sup>
E. coli [UFC/100 mL]	29*10 <sup>3</sup>	165*10 <sup>3</sup>	99*10 <sup>3</sup>	229*10 <sup>7</sup>	---	---	---	11*10 <sup>3</sup>

Observaciones: ARD generadas por 24 personas

**Tabla 8. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 3. Diciembre 6 de 2006**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8
Q [L/seg]	0,043	0,031	0,067	0,44	0,096	0,017	0,012	0,005
pH	6,8	5,3	5,8	6,2	5,6	6,3	6,6	6,7
T [°C]	22,1	22,5	22,5	21,6	22,5	22,1	23,1	22,4
C.E [μS/cm]	148	300	262	258	511	465	594	659
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	601	582	873	1.332	419	171	54	25
DQO [mg/L]	845	1.095	1.485	3.710	675	320	310	76
ST [mg/L]	836	1.056	1.409	5.550	---	---	---	447
SST [mg/L]	229	205	389	3.512	230	66	43	40
Aceites y grasas [mg/L]	12	71	69	44	---	---	---	1
NTK [mg/L]	14,0	18,2	19,6	195	42,0	22,4	25,2	16,8
NH <sub>3</sub> [mg/L]	1,40	4,20	1,40	7,00	25,9	18,2	19,6	14,0
NO <sub>3</sub> [mg/L]	30,0	52,0	61,0	78,0	14,7	3,20	2,10	3,10
PO <sub>4</sub> [mg/L]	2,39	1,99	1,99	16,5	5,36	3,05	1,20	0,06
CT [UFC/100 mL]	288*10 <sup>3</sup>	266*10 <sup>3</sup>	248*10 <sup>3</sup>	137*10 <sup>7</sup>	---	---	---	72*10 <sup>3</sup>
E. coli [UFC/100 mL]	168*10 <sup>3</sup>	198*10 <sup>3</sup>	218*10 <sup>3</sup>	97*10 <sup>7</sup>	---	---	---	8*10 <sup>3</sup>

Observaciones: ARD generadas por 16 personas

**Tabla 9. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 4. Diciembre 13 de 2006**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8
Q [L/seg]	0,050	0,15	0,10	0,90	0,005	0,008	0,009	0,010
pH	7,0	5,1	5,2	5,8	5,7	6,6	6,5	6,5
T [°C]	20,8	22,1	21,7	20,6	21,7	20,9	22,1	21,4
C.E [μS/cm]	120	250	248	113	530	441	485	445
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	290	422	569	384	325	91	50	23
DQO [mg/L]	555	680	1.065	1.360	506	250	240	64
ST [mg/L]	484	534	790	2.780	---	---	---	295
SST [mg/L]	350	270	580	1.670	176	44	44	25
Aceites y grasas [mg/L]	23	104	67	42	---	---	---	ND
NTK [mg/L]	8,4	14,0	18,2	12,6	39,2	21,0	16,8	19,6
NH <sub>3</sub> [mg/L]	1,40	7,70	2,10	7,70	29,4	16,1	16,1	18,2
NO <sub>3</sub> [mg/L]	23,0	24,0	12,0	11,0	4,10	2,50	2,30	0,80
PO <sub>4</sub> [mg/L]	1,06	2,16	2,11	4,13	4,75	2,69	1,95	0,99
CT [UFC/100 mL]	27*10 <sup>3</sup>	145*10 <sup>3</sup>	97*10 <sup>3</sup>	35*10 <sup>7</sup>	---	---	---	11*10 <sup>3</sup>
E. coli [UFC/100 mL]	6*10 <sup>3</sup>	106*10 <sup>3</sup>	67*10 <sup>3</sup>	8*10 <sup>7</sup>	---	---	---	3*10 <sup>3</sup>

Observaciones: ARD generadas por 13 personas

**Tabla 10. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 5. Enero 3 de 2007**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8
Q [L/seg]	0,083	0,025	0,049	0,63	0,06	0,013	0,012	0,017
pH	6,6	4,9	5,2	6,9	5,5	6,6	6,7	6,6
T [°C]	21,7	22,0	21,9	20,3	22,4	21,0	21,9	22,0
C.E [μS/cm]	180	274	296	503	525	575	554	544
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	376	280	931	503	391	152	54	25
DQO [mg/L]	673	524	1.358	1.650	600	312	125	90
ST [mg/L]	873	554	1.575	1.404	---	---	---	384
SST [mg/L]	360	105	354	1.127	123	34	34	28
Aceites y grasas [mg/L]	91	28	55	30	---	---	---	8
NTK [mg/L]	11,7	53,2	42,4	133,2	42,6	34,2	27,9	25,8
NH <sub>3</sub> [mg/L]	0,12	2,07	2,57	35,2	27,6	25,6	20,9	14,6
NO <sub>3</sub> [mg/L]	28,0	16,0	63,0	27,0	3,20	3,70	1,80	1,90
PO <sub>4</sub> [mg/L]	1,73	1,80	1,94	11,6	6,21	3,92	1,86	1,12
CT [UFC/100 mL]	198*10 <sup>3</sup>	134*10 <sup>3</sup>	187*10 <sup>3</sup>	97*10 <sup>7</sup>	---	---	---	16*10 <sup>3</sup>
E. coli [UFC/100 mL]	136*10 <sup>3</sup>	86*10 <sup>3</sup>	121*10 <sup>3</sup>	49*10 <sup>7</sup>	---	---	---	4*10 <sup>3</sup>

Observaciones: ARD generadas por 17 personas

**Tabla 11. Caracterización físico química y microbiológica ARD. Muestreo 6. Enero 16 de 2007**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8
Q [L/seg]	0,063	0,019	0,030	1,00	0,056	0,008	0,010	0,016
pH	6,2	4,9	5,2	5,9	5,3	6,2	6,4	6,5
T [°C]	24,2	23,5	23,2	22,2	23,5	22,6	24,1	23,8
C.E [μS/cm]	570	238	202	275	563	574	599	584
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	12.900	437	318	928	360	186	61	25
DQO [mg/L]	40.500	1.080	717	3.360	1.070	370	165	94
ST [mg/L]	13.923	459	519	3.960	---	---	---	309
SST [mg/L]	1.239	146	134	3.520	230	43	33	33
Aceites y grasas [mg/L]	280	40	27	23	---	---	---	8
NTK [mg/L]	27,6	18,5	22,6	15,1	137	48,5	33,6	40,0
NH <sub>3</sub> [mg/L]	1,18	0,34	ND	11,7	25,5	23,7	22,0	17,7
NO <sub>3</sub> [mg/L]	2.300	34,0	31,0	2,00	2,50	2,60	1,20	1,20
PO <sub>4</sub> [mg/L]	20,0	1,69	1,02	2,71	5,93	4,46	2,21	1,98
CT [UFC/100 mL]	76*10 <sup>3</sup>	29*10 <sup>3</sup>	37*10 <sup>3</sup>	124*10 <sup>5</sup>	---	---	---	136*10 <sup>1</sup>
E. coli [UFC/100 mL]	62*10 <sup>3</sup>	17*10 <sup>3</sup>	22*10 <sup>3</sup>	98*10 <sup>5</sup>	---	---	---	28*10 <sup>1</sup>

Observaciones: ARD generadas por 21 personas

ARD: Aguas Residuales Domésticas

Q: Caudal

T: Temperatura

C.E: Conductividad Eléctrica

DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

ST: Sólidos Totales

SST: Sólidos Suspendidos Totales

NTK: Nitrógeno Total Kjeldahl

NH<sub>3</sub>: Nitrógeno Amoniacal

NO<sub>3</sub>: Nitratos

PO<sub>4</sub>: Fosfatos

CT: Coliformes Totales

UFC: Unidades Formadoras de Colonias

ND: No Detectable

## 11.2 REMOCIONES REALIZADAS POR EL BIOSISTEMA CONSTRUIDO

La remoción de carga orgánica, en términos de DBO<sub>5</sub>, DQO, ST y SST, al igual que la remoción de N, P y microorganismos patógenos (coliformes) realizada por el biosistema de tratamiento e evaluó así: Remoción realizada por todo el biosistema calculada entre los puntos 1 y 4 (entrada de aguas grises y negras) y el punto 8 (salida del biosistema) y la remoción realizada por las macrófitas evaluada entre los puntos 5 (entrada al humedal de flujo libre) y el punto 8 (salida del biosistema).

**Tabla 12. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 1. Noviembre 21 de 2006**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 4	PROMEDIO PONDERADO PUNTOS 1 Y 4*	PUNTO 5	PUNTO 8	REMOCIÓN (PUNTOS 1-4 Y PUNTO 8) [%]	REMOCIÓN (PUNTO 5 Y PUNTO 8) [%]
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	106	1.002	441	402	80	81,86	80,10
DQO [mg/L]	187	2.025	886	590	206	76,75	65,08
ST [mg/L]	316	1.715	780	---	497	36,31	---
SST [mg/L]	160	1.430	631	197	33	94,77	83,25
Aceites y grasas [mg/L]	15	98	44	---	46	-4,52	---
NTK [mg/L]	4,8	211	89,5	48,0	16,2	81,91	66,25
NH <sub>3</sub> [mg/L]	1,4	61,6	26,1	25,2	8,40	67,86	66,67
NO <sub>3</sub> [mg/L]	0,65	24,1	10,2	4,63	63,4	-518,81	-1.269,33
PO <sub>4</sub> [mg/L]	0,16	12,6	5,32	4,50	0,51	90,42	88,67
CT [UFC/100 mL]	190*10 <sup>3</sup>	474*10 <sup>6</sup>	199*10 <sup>6</sup>	---	95*10 <sup>3</sup>	99,95	---
E. coli [UFC/100 mL]	143*10 <sup>3</sup>	456*10 <sup>6</sup>	191*10 <sup>6</sup>	---	32*10 <sup>3</sup>	99,98	---

\* El promedio ponderado se calculó multiplicando el caudal por la concentración.

**Tabla 13. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 2. Noviembre 30 de 2006**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 4	PROMEDIO PONDERADO PUNTOS 1 Y 4	PUNTO 5	PUNTO 8	REMOCIÓN (PUNTOS 1-4 Y PUNTO 8) [%]	REMOCIÓN (PUNTO 5 Y PUNTO 8) [%]
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	192	515	235	340	95	59,55	72,06
DQO [mg/L]	480	990	459	790	226	50,79	71,39
ST [mg/L]	499	830	392	---	461	-17,65	---
SST [mg/L]	259	671	307	258	42	86,30	83,72
Aceites y grasas [mg/L]	20	64	29	---	4	86,17	---
NTK [mg/L]	8,40	50,4	22,3	39,2	19,6	11,95	50,00
NH <sub>3</sub> [mg/L]	ND	33,6	14,4	22,4	15,4	-6,59	31,25
NO <sub>3</sub> [mg/L]	41,3	47,9	23,5	12,3	57,0	-142,68	-363,41
PO <sub>4</sub> [mg/L]	0,49	7,60	3,30	4,20	0,71	78,50	83,09
CT [UFC/100 mL]	126*10 <sup>3</sup>	286*10 <sup>7</sup>	122*10 <sup>7</sup>	---	74*10 <sup>3</sup>	99,99	---
E. coli [UFC/100 mL]	29*10 <sup>3</sup>	229*10 <sup>7</sup>	98*10 <sup>7</sup>	---	11*10 <sup>3</sup>	99,99	---

**Tabla 14. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 3. Diciembre 6 de 2006**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 4	PROMEDIO PONDERADO PUNTOS 1 Y 4	PUNTO 5	PUNTO 8	REMOCIÓN (PUNTOS 1-4 Y PUNTO 8) [%]	REMOCIÓN (PUNTO 5 Y PUNTO 8) [%]
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	601	1.332	612	419	25	95,91	94,03
DQO [mg/L]	845	3.710	1.669	675	76	95,44	88,74
ST [mg/L]	836	5.550	2.478	---	447	81,96	---
SST [mg/L]	229	3.512	1.555	230	40	97,42	82,61
Aceites y grasas [mg/L]	12	44	20	---	1	94,97	---
NTK [mg/L]	14,0	195	86,4	42,0	16,8	80,56	60,00
NH <sub>3</sub> [mg/L]	1,40	7,00	3,14	25,9	14,0	-345,83	45,95
NO <sub>3</sub> [mg/L]	30,0	78,0	35,6	14,7	3,10	91,29	78,91
PO <sub>4</sub> [mg/L]	2,39	16,5	7,36	5,36	0,06	99,18	98,88
CT [UFC/100 mL]	288*10 <sup>3</sup>	137*10 <sup>7</sup>	602*10 <sup>6</sup>	---	72*10 <sup>3</sup>	99,99	---
E. coli [UFC/100 mL]	168*10 <sup>3</sup>	97*10 <sup>7</sup>	426*10 <sup>6</sup>	---	8*10 <sup>3</sup>	99,99	---

**Tabla 15. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 4. Diciembre 13 de 2006**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 4	PROMEDIO PONDERADO PUNTOS 1 Y 4	PUNTO 5	PUNTO 8	REMOCIÓN (PUNTOS 1-4 Y PUNTO 8) [%]	REMOCIÓN (PUNTO 5 Y PUNTO 8) [%]
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	290	384	360	325	23	93,61	92,92
DQO [mg/L]	555	1.360	1.252	506	64	94,89	87,35
ST [mg/L]	484	2.780	2.526	---	295	88,32	---
SST [mg/L]	350	1.670	1.520	176	25	98,35	85,79
Aceites y grasas [mg/L]	23	42	39	---	ND	100	---
NTK [mg/L]	8,4	12,6	11,8	39,2	19,6	-66,67	50,00
NH <sub>3</sub> [mg/L]	1,40	7,70	7,00	29,4	18,2	-160,00	38,09
NO <sub>3</sub> [mg/L]	23,0	11,0	11,0	4,10	0,80	92,76	80,49
PO <sub>4</sub> [mg/L]	1,06	4,13	3,77	4,75	0,99	73,74	79,16
CT [UFC/100 mL]	27*10 <sup>3</sup>	35*10 <sup>7</sup>	315*10 <sup>6</sup>	---	11*10 <sup>3</sup>	99,99	---
E. coli [UFC/100 mL]	6*10 <sup>3</sup>	8*10 <sup>7</sup>	72*10 <sup>6</sup>	---	3*10 <sup>3</sup>	99,99	---

**Tabla 16. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 5. Enero 3 de 2007**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 4	PROMEDIO PONDERADO PUNTOS 1 Y 4	PUNTO 5	PUNTO 8	REMOCIÓN (PUNTOS 1-4 Y PUNTO 8) [%]	REMOCIÓN (PUNTO 5 Y PUNTO 8) [%]
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	376	503	350	391	25	92,85	93,60
DQO [mg/L]	673	1.650	1.100	600	90	91,82	85,00
ST [mg/L]	873	1.404	961	---	384	60,05	---
SST [mg/L]	360	1.127	743	130	28	96,23	77,23
Aceites y grasas [mg/L]	91	30	26	---	8	69,86	---
NTK [mg/L]	11,7	53,2	35	42,6	25,8	25,53	39,44
NH <sub>3</sub> [mg/L]	0,12	35,2	22,3	27,6	14,6	34,50	47,10
NO <sub>3</sub> [mg/L]	28,0	27,0	19	3,20	1,90	90,21	40,62
PO <sub>4</sub> [mg/L]	1,73	11,6	7,49	6,21	1,12	85,04	81,96
CT [UFC/100 mL]	198*10 <sup>3</sup>	97*10 <sup>7</sup>	614*10 <sup>6</sup>	---	16*10 <sup>3</sup>	99,99	---
E. coli [UFC/100 mL]	136*10 <sup>3</sup>	49*10 <sup>7</sup>	310*10 <sup>6</sup>	---	4*10 <sup>3</sup>	99,99	---

**Tabla 17. Remociones realizadas por el biosistema. Muestreo 6. Enero 16 de 2007**

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO 4	PROMEDIO PONDERADO PUNTOS 1 Y 4	PUNTO 5	PUNTO 8	REMOCIÓN (PUNTOS 1-4 Y PUNTO 8) [%]	REMOCIÓN (PUNTO 5 Y PUNTO 8) [%]
DBO <sub>5</sub> [mg/L]	12.900	928	1.741	360	25	98,56	93,06
DQO [mg/L]	40.500	3.360	5.911	1.070	94	98,40	91,21
ST [mg/L]	13.923	3.960	4.837	---	309	93,61	---
SST [mg/L]	1.239	3.520	3.598	230	33	99,08	85,65
Aceites y grasas [mg/L]	280	23	40,6	---	8	80,31	---
NTK [mg/L]	27,6	15,1	16,8	137	40,0	-137,55	70,80
NH <sub>3</sub> [mg/L]	1,18	11,7	11,8	25,5	17,7	-50,32	30,59
NO <sub>3</sub> [mg/L]	2.300	2,00	147	2,50	1,20	99,18	52,00
PO <sub>4</sub> [mg/L]	20,0	2,71	3,97	5,93	1,98	50,12	66,61
CT [UFC/100 mL]	76*10 <sup>3</sup>	124*10 <sup>5</sup>	12*10 <sup>6</sup>	---	136*10 <sup>1</sup>	99,99	---
E. coli [UFC/100 mL]	62*10 <sup>3</sup>	98*10 <sup>5</sup>	10*10 <sup>6</sup>	---	28*10 <sup>1</sup>	99,99	---

Se realizaron cuatro (4) monitoreos en estado estable, obteniendo remociones de DBO<sub>5</sub> entre los puntos 5 (entrada al humedal de flujo libre) y 8 (salida del biosistema), de 80,10%, 72,06%, 94,03%, 92,92%, 93,60% y 93,06%, con coeficientes de variación de 10,04%, -30,50%, 1,18%, -0,74%, 0,59% respectivamente. (Tablas 12 a 17).

11.2.1 Remoción de carga en estado estable en términos de DBO<sub>5</sub> y DQO. La remoción de DBO<sub>5</sub> realizada por el biosistema, calculada entre la entrada al humedal de flujo libre y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 92,92% y 94,03% y la remoción realizada por todo en sistema calculada entre la entrada de aguas grises y negras y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 92,85% y 98,56% y la remoción de DQO, en estado estable, del biosistema calculada entre la entrada al humedal de flujo libre y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 85,00% y 91,21% y la remoción realizada por todo en sistema calculada entre la entrada de aguas grises y negras y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 91,82% y 98,40%.

Según Rodríguez (2003) la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas es llevada a cabo por una variedad de complejos procesos físicos, químicos y biológicos, que en la mayoría de las ocasiones ocurren simultáneamente. La DBO<sub>5</sub> que se encuentra en forma soluble es removida mediante la degradación biológica realizada por los microorganismos adheridos a la superficie de las plantas, además de los microorganismos que se encuentran en la columna de agua, en los humedales de flujo

libre y los que se encuentran adheridos al medio de soporte en los humedales de flujo subsuperficial. Además, las bajas velocidades que se producen en el sistema, así como las plantas flotantes y emergentes y el medio de soporte, hacen que se favorezca la filtración, floculación y sedimentación de la materia orgánica que se encuentra en forma suspendida. La degradación de los compuestos orgánicos solubles, en su mayoría, se realiza en forma aerobia, sin embargo, en algunos casos la degradación anaerobia puede ser significativa. El oxígeno necesario para soportar los procesos aerobios puede ser suministrado directamente de la atmósfera por difusión, mediante la fotosíntesis de las plantas en el interior de la columna de agua y cedido desde las raíces de las plantas.

11.2.2 Remoción de carga en estado estable en términos de SST. La remoción de sólidos suspendidos calculada entre la entrada al humedal de flujo libre y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 77,23% y 87,35% y la remoción realizada por todo en sistema calculada entre la entrada de aguas grises y negras y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 96,23% y 99,08%. La remoción de SST presentes en las aguas residuales domésticas ocurrió fundamentalmente en las unidades instaladas antes de los humedales (trampas de grasas y tanques sépticos). Los sólidos suspendidos que permanecen en el agua residual son removidos por sedimentación y filtración. Como explica Rodríguez (2003), estos procesos físicos también eliminan una porción significativa de otros contaminantes como carga orgánica, nutrientes y patógenos.

La alta densidad de siembra de *E. crassipes* en el humedal de flujo libre favoreció la alta remoción de sólidos suspendidos.

11.2.3 Remoción en estado estable de NTK. La remoción de NTK calculada entre la entrada al humedal de flujo libre y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 39,44% y 70,80% y la remoción realizada por todo en sistema calculada entre la entrada de aguas grises y negras y la salida del biosistema estuvo comprendida entre -137,55% y 80,56%, para N-NH<sub>3</sub> entre 30,59% y 47,10% y -345,83% y 34,50% y para nitratos entre 40,62% y 80,49% y 90,21% y 99,18% respectivamente. Como lo explica Rodríguez (2003), el mecanismo fundamental para la remoción de N es la nitrificación – denitrificación, además del aprovechamiento de nutriente realizado por las plantas. Pero se considera que cuando no existe cosecha de las plantas o el crecimiento es muy rápido

y se supera la densidad adecuada, no existe remoción y las plantas empiezan a liberar N, lo que puede explicar los altos porcentajes negativos de remoción encontrados.

El N orgánico que entra al biosistema, generalmente lo hace en forma de materia orgánica sólida, que sufre un proceso de descomposición llamado amonificación, mediante el cual al N orgánico es transformado en amonio por una amplia variedad de bacterias heterótrofas. La nitrificación es el proceso mediante el cual el amonio es oxidado a nitrato por bacterias nitrificantes.

Es importante anotar que cuando ocurrió remoción de NTK, la mayor parte de ésta se llevo a cabo en los tanques sépticos lo que se puede asociar a fenómenos de sedimentación y amonificación por hidrólisis de proteínas y posterior degradación de aminoácidos , todo esto favorecido por el alto tiempo de retención en dichos tanques (Madera *et.al.*, 2003).

Un aspecto importante que puede incidir en las bajas remociones de N y P es que para obtener altas remociones, se requieren fuentes de carbono y oxígeno, elementos que en algunas ocasiones pueden ser bajos en las aguas residuales domésticas y en las micorrizas de las plantas debido a una baja transferencia de oxígeno de la planta a la zona de las raíces.

11.2.4 Remoción en estado estable de P. La remoción de  $PO_4$  calculada entre la entrada al humedal de flujo libre y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 66,61% y 98,88% y la remoción realizada por todo en sistema calculada entre la entrada de aguas grises y negras y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 50,12% y 99,18%.

Los principales mecanismos para la remoción de P son: Adsorción, formación de complejos, precipitación y el aprovechamiento por parte de las plantas.

Cuando la cosecha de las plantas no se realiza a tiempo gran cantidad de plantas mueren y gran parte de P es devuelto al agua lo que causa una baja remoción de este nutriente.

11.2.5 Remoción en estado estable de patógenos. La remoción de coniformes totales y coniformes fecales realizada por todo el sistema calculada entre la entrada de aguas grises y negras y la salida del biosistema fue de 99,99%. Las bacterias patógenas y los virus son removidos, fundamentalmente, por adsorción, sedimentación, filtración y prelación (Rodríguez, 2003), además las condiciones ambientales no son favorables para los patógenos lo que trae como consecuencia su muerte. En el caso de los humedales con flujo libre, las radiaciones ultravioletas también pueden provocar la muerte de dichos microorganismos.

El biosistema evaluado presentó, en estado estable, altas eficiencias de remoción de materia orgánica, sólidos en suspensión, N, P y patógenos, mayores a las reportadas por otros estudios.

Rodríguez *et. al.*, realizaron tratamiento de aguas residuales domésticas en un humedal de flujo libre, obteniendo remociones de DBO<sub>5</sub> de 80,85% y 86,67% para *P. stratiotes* y *E. crassipes* respectivamente, remociones de NTK de 72% para ambas plantas acuáticas, remociones de SST de 83,25% para *E. crassipes*, remociones de P de 76,00% y remociones de patógenos de 98,82% igualmente para *E. crassipes*, en un tiempo de retención hidráulico de un día.

Madera *et. al.* (2003) evaluaron un sistema combinado para tratamiento de aguas residuales domésticas, que consistía de un tanque séptico, un filtro anaerobio y un humedal de flujo subsuperficial, con un tiempo de retención hidráulico promedio de 1,5 días, en dos sitios diferentes del Valle del Cauca, Colombia y obtuvieron eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub> en todo el sistema comprendidas entre 68% y 82%, DQO entre 77% y 82%, SST entre 81% y 88%, NTK entre 14% y 18%, P entre 15% y 26% y coniformes fecales entre 60% y 75%.

Bernal *et. al.* (2003), construyeron un humedal de flujo subsuperficial para tratar aguas residuales municipales de la región del Caribe, Colombia, con un tiempo de retención hidráulico de 6 días. Las macrófitas utilizadas fueron *Thypha sp.* y encontraron remociones de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST de 92,3%, 90% y 97% respectivamente.

Rivas (2001), evaluó un humedal para tratamiento de aguas residuales domésticas generadas por una unidad habitacional de 350 personas en Veracruz, México, el sistema consistía en un tanque séptico, dos humedales de flujo libre, con un tiempo de retención hidráulico promedio de siete días. Fueron sembradas diez especies vegetales, de las cuales la *Typha sp* era la especie dominante y una laguna facultativa y encontró remociones de DBO<sub>5</sub> de 88,9%, SST entre 12% y 15%, P entre 60% y 66%, NTK 85%, N-NH<sub>3</sub> 90% y coniformes fecales 99,99%.

Zuñiga (2004), realizó una evaluación del proceso de depuración de aguas residuales municipales mediante humedales de flujo subsuperficial con alimentación horizontal y tiempo de retención hidráulicos promedio de seis días, para una zona de clima mediterráneo en Chile, evaluó el efecto de dos macrófitas (*Scirpus* y *Typha Latifolia*) y del tamaño del soporte, grava y gravilla, con un diámetro de 2,8 y 1,2 cm, respectivamente. Sobre la remoción de materia orgánica y nutrientes. La alimentación se realizó con agua residual doméstica sin pretratamiento. En otoño se obtuvo la mayor remoción de DQO que alcanzó un 80% en los humedales *Scirpus*/grava, *Scirpus*/gravilla y *Typha*/grava. En invierno, la temperatura ambiental disminuyó, registrándose valores mínimos de -3 °C durante las primeras horas de la mañana y máximos de 27°C durante el día, esto influyó en la remoción de DQO total, la cual disminuyó a un valor promedio de 50 %, tanto para *Typha* como para *Scirpus* en ambos soportes. La remoción de DQO total en el humedal sin soporte durante verano y otoño fue de 45 % y durante invierno y primavera esta disminuyó a un valor promedio de 26 %. Debido a que la remoción de DQO se asocia a la presencia de bacterias, este resultado indica que la concentración de microorganismos fue similar en todos los humedales. Durante el verano y otoño se registraron los valores más altos de remoción de amonio en los humedales con *Scirpus*, que removieron en promedio un 80 %, para *Typha* se observaron valores superiores a 60% creciendo en grava, gravilla. Sin embargo, en verano se destacó la capacidad de *Typha*/sin soporte, que alcanzó un 90% de remoción de amonio y se atribuye a la capacidad de evaporación debido a las altas temperaturas ambientales registradas. Para la remoción de P se apreció que la presencia de macrófitas y de soporte fue vital para lograr niveles de remoción altos, ya que tanto en el humedal con *Typha* sin soporte como en el control, sin macrófita, la remoción de P fue de un 15 % durante verano y otoño. En este mismo período, la remoción de P en los sistemas con planta y soporte la remoción fue mayor a

un 50%. La capacidad de los humedales para remover P depende de la concentración de P en la alimentación.

Martínez *et. al.* (2005), estudiaron la influencia del tipo de planta acuática emergente sobre la eliminación de contaminantes de un agua residual doméstica en un humedal artificial de flujo subsuperficial a escala piloto. La instalación experimental constaba de cinco canales independientes. En cada uno de ellos se plantaron diferentes especies de plantas acuáticas emergentes: Carrizo común (*Phragmites australis*), masiega o mansiega (*Cladium mariscus*), lirio amarillo (*Iris pseudacorus*) y fraile o salicaria (*Lithrum salicaria*), dejando libre de plantas uno de los canales para hacer de referencia. Durante seis meses se analizaron la DQO, NTK y P a la entrada, salida y puntos intermedios de los humedales. Se obtuvieron remociones entre 84% y 91%, 34% y 55% y 17% y 41% respectivamente. Los mejores resultados fueron para la salicaria en la DQO y P y el lirio en el N.

Lawrence (2001), evaluó el comportamiento de dos humedales artificiales instalados en serie, el primero de flujo horizontal y el segundo de flujo vertical, ambos sembrados con *P. australis* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Al realizar un análisis del comportamiento de los SST y la DBO<sub>5</sub> en el humedal de flujo horizontal se obtuvieron remociones de 97,2% y 79,6%. En el humedal de flujo horizontal se realizó la mayor remoción de carga orgánica debido a la efectiva mineralización. En contraste, un pobre desempeño se encontró en el humedal de flujo vertical. La DQO fue mayormente eliminada en el humedal de flujo horizontal (84,3%). En esta etapa el filtro de arena fue significativo para ambos humedales, con un 71,2% para el humedal de flujo horizontal y 52,8% para el humedal de flujo vertical. El nivel de eficiencia en la remoción de coliformes fecales y enteroparásitos en el sistema de tratamiento fue significativo alcanzando porcentajes de 98% y 62% respectivamente.

Paredes *et. al.* (2003), evaluaron diferentes alternativas para el tratamiento de aguas residuales en pequeños y medianos municipios de Colombia, que incluyen Tanque Séptico (TS), Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA), y Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS). Ocho (8) unidades piloto de HAFSS tratando aguas residuales domésticas provenientes de FAFAs, con tiempos de retención hidráulicos

inferiores a un día, fueron sometidas a estudio. Tres especies vegetales de la zona cafetera colombiana; *Typha* (*Typha sp*), *Junco* (*Juncos sp*) y Jengibre (*Renealmia alpina*), fueron sembradas en medios filtrantes de grava y arena, dejando dos unidades sin sembrar como controles. Con tiempos de retención hidráulicos inferiores a 1 día se reportaron remociones de 44%-66% de DQO, 34%-69% de DBO<sub>5</sub>, 13%-70% de SST.

#### 11.2.6 Remoción efectuada en cada uno de los humedales

**Tabla 18. Remociones efectuadas por cada uno de los humedales. Año 2006**

	NOVIEMBRE 21/06			NOVIEMBRE 30/06			DICIEMBRE 6/06			DICIEMBRE 13/06		
	FL	FSS1	FSS2	FL	FSS1	FSS2	FL	FSS1	FSS2	FL	FSS1	FSS2
DBO <sub>5</sub>	46,77	12,15	57,45	55,29	9,87	30,66	59,19	68,42	53,70	72,00	45,05	54,00
DQO	32,20	24,75	31,56	55,19	24,29	15,67	52,59	3,13	75,48	50,59	4,00	77,33
SST	68,02	7,94	43,10	72,87	15,71	28,81	71,30	34,85	6,98	75,00	0	43,18
NTK	30,63	29,73	30,77	0	28,57	30,00	46,67	-12,5	44,44	46,43	20,00	-16,7
NH <sub>3</sub>	5,56	35,29	45,45	9,38	13,79	12,00	29,73	-7,7	14,29	45,24	0	-13,0
NO <sub>3</sub>	-256	70,30	-1.193	62,60	34,78	-1.800	78,23	34,38	-47,6	39,02	8,00	65,22
PO <sub>4</sub>	0	68,89	63,57	26,19	38,71	62,63	43,10	60,66	95,00	43,37	27,51	49,23

**Tabla 19. Remociones efectuadas por cada uno de los humedales. Año 2007**

	ENERO 3/07			ENERO 13/07		
	FL	FSS1	FSS2	FL	FSS1	FSS2
DBO <sub>5</sub>	61,13	54,47	53,70	48,33	67,20	59,02
DQO	48,00	59,94	28,00	65,42	55,41	43,03
SST	72,36	0	17,65	81,30	23,26	0
NTK	19,73	18,35	7,63	64,59	30,79	-19,0
NH <sub>3</sub>	7,14	18,23	30,31	6,72	7,28	19,53
NO <sub>3</sub>	-15,6	51,35	-5,6	3,85	52,00	0
PO <sub>4</sub>	36,88	52,55	39,78	24,79	50,45	10,41

- FL: Humedal de Flujo Libre  
 FSS1: Humedal de Flujo Subsuperficial 1  
 FSS2: Humedal de Flujo Subsuperficial 2

En la Figuras 26 a la 32 se puede observar que el mayor porcentaje de remoción de sólidos en suspensión es realizada por el humedal de flujo libre, debido a que los mecanismos de remoción son físicos (sedimentación y filtración) y la alta densidad de

plantas sembradas facilitó dichos procesos. La mayor remoción de carga orgánica se llevó a cabo en los tanques sépticos y en el humedal de flujo libre, en los primeros la descomposición se lleva a cabo por procesos anaeróbicos formando lodos que van al fondo de los tanques y que posteriormente ayudan al proceso de depuración y en los segundos por acción de los microorganismos e igualmente, por procesos de filtración y sedimentación. Las mayores remociones de N y P, fueron llevadas a cabo unas veces en el humedal de flujo libre y otras en los humedales de flujo subsuperficial, tanto por acción de los microorganismos como por acción de las plantas que lo asimilan para su crecimiento.

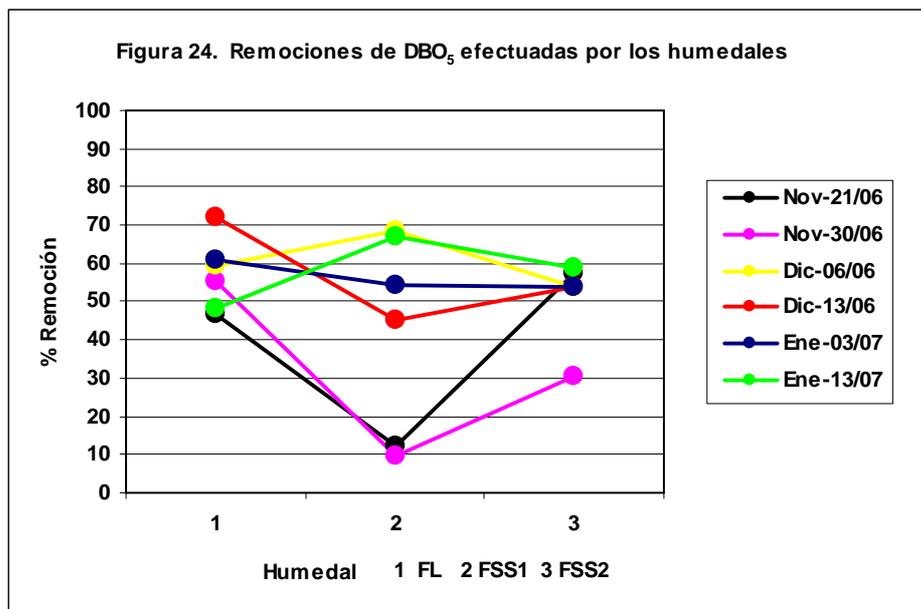


Figura 25. Remociones de SST efectuadas por los humedales

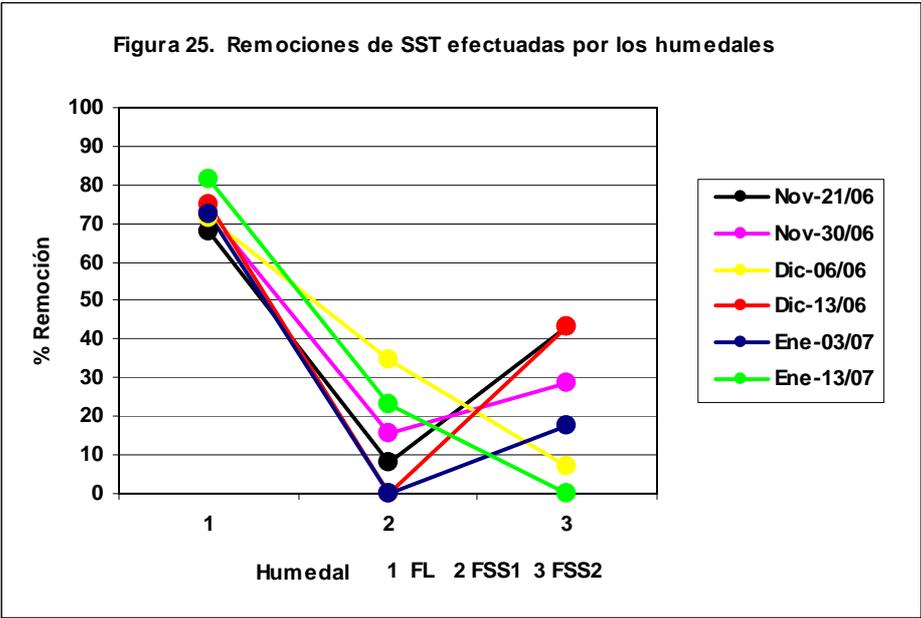


Figura 26. Remociones de DQO efectuadas por los humedales

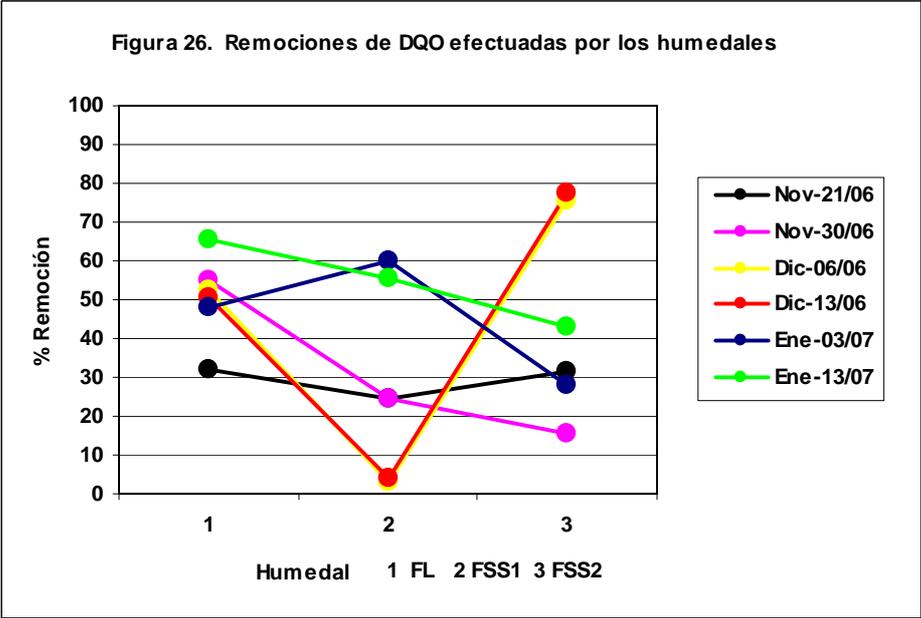


Figura 27. Remociones de NTK efectuadas por los humedales

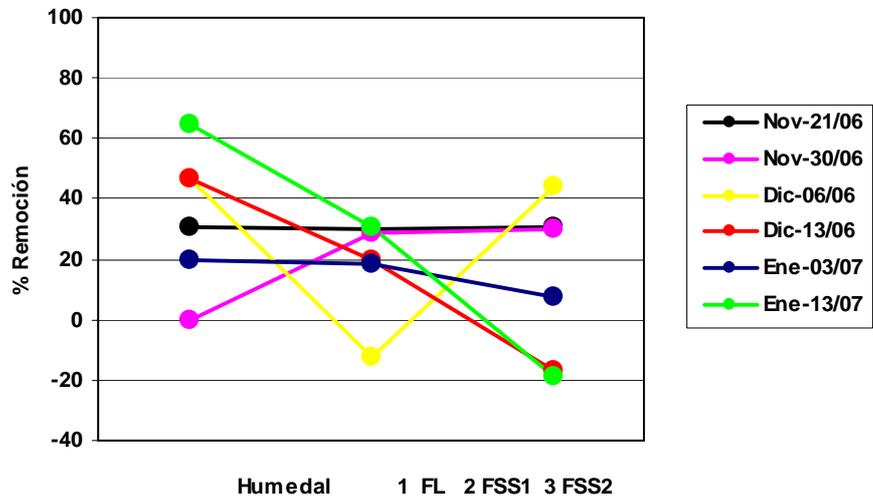


Figura 28. Remociones de NH<sub>3</sub> efectuadas por los humedales

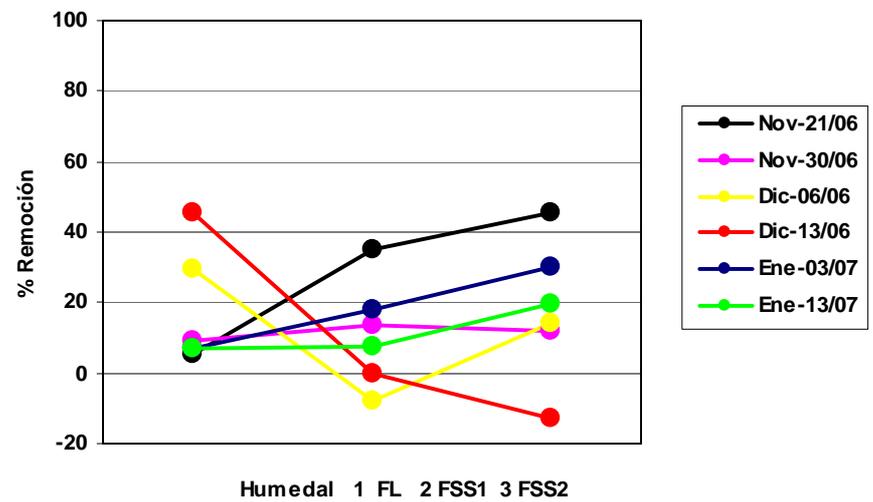


Figura 29. Remociones de NO<sub>3</sub> efectuadas por los humedales

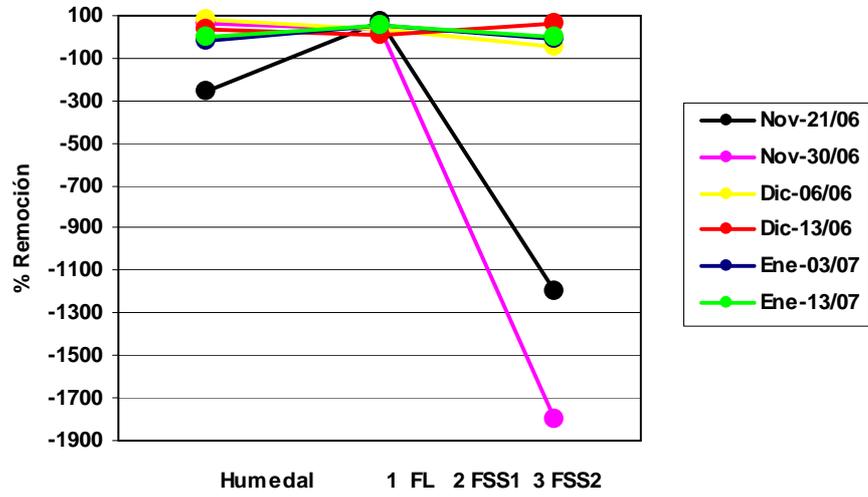
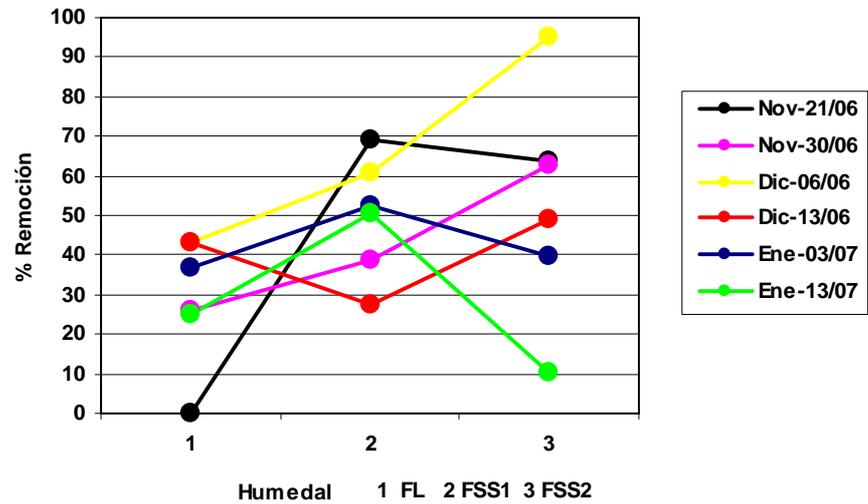


Figura 30. Remociones de PO<sub>4</sub> efectuadas por los humedales



El tamaño de los humedales es determinado por el contaminante que requiere la mayor área para la remoción, en este caso particular la DBO<sub>5</sub>. Esta se refiere a la superficie útil de todo el humedal, que para que sea efectiva, la distribución de flujo del agua residual, debe ser uniforme en toda la superficie lo que se logró gracias a las estructuras apropiadas de entrada y salida del agua en cada humedal.

El diseño inicial se realizó para obtener remociones de carga orgánica expresadas como DBO<sub>5</sub> del 45% en cada humedal (flujo libre y flujo subsuperficial), para un total de remoción del 90%, acorde con lo exigido por la Legislación Colombiana.

Con los datos reales obtenidos en campo se puede realizar un rediseño del sistema de la siguiente manera:

#### **Humedal de flujo libre**

$Q = 4800 \text{ L/día}$  (Caudal promedio de entrada al humedal de flujo libre)

$DBO_5 \text{ (afluente)} = 373 \text{ mg/L}$  (Concentración promedio a la entrada del humedal de flujo libre)

$DBO_5 \text{ (efluente)} = 161 \text{ mg/L}$  (Concentración promedio a la salida del humedal de flujo libre)

$n = 0,7 \text{ (} 0,65 + 0,75 \text{)}/2$

$y = 0,5 \text{ metros}$

$T = 22 \text{ °C}$

$K_{22} = 0,439$

Reemplazando en la ecuación (1)

**$A_s = 26 \text{ m}^2$**

**$V = 13 \text{ m}^3$**

**$V/Q = TRH = 3 \text{ días}$**

**Dos Humedales de 9 m x 1,5 m x 0,5 m**

#### **Humedal de flujo subsuperficial**

$Q = 2160 \text{ L/seg}$  (Caudal promedio de entrada al humedal de flujo subsuperficial)

El caudal disminuye debido a que las plantas absorben parte de ella, además, a las condiciones climáticas que se realizó el estudio ocurre el fenómeno de evaporación.

DBO<sub>5</sub> (afluente) = 161 mg/L (Concentración promedio a la entrada del humedal de flujo subsuperficial)

DBO<sub>5</sub> (efluente) = 46 mg/L (Concentración promedio a la salida del humedal de flujo subsuperficial)

n= 0,38 (grava media)

y= 0,5 metros

K<sub>T</sub>:  $K_{20}^{(1,06)^{(T-20)}}$

K<sub>20</sub>: 1,104 d<sup>-1</sup>

K<sub>22</sub>: 1,233 d<sup>-1</sup>

T = 22 °C

Reemplazando en la ecuación (2)

**A<sub>s</sub> = 12 m<sup>2</sup>**

**V = 6 m<sup>3</sup>**

**V/Q = TRH = 3 días**

**Humedal de 8 m x 1,5 m x 0,5 m**

Los anteriores resultados muestran que es mas eficiente en la remoción de carga orgánica el humedal de flujo subsuperficial.

#### 11.2.7 Carga per cápita

En la Tabla 20 se presentan las cargas per cápita para DBO<sub>5</sub> y SST.

**Tabla 20. Cargas per cápita**

FECHA	NÚMERO HABITANTES	DOTACIÓN [L/hab*día]	DBO <sub>5</sub> GENERADA [kg/hab*día]	SST GENERADOS [kg/hab*día]
Noviembre 21/06	17	3.100	1,37	1,96
Noviembre 30/06	24	1.800	0,42	0,55
Diciembre 6/06	16	2.608	1,60	4,06
Diciembre 13/06	13	6.314	2,27	9,60
Enero 3/07	17	3.639	1,27	4,21
Enero 16/07	22	4.175	7,27	15,02
<b>PROMEDIO</b>	<b>18</b>	<b>3.606</b>	<b>2,37</b>	<b>5,90</b>

La carga per cápita para DBO<sub>5</sub> y SST es de 0,045 kg/hab.\*día (IDEAM, 2000). Se encontraron valores mucho mayores debido a que la toma de muestras fue puntual y se realizó en horas pico de consumo de agua: Primera hora en la mañana, a esta hora el consumo de agua es muy elevado debido a la utilización de las duchas, servicios sanitarios, aguas para preparación de alimentos y lavado de ropa, igualmente al medio día existe un consumo grande de agua debido al uso de los sanitarios, lavamanos y agua para lavado de elementos de cocina. Los caudales de agua encontrados en estas horas pico no son constantes, en la tarde y en la noche estos caudales disminuyen considerablemente. Como consecuencia de lo anterior, se encontraron dotaciones 24 veces mayores que las reportadas por la literatura. Realizando el mismo cálculo con un valor de dotación de 150 L/hab.\*día (RAS, 2000) se obtienen cargas per cápita para DBO<sub>5</sub> y SST de 0,093 kg/hab.\*día y 0,219 kg/hab.\*día, acordes con valores encontrados para zonas rurales (IDEAM, 2000).

Es importante anotar que en el sector rural, además de no contar con la infraestructura adecuada para realizar un buen uso del agua, se tiene poca conciencia de prácticas que conlleven al uso eficiente y ahorro del agua.

Los hábitos alimenticios son otro factor importante que contribuyen a aumentar la carga contaminante.

### 11.3 SANEAMIENTO BÁSICO Y LEGISLACIÓN COLOMBIANA

En el marco del séptimo objetivo de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, la meta número diez, tiene como finalidad reducir a la mitad, en el año 2015, el porcentaje de personas que carecen de acceso sostenible al agua potable y al saneamiento básico, entendiendo como Saneamiento Básico la tecnología de más bajo costo que permite eliminar higiénicamente las excretas y aguas residuales y tener un medio ambiente limpio y sano tanto en la vivienda como en las proximidades de los usuarios.

Está comprobado que el agua de mala calidad es un vehículo propicio para la transmisión de enfermedades como el cólera, hepatitis infecciosa, fiebres tifoideas y paratifoideas, amibiasis, diarreas, esquistosomiasis, etc. (Mira, 2006).

Las estadísticas muestran que las inversiones en cobertura de alcantarillado están enfocadas principalmente al rector urbano, por esta razón la proliferación de enfermedades es alarmante, además los ríos presentan un deterioro en su calidad.

Dado que en la zona rural de Caldas y del Municipio de Manizales es baja la infraestructura de alcantarillado, la instalación de biosistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas ayudarían a solucionar el problema de contaminación, estos sistemas, además de tener un bajo costo de ejecución y mantenimiento, permiten obtener efluentes que cumplen con la Legislación Colombiana, remoción de DBO<sub>5</sub> y SST mayores del 80%, el biosistema evaluado, en estado estable, presentó remociones de DBO<sub>5</sub> comprendidas entre 92,85% y 98,56% y de SST comprendidas entre 96,23% y 99,08% y el aprovechamiento de la biomasa da un valor agregado al biosistema.

El Decreto 1594 de 1984 reglamenta los Usos del Agua y Residuos Líquidos, según el Capítulo III de dicho Decreto, las aguas superficiales pueden tener los siguientes usos: Consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, industrial y transporte.

De acuerdo con las características físico químicas y microbiológicas del agua residual doméstica, después del proceso de depuración realizada por el biosistema de tratamiento, esta agua puede ser reutilizada en agricultura y uso pecuario. En el primer caso no se puede utilizar para riego de frutas que se consumen sin quitar la cáscara y hortalizas de tallo corto, ya que según dicho Decreto, para este fin, los coniformes totales no deberán exceder de 5.000 y los fecales de 1.000 expresado en NMP (número más probable), condición que no cumplen las aguas tratadas por el biosistema evaluado.

La reutilización del agua se constituye como una alternativa de gran relevancia en el Departamento de Caldas, ya que según estudios del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, en Colombia, en el año 2016, en el cual se incrementarán las demandas de agua y bajo el supuesto de ausencia de suficientes medidas de conservación de cuencas y tratamiento de aguas residuales, el 19% de los municipios y el 38% de la población alcanzarían en dicho año un índice de escasez superior al 10%; tales condiciones serían más críticas al considerar las áreas que

abastecen las cabeceras municipales para las cuales cerca al 70% de la población se encontraría en una situación delicada de abastecimiento de agua (IDEAM, 2004).

Las ventajas de la reutilización del agua es principalmente en ahorro del recurso, ya que estadísticas del IDEAM, indican que en la demanda de agua a nivel Nacional, el consumo agropecuario ocupa el primer lugar con 63%, seguido por el consumo energético 31%, consumo humano 5% y por último el consumo industrial con 1% (IDEAM, 2004), además como el biosistema de tratamiento es continuo, se contará con agua para riego tanto en verano como en invierno y el contenido de N, P es un aporte de nutrientes para el suelo y podría representar un ahorro en gastos de fertilizantes.

#### 11.4 BIOMASA COSECHADA

En el humedal de flujo libre se sembraron 50 kg de *E. crassipes* y 4 kg de *P. stratiotes* y en el caso del humedal de flujo subsuperficial se sembraron 240 rizomas de *Heliconias*.

Para *E. crassipes* se realizaron dos cosechas de biomasa, para *P. stratiotes* una cosecha, ya que en la segunda cosecha no se encontró esta planta en el humedal de flujo libre, posiblemente por la diferencia de densidad de siembra entre *E. crassipes* y *P. stratiotes* además el tamaño de *E. crassipes* no permitió el paso de la luz y la transferencia de oxígeno y otros gases hasta el sistema radicular lo que ocasionó la muerte, sumado al largo intervalo de tiempo entre cosecha y cosecha y para las heliconias una cosecha debido a que su crecimiento es muy lento (se tarda de dos a tres meses en brotar el rizoma después de sembrado).

La mayor tasa de crecimiento la presentó *E. crassipes*, seguida por *Heliconias* y por último *P. stratiotes*. (Tabla 22).

**Tabla 21. Resumen de condiciones ambientales. Noviembre de 2006, Diciembre de 2006, Enero de 2007**

CONDICIÓN AMBIENTAL	NOVIEMBRE 2006	DICIEMBRE 2006	ENERO 2007
Precipitación [mm]	356,8	186,0	141,5
Temperatura media [°C]	25,2	26,8	22,2
Temperatura máxima [°C]	27,1	27,1	28,7
Temperatura mínima [°C]	17,6	17,6	18,0
Humedad relativa [%]	70	70	63
Brillo Solar [h]	3,9	4,0	5,4

Como se puede observar (Tablas 21 y 22), para las condiciones climáticas de la finca Palonegro, se obtuvieron altas velocidades de crecimiento de *E. crassipes*, lo que no ocurrió con *P. stratiotes*. Para las *Heliconias* no hay datos reportados.

La literatura reporta velocidades de crecimiento de 0,487 kg/m<sup>2</sup>\*día y 0,290 kg/m<sup>2</sup>\*día para *E. crassipes* y *P. stratiotes*, respectivamente, para tratamiento de aguas residuales domésticas (Rodríguez *et. al.*) y velocidades de crecimiento para *E. crassipes* comprendidas entre 0,163 kg/m<sup>2</sup>\*día y 0,045 kg/m<sup>2</sup>\*día y para *P. stratiotes* comprendidas entre 0,172 kg/m<sup>2</sup>\*día y 0,062 kg/m<sup>2</sup>\*día, para postratar aguas residuales del lavado del café tratadas por digestión anaerobia (Rodríguez, 2005)

**Tabla 22. Biomasa cosechada**

COSECHA	<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>	<i>Heliconias</i>
Cosecha 1 [kg]	26	3	---
Cosecha 1 [kg/m <sup>2</sup> ]	2,17	0,25	---
Cosecha 1 [kg/m <sup>2</sup> *día]	0,066	0,008	---
Cosecha 2 [kg]	90	---	80,6
Cosecha 2 [kg/m <sup>2</sup> ]	7,5	---	3,59
Cosecha 2 [kg/m <sup>2</sup> *día]	0,208	---	0,100

**Tabla 23. Caracterización de la biomasa cosechada. *E. crassipes***

PARÁMETRO	INICIAL	COSECHA 1	ABSORCIÓN COSECHA 1	COSECHA 2	ABSORCIÓN COSECHA 2
Humedad [%]	79,10	89,16	---	91,60	---
Cenizas [%]	20,32	24,12	---	20,72	---
Nitrógeno Total [%]	1,75	2,97	1,22	2,77	---
Fósforo [%]	0,63	0,56	---	0,62	0,06
Potasio [%]	7,19	4,89	---	5,96	1,07
Calcio [%]	1,84	0,83	---	0,93	0,10
Magnesio [%]	0,77	0,24	---	0,29	0,05
Hierro [mg/kg]	363	3.661	3.298	5.234	1.573
Manganeso mg/kg]	1.068	85	---	163	78
Zinc [mg/kg]	169	146	---	98	---
Cobre [mg/kg]	85	18	---	19	1

**Tabla 24. Caracterización de la biomasa cosechada. *P. stratiotes***

PARÁMETRO	INICIAL	COSECHA 1	ABSORCIÓN COSECHA 1
Humedad [%]	86,54	94,13	---
Cenizas [%]	32,56	30,93	---
Nitrógeno Total [%]	1,97	3,75	1,78
Fósforo [%]	0,58	0,75	0,17
Potasio [%]	8,39	5,23	---
Calcio [%]	0,38	1,50	1,12
Magnesio [%]	0,58	0,34	---
Hierro [mg/kg]	4.854	10.320	5.466
Manganeso [mg/kg]	712	259	---
Zinc [mg/kg]	44	97	53
Cobre [mg/kg]	20	15	---

**Tabla 25. Caracterización de la biomasa cosechada. *Heliconias***

PARÁMETRO	INICIAL	COSECHA 1	ABSORCIÓN COSECHA 1
Humedad [%]	77,89	84,49	---
Cenizas [%]	9,41	12,45	---
Nitrógeno Total [%]	2,68	3,07	0,39
Fósforo [%]	0,33	0,37	0,04
Potasio [%]	3,41	4,85	1,44
Calcio [%]	0,57	0,70	0,13
Magnesio [%]	0,32	0,34	0,02
Hierro [mg/kg]	160	274	114
Manganeso [mg/kg]	117	425	308
Zinc [mg/kg]	57	72	15
Cobre [mg/kg]	21	29	8

**Tabla 26. Disponibilidad de N y P Humedal Flujo Libre**

NOV. 21/06		NOV. 30/06		DIC. 3/06		DIC. 13/06		ENERO 3/07		ENERO 13/07	
NTK [mg/L]	PO <sub>4</sub> [mg/L]										
17,0	0	0	1,1	19,6	2,3	18,2	2,1	8,4	2,3	88,6	1,4

**Tabla 27. Disponibilidad de N y P Humedales Flujo Subsuperficial**

NOV. 21/06		NOV. 30/06		DIC. 3/06		DIC. 13/06		ENERO 3/07		ENERO 13/07	
NTK [mg/L]	PO <sub>4</sub> [mg/L]										
17,1	4,0	19,6	2,4	8,4	3,0	1,4	1,7	8,4	2,8	8,6	2,5

Como se observa en las Tablas 23 a 25, existió un aumento en el porcentaje de P y N desde el estado inicial, hasta la cosecha de las plantas, este aumento y remoción de los mismos componentes en el agua residual, es debido a la absorción y posterior utilización de los nutrimentos por parte de las plantas para su crecimiento, por lo tanto se puede observar que existió una relación directa entre la remoción de contaminantes y el tamaño de las plantas. Cabe anotar que en *E. crassipes* y *P. stratiotes* existió disminución de algunos nutrimentos debido al intervalo grande de tiempo entre cosecha y cosecha lo que ocasiona que algunas plantas mueran y gran parte de ellos sean devueltos al agua. Esta disminución no ocurrió con las heliconias ya que estas se encontraban en etapa de crecimiento donde necesitan de los nutrimentos.

Hay que tener en cuenta que la capacidad de adsorción de P por parte de las plantas depende de la presencia de hierro, aluminio o calcio en el agua y el medio poroso, así como de la presencia de minerales de arcilla o materia orgánica. Bajo condiciones aerobias y pH entre neutro y ácido el Fe<sup>+3</sup> se une al fosfato para formar un complejo estable; sin embargo, si el sistema se vuelve anaerobio, el Fe<sup>+3</sup> se reduce a Fe<sup>+2</sup> lo cual conduce a que la adsorción sea menos fuerte y se libere fosfato. La adsorción del fosfato con el calcio ocurre solamente bajo condiciones entre neutras y básicas; mientras que con el aluminio la adsorción solo ocurre a pH neutros y ácidos. Además del carácter reversible del proceso de adsorción de P, el cual depende de las condiciones redox, hay que señalar que la adsorción está también sujeta a la saturación, considerándose que cada planta tiene una capacidad de adsorción limitada y luego de que esto no ocurrirán nuevas adsorciones (Rodríguez, 2003).

Además del proceso de adsorción - desorción, el fosfato también puede ser precipitado con hierro, aluminio y ciertos compuestos del sistema. Este proceso el cual incluye la fijación del fosfato a la matriz de minerales, en el caso de los humedales de flujo subsuperficial y la formación de complejos con metales, tiene una velocidad mucho más lenta que el proceso de adsorción, pero no está sujeto a una saturación tan rápida. Otra forma de remoción de P es mediante la acumulación y almacenamiento en la materia orgánica (Rodríguez, 2003).

El mecanismo fundamental para la remoción del N en los humedales es la nitrificación - denitrificación; la toma por la planta es otra vía, pero se considera que mientras no haya cosecha de plantas no hay remoción, no obstante, hay autores que señalan que por esta vía solo se puede lograr alrededor del 10 % de remoción (Rodríguez, 2003).

11.4.1 Balance de nutrimentos. Realizando un balance de materia para la cantidad de N y P del biosistema se tiene:

Cantidad de N que entra a los humedales (Punto 5) = N promedio de entrada [mg/L] \* Caudal promedio de entrada [L/seg]\* Tiempo de operación del sistema [seg].

**Cantidad de N que entra = 58 mg/L \* 0,055 L/seg\* 4.838.400 seg = 15,43 kg**

Cantidad de N que sale de los humedales (Punto 8): N promedio de salida [mg/L] \* Caudal promedio de salida [L/seg]\* Tiempo de operación del sistema [seg].

**Cantidad de N que sale = 22,5 mg/L \* 0,019 L/seg\* 4.838.400 seg = 2,07 kg**

Cantidad de N que se retira en las plantas: Porcentaje de N en las plantas [%]\* Peso seco de las Plantas [kg/m<sup>2</sup>\*día]\* Tiempo de Operación [días] \* Área de las lagunas [m<sup>2</sup>].

**Cantidad de N que se retira en *E. crassipes* = 0,0122 \* 0,137 [kg/m<sup>2</sup>\*día]\*56 días\*12 m<sup>2</sup> = 1,12 kg**

**Cantidad de N que se retira en *P. stratiotes* = 0,0178 \* 0,008 [kg/m<sup>2</sup>\*día]\*33 días\*12 m<sup>2</sup> = 0,0564 kg**

**Cantidad de N que se retira en *Heliconias* =  $0,0039 * 0,1 \text{ [kg/m}^2\text{*día]} * 50 \text{ días} * 24 \text{ m}^2 = 0,468 \text{ kg}$**

N Entrada = N Salida en el agua + N que se retira en la Plantas + N Sedimentos.

**N Sedimentos =  $15,43 \text{ kg} - 2,07 \text{ kg} - 1,12 \text{ kg} - 0,0564 \text{ kg} - 0,468 \text{ kg}$**

**N Sedimentos =  $11,72 \text{ kg}$**

Igualmente para P:

Cantidad de P que entra a los humedales (Punto 5) = P promedio de entrada [mg/L] \* Caudal promedio de entrada [L/seg]\* Tiempo de operación del sistema [seg].

**Cantidad de P que entra =  $5,16 \text{ mg/L} * 0,055 \text{ L/seg} * 4.838.400 \text{ seg} = 1,37 \text{ kg}$**

Cantidad de P que sale de los humedales (Punto 8): P promedio de salida [mg/L] \* Caudal promedio de salida [L/seg]\* Tiempo de operación del sistema [seg].

**Cantidad de P que sale =  $0,895 \text{ mg/L} * 0,019 \text{ L/seg} * 4.838.400 \text{ seg} = 0,823 \text{ kg}$**

Cantidad de P que se retira en las plantas: Porcentaje de P en las plantas [%]\* Peso seco de las Plantas [kg/m<sup>2</sup>\*día]\* Tiempo de Operación [días] \* Área de las lagunas [m<sup>2</sup>].

**Cantidad de P se que retira en *E. crassipes* =  $0,0006 * 0,137 \text{ [kg/m}^2\text{*día]} * 56 \text{ días} * 12 \text{ m}^2 = 0,0552 \text{ kg}$**

**Cantidad de P que se retira en *P. stratiotes* =  $0,0017 * 0,008 \text{ [kg/m}^2\text{*día]} * 33 \text{ días} * 12 \text{ m}^2 = 0,0054 \text{ kg}$**

**Cantidad de P que se retira en *Heliconias* =  $0,0004 * 0,1 \text{ [kg/m}^2\text{*día]} * 50 \text{ días} * 24 \text{ m}^2 = 0,048 \text{ kg}$**

P Entrada = P Salida en el agua + P que se retira en la Plantas + P Sedimentos.

**P Sedimentos =  $1,37 \text{ kg} - 0,823 \text{ kg} - 0,0552 \text{ kg} - 0,0054 \text{ kg} - 0,048 \text{ kg}$**

**P Sedimentos =  $0,438 \text{ kg}$**

11.4.2 Aporte de N y P a la columna de agua y sedimentos. Si en el humedal de flujo libre, el cual posee un volumen de 6 m<sup>3</sup> y un área de 12 m<sup>2</sup>, se asume que se presenta el 10% de muerte para *E. crassipes* en cada cosecha y este equivale a: 7,6 kg de biomasa para la cosecha 1 (con humedad del 89,16%, y N de 2,97%) y 14 kg para la cosecha 2 (con humedad del 91,60% y N de 2,77%), entonces:

N aportado por el *E. crassipes*. Cosecha 1 = 7,6 Kg \* 0,104\* 0,0297 = 22797 mg.

Una muerte del 10% de la biomasa, representa gran cantidad de biomasa sobretodo en *E. crassipes*, debido a su alta tasa de crecimiento, por lo anterior y por la cantidad de N y P que entran al sistema, debido a que se tratan aguas residuales domésticas, el aporte de N y P a los sedimentos y a la columna de agua es considerable. Entonces, se recomienda realizar la cosecha de biomasa con mayor frecuencia para disminuir la cantidad de nutrimentos que son regresados al agua y a los sedimentos.

**Concentración = 22797 mg / 6000 L = 3,80 mg/L de N**

N aportado por *E. crassipes* al agua. Cosecha 2 = 14 Kg \* 0,084\* 0,0277 = 32575 mg.

**Concentración = 32575 mg / 6000 L = 5,43 mg/L de N**

**Sumando el N aportado en la cosecha 1 y 2 se tiene = 9,23 mg/L**

De igual manera:

N aportado por *P. stratiotes* al agua. Cosecha 1 = 0,7 kg \* 0,0587\* 0,0375 = 1541 mg.

**Concentración = 1541 mg / 6000 L = 0,257 mg/L de N**

N aportado por *P. stratiotes* al agua. Cosecha 2 = 6 kg (en la segunda cosecha no se encontró *P. stratiotes*) \* 0,0587\* 0,0375 = 13207 mg.

**Concentración = 1541 mg / 6000 L = 2,20 mg/L de N**

**Total de N aportado = 9,23 mg/L + 0,257 mg/L+ 2,20 mg/L = 11,69 mg/L, que deberían estar en los sedimentos y en la columna de agua**

Igualmente para P:

P por *E. crassipes* al agua. Cosecha 1 = 7,6 kg \* 0,104\* 0,0056 = 4426 mg.

**Concentración = 4426 mg / 6000 L = 0,738 mg/L de P**

P aportado por *E. crassipes* al agua. Cosecha 2 =  $14 \text{ kg} * 0.084 * 0.0062 = 7291 \text{ mg}$ .

**Concentración =  $7291 \text{ mg} / 6000 \text{ L} = 1,21 \text{ mg/L de P}$**

**Sumando el P aportado en la cosecha 1 y 2 se tiene =  $1,95 \text{ mg/L}$**

De igual manera:

P aportado por *P. stratiotes* al agua. Cosecha 1 =  $0,7 \text{ kg} * 0,0587 * 0,0075 = 308 \text{ mg}$ .

**Concentración =  $308 \text{ mg} / 6000 \text{ L} = 0,0514 \text{ mg/L de P}$**

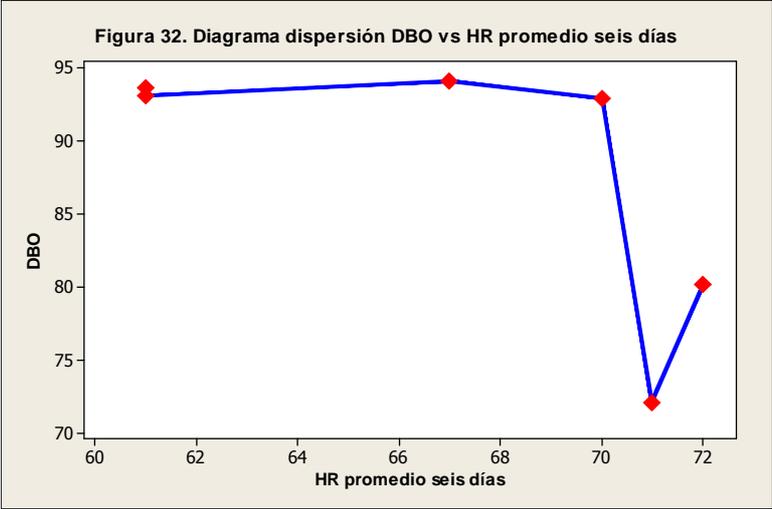
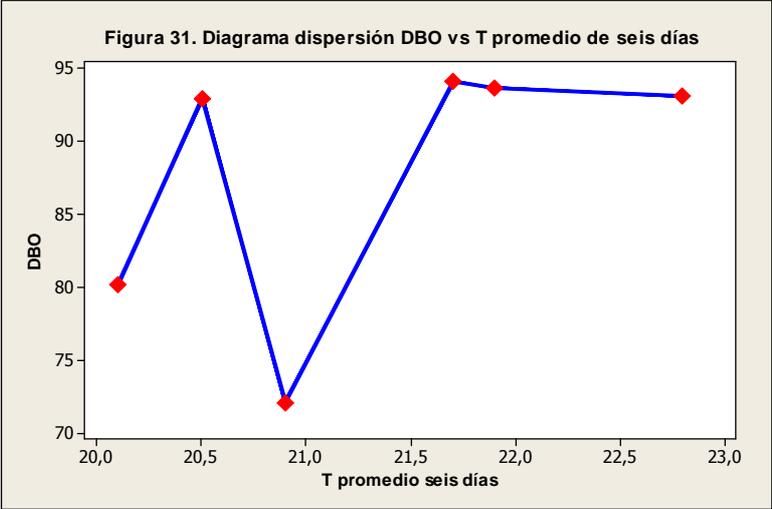
P aportado por *P. stratiotes* al agua. Cosecha 2 = 6 kg (en la segunda cosecha no se encontró *P. stratiotes*) \*  $0,0587 * 0,0075 = 2641 \text{ mg}$ .

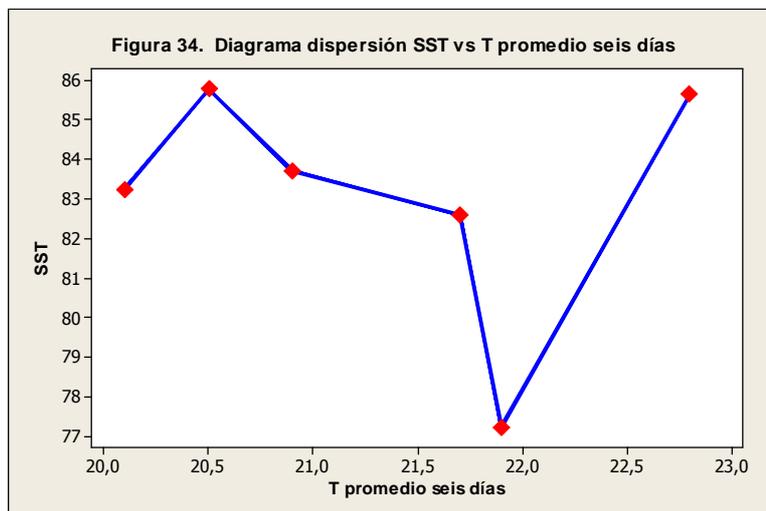
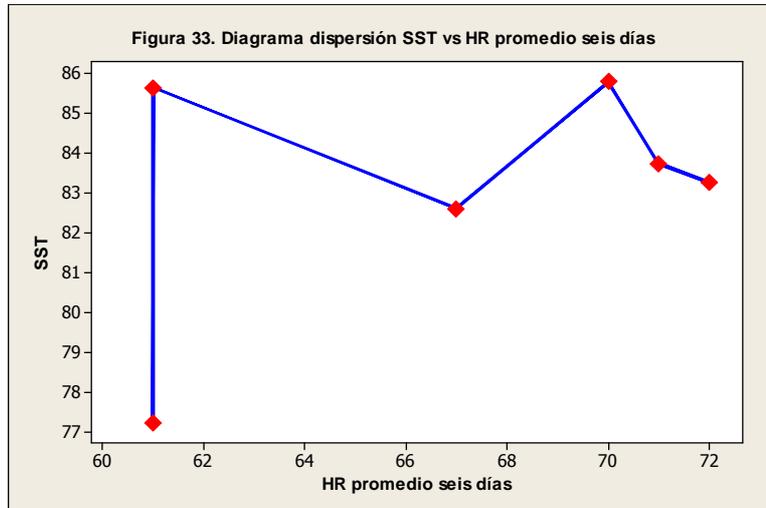
**Concentración =  $2641 \text{ mg} / 6000 \text{ L} = 0,440 \text{ mg/L de P}$**

**Total de P aportado =  $1,95 \text{ mg/L} + 0,0514 \text{ mg/L} + 0,440 \text{ mg/L} = 2,44 \text{ mg/L}$ , que deberían estar en los sedimentos y en la columna de agua**

#### 11.5 RELACIÓN ENTRE CONDICIONES AMBIENTALES, REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN.

Por medio del paquete estadístico MINITAB 14, se realizó un Análisis de Varianza del Modelo de Regresión lineal y se encontró que no existen relaciones lineales entre las remociones de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, NTK, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub> y PO<sub>4</sub>, la Temperatura ambiental promedio y la Humedad Relativa promedio de los seis (6) días anteriores a la toma de las muestras (TRH en los humedales fue de 6 días). (Figuras 31 a 34).





Debido a que solamente se realizaron dos (2) cosechas de biomasa y en algunos casos una (1), estadísticamente no es posible encontrar correlaciones entre la temperatura ambiental, la humedad relativa y el crecimiento de la biomasa.

#### 11.6 OLORES Y VECTORES DE TRANSMISIÓN DE ENFERMEDADES GENERADOS

En el humedal de flujo libre, el espejo de agua está expuesto a la atmósfera, generando un riesgo a la salud asociado a generación de olores y proliferación de vectores transmisores de enfermedades. En los humedales de flujo subsuperficial, el flujo siempre

se mantiene por debajo del medio poroso, lo que le concede un beneficio de aislamiento, evitando los inconvenientes mencionados anteriormente.

Lo aconsejable es que para el tratamiento de aguas residuales domésticas no se utilicen humedales donde el flujo esté expuesto a la atmósfera, tanto espejos de agua como flujos de entrada y salida a cada una de las unidades, para esto se recomienda realizar el vertido al humedal mediante tuberías perforadas que permitan repartir el agua, evitando una descarga puntual que pueda producir flujos de agua preferenciales o perturbaciones agresivas. Además es importante que la entrada del flujo no se realice en forma directa, sino adecuar una pequeña zona, para distribuir homogéneamente el agua en toda la profundidad del humedal y en el caso del humedal de flujo subsuperficial, no ocasionar la acumulación del agua en la superficie, evitando así, proliferación de olores y vectores que atenten contra la salud.

Si se va a realizar la depuración de aguas residuales domésticas con humedales de flujo libre, debido a la alta remoción de carga orgánica y sólidos en suspensión que estos presentan, se recomienda utilizar en la superficie, un material menos denso que el agua, para evitar el espejo de agua, sembrar plantas alrededor del biosistema que actúen como barreras para evitar la proliferación de olores y vectores y construir el humedal en lugares lejanos de donde habiten personas.

En el caso de humedales de flujo subsuperficial, se pueden realizar cambios en cuanto al medio poroso utilizado, lo mas importante de este medio es que tenga la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de el. Otras opciones para el material poroso son arenas, gravas finas o rocas pequeñas, materiales que garantizan una alta permeabilidad en estado compacto y una baja compresibilidad. El medio granular utiliza mecanismos directos e indirectos para la eliminación de agentes contaminantes del agua residual que circula por su interior. El medio es responsable directo de algunas formas de extracción de sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. Para esta extracción la distribución del tamaño de partículas tiene un papel importante: La fracción fina de los limos tiene mucha capacidad de asimilar contaminantes y la fracción arenosa tiene una gran capacidad percoladora pero no elimina contaminantes, ya que estos humedales a grandes rasgos funcionan como filtros horizontales de grava.

También es posible evaluar los humedales de flujo subsuperficial con otro tipo de plantas emergentes. El papel de las plantas en los sistemas de humedales construidos viene determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Estas plantas denominadas macrófitas; éste término incluye plantas vasculares que tienen tejidos que son fácilmente visibles. Se trata de organismos fotoautótrofos, que recogen la energía solar para transformar el carbono inorgánico de la atmósfera en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de las hojas y tallo hasta el medio donde se encuentran las raíces. La mayoría de este oxígeno es usado por la raíz de la planta y su disponibilidad es limitada para la actividad microbiana. Pero parte de este oxígeno puede crear microambientes aerobios y se pueden producir reacciones aerobias de degradación de materia orgánica y nitrificación.

Sería interesante plantar dos o tres especies diferentes de macrófitas y evaluar el comportamiento del biosistema en cuanto a remoción de carga orgánica, sólidos en suspensión, microorganismos patógenos y nutrientes como N y P.

Como se mencionó anteriormente, la depuración de las aguas residuales, en los humedales artificiales, se lleva a cabo, fundamentalmente, por la presencia de una población microbiana adherida a la superficie de las plantas en contacto con el agua residual y en el caso de los humedales con flujo subsuperficial se adicionan además los microorganismos adheridos al medio soporte. Debido a que el medio poroso brinda mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos la velocidad de remoción en los sistemas con flujo subsuperficial es mayor. Sin embargo, a pesar de todas las ventajas antes expuestas hay que señalar que los humedales con flujo subsuperficial tienen como desventajas el costo del medio soporte utilizado, así como su traslado y colocación, además en el caso de las *Heliconias*, los rizomas tienen un alto costo por tratarse de plantas exóticas y en general, la siembra y cosecha de biomasa son trabajos dispendiosos que generan costos adicionales, además con el tiempo el medio filtrante puede presentar problemas de colmatación lo que implica lavado del filtro y en casos extremos reemplazo del mismo.

## 11.7 LOMBRICOMPOSTAJE COMO ECOTECNOLOGÍA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA GENERADA

El proceso de transformación de *E. crassipes* terminó después de 77 días, con los resultados mostrados en la Tabla 28.

**Tabla 28. Características proceso transformación de biomasa cosechada**

Canastilla	pH	Peso Lombrices [g]	Peso Sustrato [g]	Humedad del Lombricompuesto [%]
1	9,90	802,6	1135,03	76,00
2	9,89	845,3	784,54	78,04
3	9,94	796,7	701,85	72,68
4	9,68	805,2	1246,13	80,28

El balance de materia para las canastillas es:

Peso seco inicial de *E. crassipes*:  $2,50 * 0,161 = 402,5$  gramos

Canastilla 1. Peso seco lombricultivo  $1135,03 * 0,24 = 272,41$ .gramos.

Canastilla 2. Peso seco lombricultivo  $784,54 * 0,2196 = 172,29$ .gramos.

Canastilla 3. Peso seco lombricultivo  $701,85 * 0,2732 = 191,74$  gramos.

Canastilla 4. Peso seco lombricultivo  $1246,13 * 0,1972 = 245,74$  gramos.

En promedio se obtuvieron 220,54 gramos de lombricompuesto seco a partir de 402,5 gramos de *E. crassipes* seco para un rendimiento del proceso de lombricompostaje del 54,79%.

El incremento de lombriz fue en promedio de 112,5 gramos, para un 16.06% en 2 meses y medio.

Para las heliconias, la humedad inicial fue del 70,4% y el pH de 10,3, se montó una sola canastilla con 1,25 kg de la planta.

Para las *Heliconias* el proceso de transformación fue de 56 días, con un pH de 9,42, una humedad del 73,7%, el peso del sustrato fue de 605,62 y de lombrices de 844 gramos.

El Balance de materia para la canastilla con *Heliconias* es:

Peso seco inicial de *Heliconias*:  $1,25 * 0,296 = 370$  gramos

Canastilla con *Heliconias*. Peso seco lombricultivo :  $605,62 * 0,263 = 159,28$  gramos.

En promedio se obtuvieron 159,28 gramos de lombricompostado seco a partir de 370 gramos secos de *Heliconias* para un rendimiento del proceso de lombricompostaje del 43,05%.

El incremento de lombriz fue en promedio de 44 gramos, para un 6,28% en casi 2 meses.

La producción de abono orgánico actualmente desempeña un rol muy importante en la mejora del rendimiento y la calidad de las plantas, además de la necesidad de reducir el uso de fertilizantes químicos ya que las nuevas legislaciones propenden por el uso de abonos y fertilizantes amigables con el medio ambiente.

El lombricompostaje es la transformación de la materia orgánica (en este caso biomasa cosechada), por la acción de las lombrices, las cuales en condiciones adecuadas de pH, oxígeno, temperatura, fuentes de nutrientes y energía, actúan realizando el proceso de compostación natural y produciendo como resultado final el abono orgánico, producto de gran utilidad para el suelo y las plantas, debido a su gran aporte de nutrientes, y características físicas necesarias a los suelos tales como textura y retención de humedad.

En la Tabla 29 se presenta la caracterización del abono orgánico producido.

**Tabla 29. Caracterización abono orgánico producido**

PARÁMETRO	M-1 PE	M-1 PF	M-2 PF	M-3 PF	M-4 PF
pH	8,5	8,3	8,5	8,2	8,5
Humedad [%]	82,17	72,05	62,83	76,36	73,69
Cenizas [%]	21,77	32,00	32,00	33,71	32,21
Nitrógeno Total [%]	3,67	3,28	3,20	3,40	3,34
Fósforo [%]	0,59	0,66	0,47	0,47	0,61
Potasio [%]	5,23	5,65	4,98	4,09	5,95
Calcio [%]	2,35	1,79	1,41	1,35	2,03
Magnesio [%]	0,59	0,43	0,37	0,30	0,46
Hierro [%]	0,44	1,21	0,75	0,84	1,28

M: Muestra

PE: Planta Emergente

PF: Planta Flotante

En Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFÉ, se han realizado múltiples investigaciones sobre la obtención de lombricomposto a partir de la transformación de los subproductos del beneficio del café, mediante la acción de la lombriz roja, *Eisenia foetida* (Blandón *et. al.*, 1999).

**Tabla 30. Caracterización del lombricomposto obtenido a partir de los sustratos de pulpa de café sola y mezclada con mucílago (Blandón *et.al.*, 1999)**

PARÁMETRO	LOMBRICOMPUUESTO PULPA DE CAFÉ SOLA	LOMBRICOMPUUESTO PULPA DE CAFÉ MEZCLADA CON MUCÍLAGO
Humedad (%)	78,05	79,48
pH	8,63	9,33
Cenizas (%)	44,06	50,21
Nitrógeno Total (%)	3,72	4,14
Fósforo (%)	0,44	0,31
Potasio (%)	9,64	5,50
Calcio (%)	1,15	1,30
Magnesio (%)	0,21	0,25
Hierro (mg/L)	3062,50	2201,67

Comparando la caracterización físico química de ambos lombricompostos (Tablas 29 y 30) se puede observar que presentan valores similares, con lo que se puede concluir que el abono orgánico obtenido a partir de *E. crassipes* y *Heliconias* puede ser utilizado como abono en huertas, viveros y el almácigos de café.

Es interesante, además, comparar las características del abono orgánico producido con las de un fertilizante comercial.

**Tabla 31. Fertilizante comercial grado 17 - 6 - 18 - 2 ( Multilab Agroanalítica, 2007)**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>KILOGRAMOS*</b>
<b>Nitrógeno Total</b>	17
<b>Fósforo Asimilable</b>	6
<b>Fósforo</b>	2
<b>Potasio Soluble</b>	18
<b>Potasio</b>	14,9
<b>Oxido de Magnesio Soluble</b>	2
<b>Magnesio</b>	1,21
<b>Azufre</b>	2,5
<b>Boro</b>	0,2
<b>Zinc</b>	0,1

\* Cuando se adicionan al suelo 100 kg de este producto

El abono orgánico producido mejora las condiciones físicas del suelo, mejora la cantidad de materia orgánica, ayuda al aporte de nutrientes, evita la erosión, mejora la textura de la tierra, aumenta el trabajo de los microorganismos, disminuye la filtración y pérdida de nutrientes (Gómez, 2000), disminuye el problema y el costo de transporte y como la práctica es económicamente viable, mejora el nivel de ingresos de los agricultores y campesinos. Por lo anterior, se hace necesario la producción de abonos orgánicos que aporten nutrientes, aumenten la eficacia, es decir, reduzcan los costos de fertilizantes químicos y mitiguen el impacto ambiental.

Según la caracterización realizada a un fertilizante comercial y al abono orgánico producido, este último es capaz de proporcionar cantidades notables de nutrientes esenciales, principalmente, N, P y K, al suelo o a las plantas., es por esto, que se puede utilizar como acondicionador de los suelos de cultivo.

En los países en vía de desarrollo han mostrado un gran incremento en el uso de fertilizantes químicos en las últimas décadas y esto explica, en gran parte, el aumento en la producción de sus alimentos. Actualmente, la agricultura tecnificada mundial sigue utilizando la fertilización como una de las herramientas claves para el manejo adecuado de la nutrición vegetal y la obtención de altos rendimientos y máximas utilidades en el negocio agrícola, sin embargo, como consecuencia del uso de productos químicos de han

deteriorado la calidad de los alimentos, se ha presentado la degeneración de los suelos y se han causado grandes daños al medio ambiente.

La necesidad de disminuir la dependencia de productos químicos artificiales en los distintos cultivos, está obligando a la búsqueda de alternativas fiables y sostenibles. En la agricultura ecológica, se le da gran importancia a este tipo de abonos, y cada vez más, se están utilizando en cultivos intensivos.

#### 11.8 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL BIOSISTEMA EVALUADO.

En la Tabla 9 se presentan los costos de instalación del biosistema evaluado. El costo total de instalación fue \$7.519.000. El costo de operación y mantenimiento se puede asumir como el costo de dos jornales al mes equivalentes a \$40.000

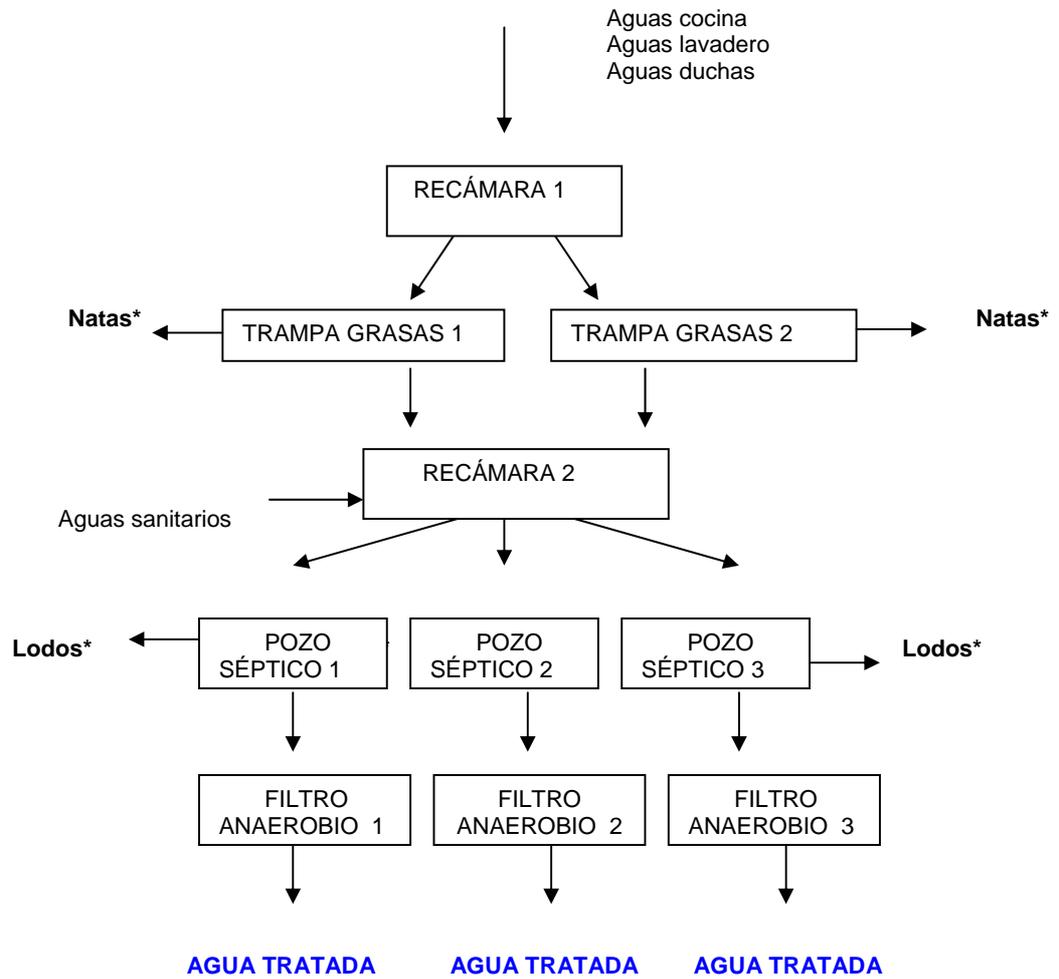
Un sistema convencional para tratamiento de aguas residuales domésticas (Figura 35) en zonas rurales consta de: Trampa de grasas, Tanque séptico y Filtro anaerobio, con un costo discriminado por rubros que se presenta en la Tabla 32.

**Tabla 32. Materiales y Precios sistema convencional de tratamiento ARD zona rural**

<b>ELEMENTO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO</b> [ <b>\$</b> ]	<b>COSTO TOTAL</b> [ <b>\$</b> ]
Tanque séptico	3 UND	350.000/UND	1.050.000
Trampa de grasas	2 UND	75.000/UND	150.000
Tanques tipo bebedero con tapa	2 UND	145.000/UND	290.000
Filtro anaerobio	3 UND	425.000/UND	1.275.000
Tubería 2 pulgadas	100 metros	4.650/m	465.000
Tubería 4 pulgadas	80 metros	10.000/m	800.000
Codo 2 pulgadas	15 UND	1.200/UND	18.000
Codo 4 pulgadas	15 UND	5.000/UND	75.000
T 2 pulgadas	15 UND	2.500/UND	37.500
T 4 pulgadas	15 UND	6.500/UND	97.500
Llave de abertura fácil PVC	3 UND	13.000/UND	39.000
Unión macho 2 pulgadas	6 UND	5.000/UND	30.000
Unión hembra 2 pulgadas	6 UND	5.000/UND	30.000
Silka negra	2 Tubos	20.000/Tubo	40.000
Plástico tipo invernadero (6 m ancho x 20 m largo) Calibre 6	20 m	9.200/m	190.000
Arena	2 m <sup>3</sup>	20.000/m <sup>3</sup>	40.000
Puntilla 2 pulgadas	2 lb	2.500/lb	5.000
Fibra de plástico	2 rollos	7.500/rollo	15.000
Pegante para PVC	1 galón	116.000/galón	116.000
Limpiador para PVC	1 galón	56.000/galón	56.000
Oficial	25 días	42.000/día	1.050.000
Ayudante	25 días	32.000/día	800.000
<b>TOTAL</b>			<b>6.669.000</b>

La diferencia entre el sistema convencional de tratamiento y el sistema evaluado está principalmente en los costos de instalación ya que los humedales de flujo libre y flujo subsuperficial requieren un área mas extensa, lo que incrementa notablemente la mano de obra.

Los costos de operación y mantenimiento son similares, ya que los filtros anaerobios deben ser lavados con agua limpia cuando se presente colmatación.



**Figura 35. Esquema convencional de tratamiento de Aguas Residuales Domésticas**

DBO<sub>5</sub> promedio a la entrada del biosistema = 766 mg/L

DBO<sub>5</sub> promedio a la salida del biosistema = 25 mg/L

Caudal promedio a la entrada del biosistema = 0,401 L/seg

Caudal promedio a la salida del biosistema = 0,012 L/seg

Carga de DBO<sub>5</sub> a la entrada del biosistema = 26,53 kg/día

Carga de DBO<sub>5</sub> a la salida del biosistema = 0,026 kg/día

Carga de DBO<sub>5</sub> removida por el biosistema = 26,50 kg/día

Para un sistema de tratamiento convencional, con una remoción en términos de carga orgánica del 80%, que es lo que comúnmente remueve este sistema, se tiene:

Carga de DBO<sub>5</sub> removida por el sistema convencional = 21,22 kg/día

Como se mencionó anteriormente, la diferencia en ambos sistemas es el costo de instalación. Basados en este costo, la proporción en dinero de un sistema convencional al biosistema instalado es de 1,11.

Aunque el costo de instalación del biosistema es mayor, teniendo en cuenta las remociones encontradas en el presente estudio y las reportadas por la literatura para un sistema de tratamiento convencional, la relación de costo para tratar un kilogramo de DBO<sub>5</sub> en 1, 11 veces mayor en el sistema convencional.

#### 11.9 RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL CORRECTO MANTENIMIENTO Y FUNCIONAMIENTO DEL BIOSISTEMA

La inspección del sistema tiene por objeto determinar los espesores de las capas de natas y lodos que se encuentran en cada una de las unidades del sistema. Los sólidos retenidos en la rejilla de la primera recámara deben retirarse dos veces por semana, se llevan a un lecho de secado y posteriormente se utilizan como abono orgánico o como sustrato en el lombricultivo. Los tanques deben inspeccionarse cada 12 meses. Las trampas de grasas deben inspeccionarse cada dos o tres meses. Para las natas se procede a realizar una inspección visual, verificando que el nivel de las natas esté 5 cm por debajo del orificio de ventilación de la T de salida, si este nivel es superado, las natas deben ser retiradas, secadas y llevadas al lombricultivo para la producción de abono orgánico. Este procedimiento será llevado a cabo tanto en las trampas de grasas como en los tanques sépticos. Para la verificación de los lodos en los tanques sépticos se prepara una pértiga de dos metros de largo al cual se le envuelve en la parte inferior una toalla blanca hasta una altura de 90 cm. Se introduce la pértiga al pozo hasta que toque el fondo, se esperan unos minutos, se retira la pértiga observado la zona de marcado, si la medición es mayor

a 55 cm se deben extraer los lodos por medio de las llaves de paso instaladas a 55 cm del fondo de cada pozo, estos lodos serán secados y llevados al lombricultivo para la producción de abono orgánico.

Los lodos retirados de cada una de las unidades del biosistema deben ser llevados a un lecho de forma cuadrada de aproximadamente 3m x 3m, el cual debe ser techado para facilitar el secado y evitar la proliferación de olores y vectores. Dicho lodo debe permanecer en el lecho al menos una semana y debe ser volteado con frecuencia para garantizar la homogeneidad del secado.

El mantenimiento rutinario de los humedales incluye el control hidráulico, la limpieza de las estructuras de entrada y salida y el control de las arvenses en los humedales de flujo subsuperficial. La acumulación de lodos no es frecuente, sin embargo es necesario realizar una limpieza semestral en el humedal de flujo libre, igualmente, si existen lodos deben ser llevados a un lecho de secado y posteriormente usarlos como abono o ser llevados a un lombricultivo. A los humedales de flujo subsuperficial se le debe realizar un lavado de la grava cada dos años aproximadamente.

Es importante resaltar que el sistema es apropiado para tratar solamente aguas residuales domésticas, por ningún motivo se deben tratar en el biosistema efluentes diferentes (cocheras, establos, beneficiaderos de café etc). Sólo se puede usar papel higiénico, otro tipo de papeles o materiales como trapos, plásticos, toallas higiénicas, basuras pueden obstruir el sistema. Para realizar el aseo de los sanitarios, duchas, lavaderos y lavamanos no se pueden utilizar insumos químicos como hipoclorito, veterinaria u otros productos ya que alteran las reacciones químicas y bioquímicas llevadas a cabo en cada una de las unidades.



**Figura 36. Tanque séptico perforado para evacuación de lodos**



**Figura 37. Llaves de paso para evacuación de lodos**

## 12. CONCLUSIONES

- Un biosistema integral para el tratamiento de aguas residuales domésticas, es una excelente opción, porque no solamente se depuran eficientemente dichas aguas, sino que se generan productos con un alto valor agregado, lo que representa un manejo sostenible de los recursos naturales y se obtienen tanto beneficios ambientales como económicos y sociales.
- La remoción de DBO<sub>5</sub> realizada por el biosistema evaluado, calculada entre la entrada al humedal de flujo libre y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 92,92% y 94,03%, la remoción de DQO entre 85,00% y 91,21% y la remoción de sólidos suspendidos totales entre 77,23% y 87,35%, remociones que cumplen con la Legislación Colombiana, la cual exige remociones de DBO<sub>5</sub> y SST mayores del 80%.
- La remoción de NTK calculada entre la entrada al humedal de flujo libre y la salida del biosistema estuvo comprendida entre 39,44% y 70,80%, la remoción para N- NH<sub>3</sub> entre 30,59% y 47,10%, la remoción para nitratos entre 40,62% y 80,49% y la remoción de fosfatos entre 66,61% y 98,88%.
- La remoción de coliformes realizada por todo en sistema calculada entre la entrada de aguas grises y negras y la salida del biosistema fue de 99,99%.
- De acuerdo con las características físico químicas y microbiológicas del agua residual doméstica, después del proceso de depuración realizada por el biosistema de tratamiento, esta agua puede ser reutilizada en agricultura y uso pecuario.
- La mayor tasa de crecimiento la presentó *E. crassipes* 0,208 [kg/m<sup>2</sup>\*día], seguida por *Heliconias* 0,100 [kg/m<sup>2</sup>\*día] y por último *P. stratiotes* [0,008 kg/m<sup>2</sup>\*día].

- En el humedal de flujo libre, el espejo de agua está expuesto a la atmósfera, generando un riesgo a la salud asociado a generación de olores y proliferación de vectores transmisores de enfermedades.
- No existieron relaciones lineales entre las remociones de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, NTK, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub> y PO<sub>4</sub>, la Temperatura ambiental promedio y la Humedad Relativa promedio.
- El lombricompostaje es una buena alternativa para el aprovechamiento de la biomasa generada ya que el abono orgánico obtenido a partir de *E. crassipes* y *Heliconias* puede ser utilizado como abono en huertas, viveros y en almácigos de café.
- *E. crassipes* presentó un mejor rendimiento en la producción tanto de abono orgánico como de lombriz.
- El abono orgánico producido es un recurso capaz de proporcionar cantidades notables de nutrientes esenciales, principalmente, N, P y K al suelo o a las plantas.
- El biosistema de tratamiento evaluado, aunque presentó un costo de instalación mayor que el sistema convencional, teniendo en cuenta las remociones encontradas en el presente estudio y las reportadas por la literatura para un sistema de tratamiento convencional, la relación de costo para tratar un kilogramo de DBO<sub>5</sub> es 1,11 veces mayor en el sistema convencional.

### **13. RECOMENDACIONES**

- Los resultados de esta investigación muestran que el tratamiento de aguas residuales domésticas en humedales de flujo libre generan problemas de olores y vectores que pueden transmitir enfermedades, por eso se recomienda utilizar humedales donde el flujo no esté expuesto a la atmósfera, tanto espejos de agua como flujos de entrada y salida a cada una de las unidades.
- Para evaluar la posibilidad de utilización de las plantas cosechadas como complemento de la dieta en animales, se recomienda realizar un estudio de cantidad de proteína y digestibilidad.
- Se recomienda realizar la cosecha de la biomasa en un lapso menor de tiempo, 15 días aproximadamente, para evitar la muerte de las plantas y así la devolución de parte de los nutrientes al agua tratada.
- Se recomienda realizar simultáneamente muestreo de aguas y cosecha de biomasa para poder relacionar disponibilidad con absorción de nutrientes.

## 14. BIBLIOGRAFÍA

ANGARITA, S. Hipótesis de optimización de Humedales de Flujo Subsuperficial en Tratamiento de Agua Residual Urbana. Énfasis en retención de metales. Universidad de los Andes. Bogotá (Colombia).

ARCOS, R., R.; CASTELLANO, DE R., E.; ALEJO, N., M.; GARCÍA, M., R.; SOLÍS, C., R. Remoción de la Materia Orgánica mediante la utilización de Humedales Artificiales en la Comunidad de María Nativitas. México.

BERNAL, F.; MOSQUERA, D.; MAURY, H. A.; GONZÁLEZ, D.; GUERRA, R.; POMARE, A.; SILVA, M. Humedales Artificiales para el Tratamiento de las Aguas Residuales en la Corporación Universitaria de la Costa. 2003.

BLANDÓN C., G.; DÁVILA A., M. T.; RODRÍGUEZ V., N. Caracterización microbiológica y físico química de la pulpa de café sola y con mucílago, en proceso de lombricompostaje. CENICAFÉ. Chinchiná (Colombia) 50(1);5-23. 1999. 19 Refs. Esp.

BORRERO L., JAIME. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Barcelona. Mayo de 1999.

DÁVILA A, M. T.; RAMÍREZ G., C. A. Lombricultura en pulpa de café. CENICAFÉ. Chinchiná (Colombia). Avance Técnico 225. 11 p. Marzo 1996.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. CENICAFÉ. Chinchiná (Colombia). Anuario Meteorológico. 2004. Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ, 2004. 520 p.

----- . CENICAFÉ. Chinchiná (Colombia). Anuario Meteorológico. 2004. Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ, 2005. 511 p.

-----, CENICAFÉ. Chinchiná (Colombia). Anuario Meteorológico. 2006. Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ, 2004. 515 p.

COLOMBIT. Manual para la instalación de sistemas sépticos. Manizales (Colombia). 1998. 20 p.

DOMÍNGUEZ, O. Uso del jacinto de agua en la depuración de aguas residuales. Pereira (Risaralda). Universidad Tecnológica de Pereira. 2000.

EPA. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial. Septiembre 2000.

FUNDACIÓN GLOBAL NATURE. PROYECTO DE SANEAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE FILTROS VERDES. ESPAÑA. [Online]. 2005. <[www.fundacionglobalnature.org](http://www.fundacionglobalnature.org)> (Consultado Agosto de 2005).

HELICONIAS. [Online]. [www.grancanariaweb.com/edgar/botanica/heliconia](http://www.grancanariaweb.com/edgar/botanica/heliconia)> (Consultado Septiembre de 2005)

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA. METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. COLOMBIA [Online]. 2005 – 2006 – 2007. [www.IDEAM.gov.co](http://www.IDEAM.gov.co) (Consultado Agosto de 2005, Noviembre de 2006 y Abril de 2007).

JESÚS SALAS Y CARLOS GARRIDO. ATLAS Dr. PEZ. ESPAÑA. [Online]. 2003-2006. <[www.atlas.drpez.org/Eichhornia-crassipes](http://www.atlas.drpez.org/Eichhornia-crassipes)> (Consultado Septiembre de 2005).

LARRY, W., C. Manual de Evaluación de Impacto Ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto. Segunda Edición. Mc Graw Hill. 1998.

GÓMEZ, Z., J. Abonos Orgánicos. Santiago de Cali (Colombia). Mayo 2000.

GONZÁLEZ, F., J. Procedimiento de depuración de aguas residuales y vertidos contaminantes en base a cultivos de macrófitas emergentes convertidas en flotantes. Madrid (España). 2002.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Oferta y Demanda del Recurso Hídrico en Colombia. Bogotá (Colombia). 1998.

LAWRENCE, R. Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Universidad Nacional Agraria. La Molina (Perú). 2001.

MADERA, C. A.; SILVA, J. P.; PEÑA, M. R. Sistemas combinados de Tratamiento de Aguas Residuales basados en Tanque Séptico – Filtro Anaerobio – Humedales: Una alternativa sostenible en pequeñas comunidades de países tropicales. Santiago de Cali (Valle del Cauca). 2003.

MAINE, M., A.; SUÑE, N.; PANIGATTI, M., C.; SÁNCHEZ, G.; HADAD, H. Wetland piloto para tratamiento de un efluente metalúrgico. 2004.

MARTÍNEZ, A.; GÓMEZ, G., R.; VILLASEÑOR, C., J.; MENA, S., J. Comparación de diferentes plantas acuáticas en la depuración de aguas residuales con humedales de flujo subsuperficial. Departamento de Ingeniería Química, Instituto de Tecnologías Química y Medioambiental. Universidad de Castilla. La Mancha (España). 2005

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS 2000. Bogotá D.C. Noviembre de 2000.

MIRA, J.C. El Derecho Humano al Agua. Ecofondo. 2006

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. BIBLIOTECA VIRTUAL DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y SALUD AMBIENTAL. ESTADOS UNIDOS [Online]. 2005 – 2006 – 2007. <[www.cepis.ops-oms.org](http://www.cepis.ops-oms.org)> (Consultado en Agosto de 2005, Noviembre de 2006 y Abril de 2007).

PAREDES C., D. Variaciones al sistema de filtro anaeróbico de flujo ascendente, humedal de flujo subsuperficial como alternativa de tratamiento de aguas residuales de pequeños y medianos municipios de Colombia. Pereira (Colombia). 2003.

PATIÑO, P., M. Derecho Ambiental Colombiano. Legis. Bogotá. 1999.

RAMÍREZ, F., E.; ROBLES, V., E.; BONILLA, L., P.; RAMÍREZ, O., P.; GUTIÉRREZ, S., P.; MARTÍNEZ, P., M.E.; ORTIZ, O., R. Aplicación de Humedales Artificiales para el Tratamiento del Aguas Residual de Casa- Habitación en Áreas Rurales. Iztacala (México)

RIVAS, A. Evaluación de un Humedal Mexicano con la variante de Flujo Subsuperficial, para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas. México. 2001

RODRÍGUEZ, C.; DÍAZ, M.; GUERRA, L.; HERNÁNDEZ, J. Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales. La Habana (Cuba). Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.

RODRÍGUEZ, C. Humedales construidos. Estado del arte. (I). Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Vol. 24, No.3. La Habana (Cuba). 2003.

RODRÍGUEZ, R., J.; PALMA, J. Valor nutritivo del repollito de agua (*P. stratiotes*) y su posible uso en la alimentación animal. Zootecnia Tropical. 18(2):213-226. Venezuela. 2000.

RODRÍGUEZ V., N. Tratamiento de residuos líquidos y sólidos de los procesos del café. Diseño y evaluación de un sistema de depuración de las aguas residuales del beneficio del café, con base en postratamientos con plantas acuáticas de aguas tratadas anaerobiamente. In: Resumen del informe anual de actividades. Cenicafé 2004-2005, p 157-158. Chinchiná (Colombia). 2005. 183 p.

SILVA, V., J. P. Humedales Construido. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Universidad del Valle. Santiago de Cali (Valle del Cauca).

ZUÑIGA, J. Influencia del Soporte y Tipo de Macrófita en la Remoción de Materia Orgánica y Nutrientes en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso (Chile). 2004.