



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Facultad de Ciencias

**“ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES ADECUADO PARA PEQUEÑAS
COMUNIDADES, EMPLEANDO TROZOS DE MATERIAL
ORGÁNICO LEÑOSO Y PLANTAS VIVAS”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS CON ORIENTACIÓN A LA
RESTAURACIÓN ECOLÓGICA**

**P R E S E N T A
JAZMÍN GONZÁLEZ ZURITA**

**TUTOR:
DR. MARCO A. GARZÓN ZÚÑIGA**

MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE, 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



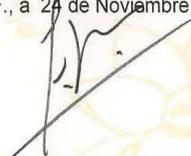
Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
P r e s e n t e

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 17 de agosto de 2009, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** de la alumna **GONZÁLEZ ZURITA JAZMIN** con número de cuenta **508012123** con la tesis titulada **"ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ADECUADO PARA PEQUEÑAS COMUNIDADES, EMPLEANDO TROZOS DE MATERIAL ORGÁNICO LEÑOSO Y PLANTAS VIVAS."**, realizada bajo la dirección del **DR. MARCO ANTONIO GARZON ZUÑIGA**:

Presidente: DR. LUIS ERNESTO MARÍN STILLMAN
Vocal: DR. JOSÉ RAUL GARCIA BARRIOS
Secretario: DR. MARCO ANTONIO GARZÓN ZUÑIGA
Suplente: M. EN I. MERCEDES ESPERANZA RAMÍREZ CAMPEROS
Suplente: DRA. MARISA MAZARI HIRIART

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 24 de Noviembre de 2009.


Dr. Juan Núñez Farfán
Coordinador del Programa

c.c.p. Expediente del (la) interesado (a)

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM por la oportunidad de cursar la maestría en Ciencias Biológicas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la ayuda económica brindada durante la maestría.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por brindar un espacio para la construcción del sistema combinado de biofiltración y humedal tipo entramado de raíces.

Al Dr. Marco A. Garzón Zúñiga por su dirección y apoyo a lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis.

A la Dra. Marisa Mazari Hiriart y al Dr. Raúl García Barrios, quienes fungieron como miembros de mi comité tutorial y enriquecieron este trabajo con sus acertadas observación y gran experiencia.

A los miembros de mí jurado tutorial: la Maestra Esperanza Ramírez Camperos y el Dr. Luis Marín Stillman por su buena disponibilidad y valiosas sugerencias.

A la Maestra. Julia Carabias Lillo por su orientación y apoyo en la elección de esta maestría.

A Luz Ma. Aranda y Georgina García, coordinadoras de la maestría con orientación en restauración ecológica por todo el apoyo y amabilidades recibidas durante este tiempo.

Al Biólogo Armando Rivas por su valiosa orientación a lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis.

Al Arq. Cesar Añorve por su buena disponibilidad, tiempo y orientación.

A la Colonia Sacatierra, Cuernavaca, Morelos, en particular a la Sra Jobita por permitir que el estudio de factibilidad de esta tesis fuera diseñado basándose en su vivienda. A Rodrigo Morales por el apoyo brindado durante los recorridos y visitas a Sacatierra.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mis padres, a quienes agradezco profundamente su cariño, comprensión y apoyo. En todo momento los llevo conmigo, ambos son un pilar en mi vida y una gran inspiración.

A mis hermanos Daniel y Ricardo por su cariño y apoyo. Sé que puedo contar con ellos siempre.

A José Santos de la Paz por haber estado siempre a mi lado brindándome su cariño y apoyo incondicional.

A Beatriz González, Yared Hernández, amigos del IMTA y amigos de la Maestría por los momentos compartidos y por brindarme su amistad.

A la Dra. Rosalva Landa por la confianza y la oportunidad de crecer tanto laboral como personalmente trabajando a su lado.

A Dios por llenar mi vida de dicha y bendiciones y por la oportunidad de estar viva.

ÍNDICE	Página
1. RESUMEN	1
ABSTRACT	2
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Marco teórico	3
2.2. Justificación	5
2.3. Antecedentes	5
2.4. Zona de estudio	8
2.4.1. Subcuenca del río Apatlaco	8
2.4.2. Microcuenca de San Antón	13
2.4.3. Barrancas	19
2.4.4. Barrio de San Antón	22
2.4.5. Canal de Sacatierra	23
3. FUNDAMENTO TEÓRICO	25
3.1. Sistemas de tratamiento biológicos no convencionales	26
3.2. Biofiltración sobre lecho orgánico	26
3.3. Humedales construidos tipo entramado de raíces	28
4. OBJETIVOS	31
5. HIPÓTESIS	32
6. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	32
7. RESULTADOS PARTE TÉCNICA	36
7.1. Diseño del sistema de tratamiento	36
7.1.1. Dimensiones del biofiltro	36
7.1.2. Parámetros de operación del biofiltro	37
7.1.3. Dimensiones del humedal tipo entramado	39
7.1.4. Parámetros de operación del humedal tipo entramado	45
7.2. Caracterización del agua residual a emplear	46
7.3. Descripción del sistema de tratamiento	48
7.4. Dimensionamiento del sistema de tratamiento	48
7.5. Localización del sistema de tratamiento.	49
7.6. Construcción del sistema de tratamiento	50
7.7. Proceso de selección y caracterización de materiales	54
7.7.1. Proceso de selección y caracterización materiales BF	54
7.7.2. Proceso de selección y caracterización materiales EF	55
7.8. Proceso de acondicionamiento de materiales para el sistema	61
7.9. Instalación del biofiltro	62
7.10. Instalación del humedal del tipo ER	62
7.11. Arranque del sistema de tratamiento	64
7.12. Plan de maduración y variación de caudales	64
7.13. Seguimiento de la evolución del sistema de tratamiento	65
7.14. Comentarios	69



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

7.15. Métodos de análisis	70
7.16. Resultados parámetros de control	71
7.16.1. Temperatura	71
7.16.2. pH	74
7.16.3. Conductividad eléctrica	78
7.16.4. Turbidez	80
7.16.5. DQO	81
7.16.6. Nitrógeno amoniacal (N- NH ₄)	87
7.16.7. P de ortofosfatos (P-P ₀₄)	94
7.16.8. Microbiológicos	101
7.17. Resultados análisis de laboratorio calidad del agua IMTA.	101
7.18. Comparativo entre los diferentes caudales y eficiencias de remoción	105
1. RESULTADOS ESTUDIO DE FACTIBILIDAD	107
1.1. Introducción.	107
1.2. Estudio a gran visión	112
1.2.1. Descripción general zona de estudio	112
1.2.2. Identificación de la problemática	113
1.2.3. Justificación y análisis de propuesta	114
1.2.4. Elección de sistema	115
1.3. Ingeniería básica.	116
1.3.1. Determinación zona de ubicación del sistema	116
1.3.2. Casa prototipo	117
1.3.3. Selección de descargas	122
1.3.4. Aforo de descargas	124
1.3.5. Caracterización de agua residual	125
1.3.6. Dimensionamiento del sistema e ingeniería de detalle	126
1.3.7. Manual de operación y mantenimiento	128
1.3.8. Recomendaciones.	131
1.4. Estudio socio-económico.	131
1.5. Gestión social	136
1.5.1. Participación social	136
1.5.2. Acuerdos y compromisos	138
2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	140
3. BIBLIOGRAFÍA	145

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.Niveles de manejo en la restauración ecológica	4
Figura 2.Biofiltro en la secundaria No.2 Cuernavaca, Mor.	7
Figura 3.Región hidrológica XVIII Balsas y cuenca del río Amacuzac	8
Figura 4.Mapa de la región hidrológica XVII	9
Figura 5.Fotografías sobre la problemática de la subcuenca del río Apatlaco	10
Figura 6.Monitorio de la calidad del agua de la subcuenca del río Apatlaco	11
Figura 7.Plantas de tratamiento existentes en la subcuenca del río Apatlaco	12
Figura 8.Ubicación de la microcuenca de San Antón	13
Figura 9.Ortofoto de la microcuenca de San Antón	14
Figura 10.Fotografía del canal de Sacatierra	15
Figura 11.Ejemplificación de barrancas deterioradas	16
Figura 12.Densidad poblacional de la microcuenca	18
Figura 13.Fotografía de la barranca La Tilapeña, Cuernavaca, Morelos	19
Figura 14.Barrancas “El Tecolote”, “San Antón” y “Los Caldos”	20
Figura 15.Biodiversidad de las barrancas de Morelos	21
Figura 16 Fotografías de barrancas en la microcuenca de San Antón	21
Figura 17 Salto de San Antón, Cuernavaca, Morelos	22
Figura 18.Fotografías del canal de Sacatierra	23
Figura 19.Colonia Sacatierra, Cuernavaca, Morelos	23
Figura 20.Colonia Sacatierra, Cuernavaca, Morelos	25
Figura 21 Diagrama de biofiltro sobre lecho orgánico	26
Figura 22.Humedal de flujo subsuperficial	28
Figura 23.Humedal tipo entramado de raíces	29
Figura 24 Entramado de raíces ubicad en el CENIDET	31
Figura 25.Diagrama de Biofiltro Sobre Lecho Orgánico	36
Figura 26.Dimensiones ER con un caudal de 200 L/día	43
Figura 27.Dimensiones ER con un caudal de 400 L/día	44
Figura 28.Diagrama del sistema combinado BF + ER	49
Figura 29 Proceso de construcción del sistema	50
Figura 30.Planos de construcción del sistema	52
Figura 31.Planos de construcción del sistema	53
Figura 32 Árbol de Ficus	54
Figura 33 Diagrama capas grava Arq. César Añorve	55
Figura 34.Sistema combinado de tratamiento una vez colocadas las plantas	59
Figura 35 Distribución de plantas en el ER.	56
Figura 36.Fotos proceso de construcción del sistema	61
Figura 37 Fotos proceso de construcción del sistema	61
Figura 38.Fotos proceso de construcción del sistema	61
Figura 39.Fotos proceso de construcción del sistema	62
Figura 40.Fotos proceso de acondicionamiento del sistema	63
Figura 41 Fotos proceso de acondicionamiento del sistema	63
Figura 42 Fotos proceso de acondicionamiento del sistema	63
Figura 43.Fotos puesta en marcha del sistema de tratamiento	64
Figura 44.Fotografías de las condiciones del humedal con un caudal de 400 L/día	68
Figura 45.Papiros en el sistema de tratamiento	69
Figura 46 Gráfica Temperatura, Caudal 100L/día	72
Figura 47 Gráfica Temperatura, caudal 200L/día	72
Figura 48 Gráfica Temperatura, caudal 400L/día	73
Figura 49.Gráfica pH, caudal 100L/día	74
Figura 50.Gráfica pH, caudal 200L/día	75
Figura 51.Gráfica pH, caudal 400L/día	75

Figura 52. Gráficas sobre el promedio y la desviación estándar del pH	77
Figura 53. Gráfica Conductividad, caudal 100L/día	77
Figura 54. Gráfica Conductividad, caudal 200L/día	78
Figura 55. Gráfica Conductividad, caudal 400L/día	78
Figura 56. Gráfica Turbidez, caudal 100L/día	79
Figura 57. Gráfica Turbidez, caudal 200L/día	80
Figura 58. Gráfica DQO, caudal 100L/día	81
Figura 59. Gráfica DQO, caudal 200L/día	81
Figura 60. Gráfica DQO, caudal 400L/día	82
Figura 61. Remoción total de DQO	84
Figura 62. Gráfica Promedio concentración DQO y desviación estándar	84
Figura 63. Ciclo del Nitrógeno	87
Figura 64. Gráfica Nitrógeno Amoniacal, caudal 100L/día	88
Figura 65. Gráfica Nitrógeno Amoniacal, caudal 200L/día	89
Figura 66. Gráfica Nitrógeno Amoniacal, caudal 400L/día	89
Figura 67. Remoción Total Nitrógeno Amoniacal	91
Figura 68. Gráfica Promedio concentración N-NH ₄ y desviación estándar	91
Figura 69. Ciclo del fósforo	93
Figura 70. Gráfica P-PO ₄ , caudal 100L/día	94
Figura 71. Gráfica P-PO ₄ , caudal 200L/día	94
Figura 72. Gráfica P-PO ₄ , caudal 400L/día	96
Figura 73. Remoción total P-PO ₄	98
Figura 74. Gráfica Promedio concentración P-PO ₄ y desviación estándar	98
Figura 75. Gráfica comparativa DQO	104
Figura 76. Gráfica comparativa P- PO ₄ ,	104
Figura 77. Gráfica comparativa N-NH ₄	105
Figura 78. Esquema Estudio de Factibilidad	106
Figura 79. Aspectos Estudio de Factibilidad	107
Figura 80. Esquema Dimensiones Estudio de Factibilidad	108
Figura 81. Alternativas de Soluciones Técnicas	108
Figura 82. Canal de Sacaterra, esquema ubicación viviendas	111
Figura 83. Fotografía del canal de Sacaterra, Cuernavaca, Morelos	112
Figura 84. Fotografías de la barranca del canal de Sacaterra	113
Figura 85. Sistema combinado de biofiltración y humedal, materiales aprovechables	114
Figura 86. Visita a Sacaterra, junta con colonos	116
Figura 87. Mapa de ubicación de la casa prototipo	117
Figura 88. Fotografía del canal de Sacaterra	118
Figura 89. Casa Sra Jobita colonia Sacaterra	119
Figura 90. Situación actual de la casa prototipo	120
Figura 91. Fotografía del canal de Sacaterra	121
Figura 92. Diagrama situación actual casa prototipo	122
Figura 93. Diagrama del sistema propuesto en la casa prototipo	126
Figura 94. Sistema combinado de biofiltración y humedal ER	130
Figura 95. Pirámide usos por calidad del agua	134
Figura 96. Representación manejo efectivo de microcuencas	136

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.Colonias Microcuenca de San Antón	17
Tabla 2 Evaluación de Parámetros en sistemas de Biofiltración.	29
Tabla 3 Resultados eficiencia de remoción de contaminantes del sistema fosa séptica-entramado de raíces.	31
Tabla 4.Datos de Diseño Humedal	39
Tabla 5.Área Superficial y Volúmen, Caudal 100 L/día	40
Tabla 6 Datos de Diseño Entramado de Raíces, Caudal 100L/día	40
Tabla 7.Datos Carga Hidráulica y Orgánica ER, Caudal 100L/día	41
Tabla 8.Datos ER 200L/día	42
Tabla 9.Datos Carga Hidráulica y Orgánica ER, 200L/d	42
Tabla 10 Datos ER 400L/día	43
Tabla 11.Datos Área Superficial y Volumen ER 400L/día	44
Tabla 12.Datos Carga Hidráulica y Orgánica ER, 400L/d	44
Tabla 13 Caracterización AR	46
Tabla 14.Dimensiones BF	47
Tabla 15 Dimensiones ER	47
Tabla 16.Métodos de análisis	69
Tabla 17.Porcentaje de remoción total DQO	70
Tabla 17.Porcentaje de remoción total DQO	81
Tabla 18.Remoción Total Nitrógeno Amoniacal	87
Tabla 19.Porcentaje de Remoción Total de P-PO ₄ del Sistema	92
Tabla 20 Valores parámetros laboratorio 100L/d	96
Tabla 21. Valores parámetros laboratorio 200L/d	98
Tabla 23. Valores parámetros laboratorio, 400L/día	99
Tabla 24 Características Generales Zona de Estudio	107
Tabla 25.Visitas a Sacatierra	113
Tabla 27.Características casa prototipo	119
Tabla 28.Aforo de descargas	121
Tabla 30.Dimensionamiento casa prototipo	123
Tabla 31.Costos supuestos sistema casa prototipo	130
Tabla 32.Recomendaciones	135

“El agua es el vehículo de la naturaleza: todo lo vincula.”
Leonardo Da Vinci

1. RESUMEN

En concordancia con la problemática actual, referente a la inadecuada disposición de descargas de agua residuales domésticas a cuerpos receptores en comunidades rurales o urbanas marginadas y sus consecuencias tanto para el medio natural como para el ser humano, el presente trabajo busca desarrollar un sistema de tratamiento *in situ* mediante la combinación de dos tecnologías de bajo costo: **biofiltración sobre lecho orgánico y humedales tipo entramado de raíces.**

El sistema fue diseñado para 100 L/día, en función de la concentración de materia orgánica, coliformes fecales y nutrientes presentes en el agua residual. Se probaron y monitorearon tres caudales de operación (100 L/día, 200 L/día y 400 L/día), cada caudal durante dos meses. Los principales parámetros a los que se les dio seguimiento fueron: DQO, nitrógeno en forma de NH_4 , fósforo en forma de PO_4 y coliformes fecales. Se empleó madera de desechos de poda de Tabachín (*Picus benjamina* sp) como material de soporte del biofiltro, y las plantas seleccionadas para el entramado de raíces fueron: *Spathyllum wallissi* (Cuna de Moisés), *Cyperus papyrus* (Papiro), *Iris japónica* (Lirio persa), *Heliconiaceae* sp (Platanillo), *Strelitzia reginae* (Ave del paraíso) y *Hedychium coronarium* (Jengibre Mariposa). Este sistema fue diseñado buscando sentar las bases para su posterior implementación (mediante un estudio de factibilidad) en la Colonia Sacatierra, en Cuernavaca, Morelos, México.

El sistema combinado de biofiltración sobre lecho orgánico y humedal construido del tipo entramado de raíces demostró ser eficiente para la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas, alcanzándose remociones de un **95% para DQO, 99.9% para nitrógeno en forma de NH_4^+ , 89.7% para fósforo en forma de PO_4^- y 99.9% para coliformes fecales.** El efluente en la mayoría de los casos cumplió bien con la Norma NOM-001-SEMARNAT-1996 de descarga de aguas residuales. Aunque la eficiencia de remoción del fósforo en forma de PO_4 no fue la esperada, debido a que en el caudal de 200 L/día comenzó a saturarse el sistema.

Características como: -su bajo costo de operación,-su capacidad de amortiguar diferentes tipos de cargas,-su bajo requerimiento de mantenimiento, -el que sea una tecnología de bajo impacto (no requiere obras hidráulicas complejas ni alto gasto energético), -y el hecho de que pueda ser atractivo para la comunidad donde se construya, entre otras cualidades, hacen del **sistema combinado de biofiltración sobre lecho orgánico y humedal tipo entramado de raíces**, una alternativa viable y



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

recomendable para el tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades rurales, urbanas marginadas, conjuntos habitacionales de difícil acceso o que no cuenten con sistema de drenaje.

ABSTRACT

In line with the current problems related to improper disposal of domestic waste water discharges into receiving bodies in rural and marginal urban communities, and consequences for the natural environment and for human beings, this paper seeks to develop a treatment system *in situ* by combining two low-cost technologies (**organic bed biofiltration and wetlands roots framework type**).

The system was designed for 100 L/day, according to the concentration of organic matter, fecal coliform and nutrients in the wastewater. Three flowrates of operation (100 L/day, 200 L/day, and 400 L/day) were tested and monitored during two months each flow. The main parameters which were followed were: COD, nitrogen as NH_4 , phosphorus as PO_4 and fecal coliforms. Scrap wood from pruning Tabachín (*Picus benjamina* sp) was used as biofilter support material, and the plants selected for the network roots were *Spathyllum wallissi* (Cradle of Moses), *Cyperus papyrus* (Papyrus), *Iris japonica* (Lily Persian) *Heliconiaceae* sp (Platanillo), *Strelitzia reginae* (Bird of Paradise) and *Hedychium coronarium* (Butterfly Ginger). This system was designed for laying the groundwork for subsequent implementation (through a feasibility study) in Colonia de Sacatierra, Cuernavaca, Morelos, México.

The combined system of organic bed biofiltration and constructed wetland roots framework type proved to be efficient for removing pollutants from domestic wastewater, achieving removals of **95% for COD, 99.9% for nitrogen as NH_4^+ , 89.7% for phosphorus as PO_4 , and 99.9% for fecal coliforms**. The effluent in most cases met with Norm NOM-001-SEMARNAT-1996 from wastewater discharge. Nevertheless, the removal efficiency of phosphorus in the form of PO_4 was not what we expected, the system began to saturate at the flow of 200 L /day.

Features such as: -low operating cost, -its ability to absorb different types of loads, -low-maintenance requirements, -the fact that it is a low impact technology (does not require complex hydraulic or high energy output), -and that it may be attractive for the community, among other qualities, make the combined system of **organic bed biofiltration and wetland roots framework type**, a viable and recommended choice for the treatment of domestic wastewater in rural communities, marginalized urban areas, housing complexes difficult to access or having no drainage system.

2. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua en cuanto a cantidad y calidad es cada vez más grave. Las descargas de aguas residuales generan graves problemas en los cuerpos receptores. Habitualmente su tratamiento es nulo o deficiente, lo que representa un alto riesgo para la salud humana y para la calidad del medio ambiente. Este problema se agrava por el acelerado crecimiento de la población, lo que provoca que cada día haya nuevos asentamientos en zonas apartadas que carecen de servicios básicos. En México, un porcentaje mínimo de las aguas residuales son tratadas antes de ser vertidas a los cuerpos receptores o reutilizadas en la agricultura (Jiménez–Cisneros, 2001). Dicha situación se torna mucho más crítica en zonas urbanas periféricas y comunidades rurales concentradas.

Por otro lado, los ríos constituyen uno de los ecosistemas más valiosos del planeta. Tienen una gran diversidad de valores naturales y cumplen numerosas funciones, que permiten asimismo la supervivencia de muchas especies de fauna y flora, incluido el hombre. En los últimos años los ríos han venido sufriendo la mayor degradación y acoso físico de su historia (Galindo, 2006). La calidad del agua ha empeorado en gran medida debido a la contaminación industrial, urbana y agrícola.

Todo lo anterior arroja como resultado condiciones insalubres para la población, una alteración del flujo natural de los ríos, un aumento de desastres "naturales", y un número creciente de especies acuáticas amenazadas o en peligro de extinción.

2.1. Marco teórico

El término **Restauración Ecológica** se refiere a aquel proceso ecológico cuya finalidad es recuperar las condiciones ambientales que prevalecieron en un sitio dado, y que por alguna causa se vieron afectadas negativamente (Mekotova, 1997). Como se ejemplifica en la Figura 1, existen diferentes grados y capacidades de intervención en los ecosistemas en función de las condiciones mismas del sitio, del grado de deterioro, y de la capacidad de actuación.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

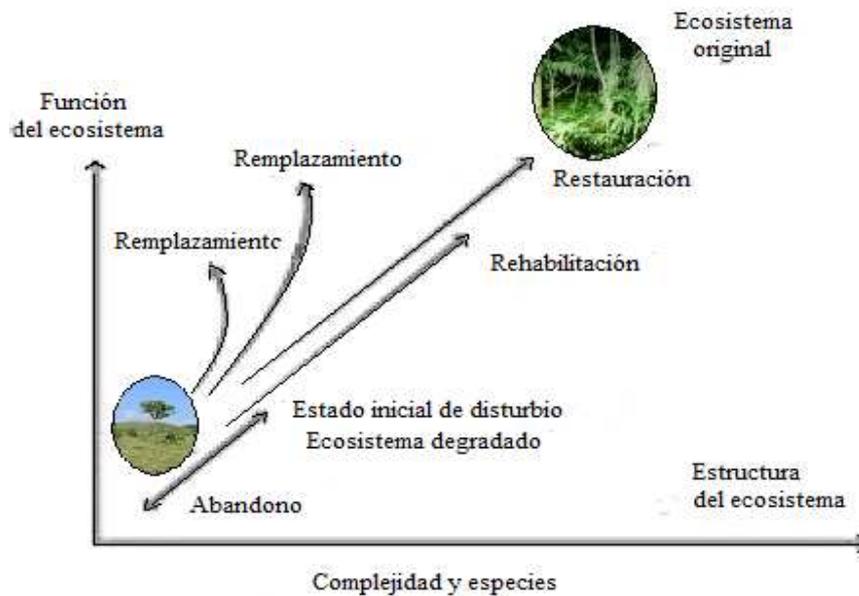


Figura 1. Niveles de manejo en la restauración ecológica (Hobbs, 2001)

Cuando se busca recuperar la funcionalidad de un sistema se habla de una **Rehabilitación**.

Restauración de Ríos

En la restauración de ríos el principal objetivo es recuperar un equilibrio dinámico lo más natural posible. En este contexto, se puede reseñar que las actuaciones generalmente de restauración de ríos se estructuran en los siguientes niveles territoriales:

- Mejora de la calidad del agua.
- Tratamientos y estructuras acuáticas en el cauce.
- Estabilización y diversificación de la rívera o de los márgenes del río.
- Reconstrucción del flujo hidráulico y de la llanura fluvial.
- Creación de un corredor fluvial.
- Gestión sostenible de la cuenca (agrícola, forestal, urbano, etc.).

Desde esta perspectiva, el presente trabajo busca **restablecer la calidad del agua**, con lo cual se podrán mejorar considerablemente las condiciones generales río abajo. Es por esto que en

este caso se habla de una **rehabilitación de uno de los componentes vitales del sistema, el agua.**

2.2. Justificación

En México existe una apremiante necesidad de desarrollar e implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales que sean fáciles de operar y mantener, ya que muchas de las plantas de tratamiento que se construyen con tecnologías convencionales frecuentemente no tienen personal calificado para operarlas, y/o no cuentan con presupuesto para su mantenimiento, por lo cual, con el paso del tiempo, los sistemas fallan y son abandonados (Garzón, 2004).

Una opción para esta problemática es desarrollar y diseñar sistemas de tratamiento para pequeños grupos, con un tratamiento *in situ* de sus aguas residuales (AR).

Al respecto, en la ciudad de Cuernavaca se han venido estudiando diferentes sistemas de tratamiento descentralizado para pequeñas comunidades (aplicable a zonas urbanas que no cuentan con infraestructura de recolección y saneamiento de AR). Entre estos sistemas se encuentran los humedales tipo entramados de raíces (ER) y los biofiltros sobre materiales orgánicos leñosos (BF).

2.3. Antecedentes

El sistema de **humedal tipo entramado de raíces** está siendo desarrollado por el Centro de Innovaciones en Tecnologías Alternativas (CITA) en Ocotepéc, Morelos a cargo del Arq. César Añorve, el cual es un tipo particular de humedal sub-superficial construido en canales. Los humedales tipo entramados de raíces son canales con vegetación hidrófita enraizada emergente sobre un material de soporte inerte inundado por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas.

Los sistemas de ER parecen presentar un buen desempeño en cuanto a la remoción de contaminantes. Sin embargo, aún cuando ya existen algunos sistemas operando a escala real en domicilios particulares, la tecnología de entramado de raíces no ha sido sometida a un estudio de evaluación para conocer su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales municipales.

Por otra parte, el sistema de **biofiltros sobre materiales orgánicos leñosos**, ha sido desarrollado en México por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en colaboración con el CRIQ (Centre de la Recherche Industrielle du Québec), y se presenta como una opción viable en este contexto, ya que se trata de una tecnología no convencional, de bajo costo de construcción y operación, con la ventaja de requerir un mínimo de operación y poco mantenimiento no especializado.

En la actualidad los centros académicos cuentan con más recursos que hace unas dos décadas. Esto permite llevar a cabo proyectos dirigidos a entender y atender los procesos sociales así como ecológicos involucrados en la pérdida de la biodiversidad y el deterioro del ambiente, e intervenir en sus posibles soluciones, no sólo con recursos cognitivos, sino también con recursos materiales, políticos y éticos (García, 2005).

La UNAM por medio del Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias (CRIM) conduce en Morelos un ambicioso macro-proyecto de investigación-intervención bajo el nombre de “MANEJO DE ECOSISTEMAS Y DESARROLLO HUMANO” dentro del marco del **Programa de Saneamiento del Río Apatlaco**, que abarca el saneamiento del río, la restauración de los ecosistemas y comunidades degradadas, así como el rescate de especies en peligro de extinción.

Como parte importante de este proyecto, el IMTA está trabajando en forma conjunta con el CRIM, en el desarrollo y aplicación de sistemas de tratamiento alternativos para el saneamiento de las aguas residuales domésticas en comunidades rurales marginadas y zonas urbanas, de forma específica en la colonia de Sacatierra, Cuernavaca, Morelos.

Recientemente, el CRIM participó en el financiamiento para la construcción de un biofiltro (BF) en la Escuela Secundaria Federal No 2 de Cuernavaca (Figura 2). A lo largo de la operación de este BF se ha observado una alta eficiencia en la remoción de algunos

contaminantes del agua residual doméstica, pero a la vez se ha concluido que este sistema requiere de un área extensa a escala real.



Figura 2.- Biofiltro en la secundaria No 2 de Cuernavaca, Mor.

Con el desarrollo y aplicación de estas tecnologías se contribuye a la protección de cuerpos de agua del estado de Morelos, como lo prevé la Estrategia Estatal de Biodiversidad (García, 2005).

Con base en lo anterior, el **objetivo principal** del presente trabajo de investigación es diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, apropiado para comunidades rurales y urbanas marginadas, combinando las tecnologías de biofiltración sobre lecho orgánico y de humedal tipo entramado de raíces, pensado para su aplicación a futuro en la colonia de Sacatierra, Cuernavaca Morelos.

Además, se buscará encontrar el caudal y las condiciones de operación óptimos, así como determinar la capacidad de depuración real del sistema.

2.4. Zona de estudio

El estado de Morelos se ubica en la región hidrológica número 18 del río Balsas (Figuras 3 y 4), formada por dos cuencas: la del río Nexapa que ocupa una superficie de 549 km², y tiene como afluentes al río Tepalcingo, a las barrancas de Amatzinac y de los Santos, así como la cuenca del río Amacuzac (Figura 4), que cubre una superficie de 4,342 km² con sus principales afluentes: los ríos Cuautla, Yautepec, Chalma, Tembembe, Tetlama y **Apatlaco**.

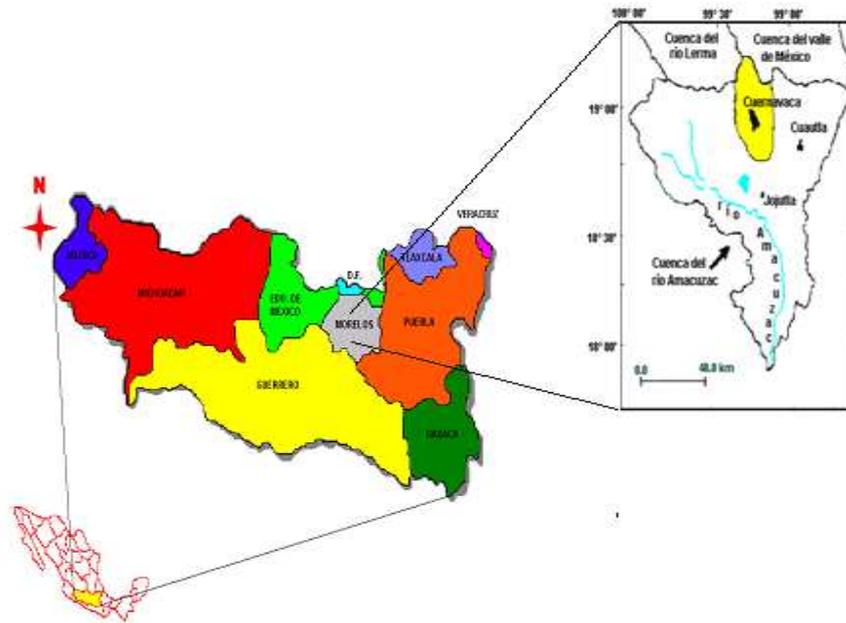


Figura 3. Región Hidrológica XVIII Balsas y cuenca del río Amacuzac

2.4.1. Subcuenca del Río Apatlaco

El río Apatlaco se encuentra en la subcuenca del mismo nombre, y se ubica en la región noroeste del estado de Morelos. Como se aprecia en la Figura 4, este río cubre un área de cuenca de 765 km². La longitud de su cauce es de 63 km hasta su confluencia con el río Yautepec; tiene una pendiente de cauce de 4.53 % (CNA, 1996).

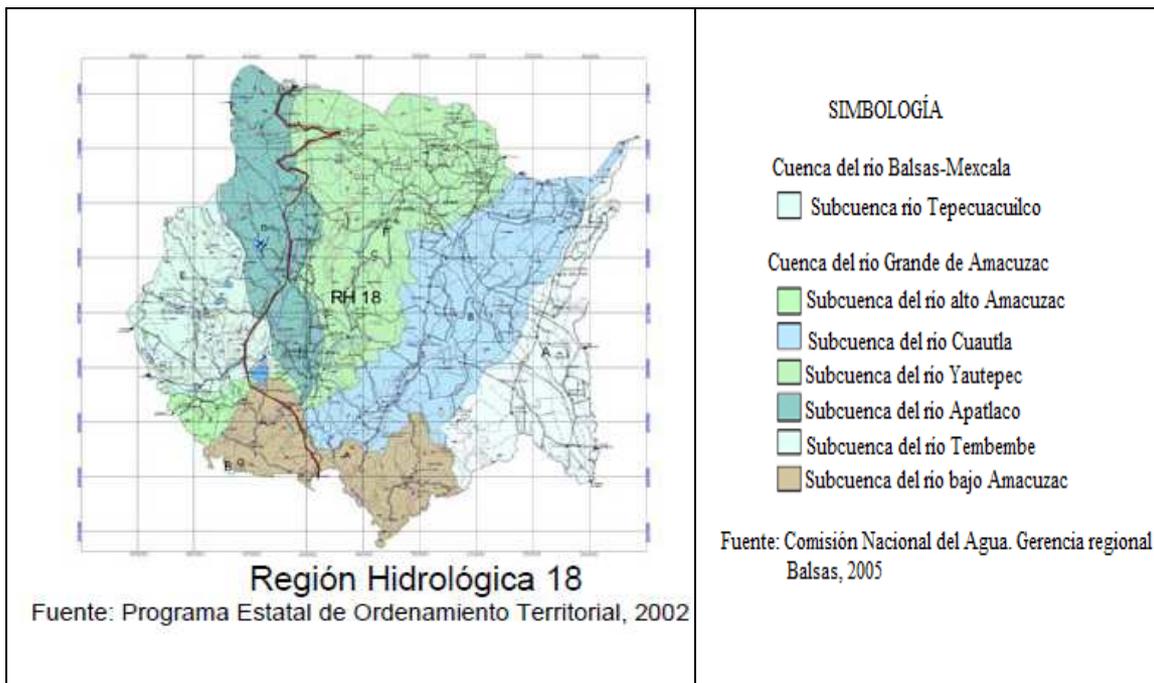


Figura 4. Mapa de la región hidrológica XVII (Programa Estatal de Ordenamiento Territorial, 2002)

La subcuenca del río Apatlaco tiene como fronteras naturales, al norte las Lagunas de Zempoala y a las serranías de Zempoala y Huitzilac; al sur el río Yautepec; al este la Sierra de Tepoztlán-Tlaltizapán; al oeste limita con el río Tembembe y las lagunas de El Rodeo y Coatetelco y al suroeste limita con la cuenca del Lago de Tequesquitengo.

El río Apatlaco nace en los manantiales de El Tepeite, El Túnel y Chapultepec, y recibe aguas de las barrancas del centro y occidente de Cuernavaca. Entre ellas se destacan: El Túnel, Pilcaya, El Pollo, Amanalco, El Limón Tlazala y los Sabinos.

Esta región está asentada geológicamente sobre rocas sedimentarias e ígneas intrusivas de origen volcánico, correspondientes al periodo cuaternario. El suelo es feozem (Símbolo H; INEGI, 1982), y se caracteriza por ser rico en materia orgánica y nutrientes, tener una capa superficial oscura algo gruesa, pH alrededor de 6.6, y 26% de arcilla. El clima es semicálido con una temperatura media de 21 a 24 °C (INEGI, 2000). La precipitación pluvial es de 1000

a 1200 mm anuales, siendo el periodo de lluvias de junio a octubre. Los vientos dominantes son del noreste hacia el suroeste (Gobierno del Estado de Morelos, 2004).

Las cuencas del Alto Apatlaco-Tembembe tienen importancia estratégica para la región. De ellas depende directamente la recarga del acuífero “Cuernavaca”, del cual se abastece la ciudad, y tiene efectos directos sobre el clima característico de la región y sobre la alta biodiversidad que ésta mantiene. Por lo tanto, la CONABIO incluye esta zona como parte de la Región Prioritaria Terrestre 108 (Arriaga, 1998; INEGI, 2002).

Problemática en la subcuenca:

A lo largo de la subcuenca del río Apatlaco existen más de 2000 descargas de aguas residuales (Figura 5). Como se puede apreciar en la Figura 5 y 6, estas aguas residuales se mezclan en su recorrido con corrientes provenientes de manantiales de la zona alta de la subcuenca. Como consecuencia de esto, los ríos que en un tiempo fueron limpios y cristalinos, son ahora más bien canales de aguas residuales, con toda la problemática que esto conlleva, tanto para los ecosistemas como para la población.



Figura 5. Fotografías sobre la problemática de la subcuenca del río Apatlaco



Figura 6. Monitoreo de la calidad del agua de la subcuenca del río Apatlaco (CEAMA, 2000)

En esta zona, la cobertura de saneamiento actual se encuentra por debajo de la media nacional, que es de 30%. Aunado esto a que las plantas de tratamiento existentes no están operando a su capacidad de diseño. Actualmente se tratan 392 L/s de aguas residuales, esto es, el 19% del total producido (CEAMA, 2008). Las ciudades de Cuernavaca y Jiutepec son las de mayor cobertura con sistemas de tratamiento convencionales, en razón de tener los principales aportes de agua residual a la cuenca, con cerca de 525 L/s (Figura 7).

Municipio	Aportación (lps)	Gasto de Operación (lps)	Cobertura (%)
Huitzilac	18.2	-	-
Cuernavaca	1010.1	242.7	24
Jiutepec	344.5	108.0	31
E. Zapata	140.3	15.0	11
Temixco	205.3	7.2	3
Xochitepec	91.1	19.4	21
Tlaltapan	29.1	-	-
Puente de Ixtla	34.1	-	-
Zacatepec	71.5	-	-
Jojutla	87.4	-	-
Total	2031.7	392.3	19

Figura 7. Plantas de tratamiento existentes en la subcuenca del río Apatlaco (CEAMA, 2007)

Estas descargas de aguas residuales son principalmente de origen doméstico. Otras de las problemáticas ambientales de la subcuenca tienen que ver con la deforestación en la zona alta, lo cual provoca deslaves y erosión. Aunado todo esto a un alto grado de producción de residuos sólidos con una mala disposición, los cuales terminan invadiendo las barrancas y los cauces.

2.4.2. Microcuenca de San Antón

Dentro del acuífero de Cuernavaca existen una serie de barrancas que confluyen para alimentar este acuífero, en un porcentaje de alrededor de 40%. Una de estas barrancas es **la Barranca de San Antón**. Ubicada dentro del municipio de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. Tiene una superficie de 151 km², y acusa una forma sensiblemente triangular, semejante a una flecha que apunta ligeramente hacia el sureste. La microcuenca de San Antón ocupa el vértice de una dilatada micro cuenca hidrográfica que drena sus aguas al Río Apatlaco y tiene una superficie de 243.71 km² (Figura 8).

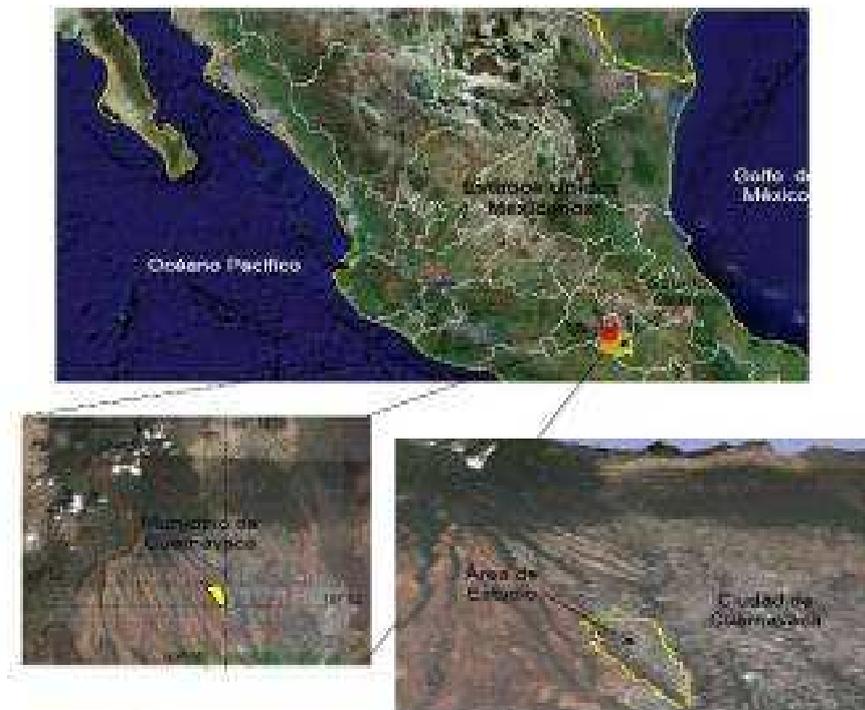


Figura 8. Ubicación de la microcuenca de San Antón (Ordenamiento Ecológico Territorial micro cuenca de San Antón, 2003)

Los límites de la microcuenca de San Antón quedan fijados por los cauces de las barrancas del Tecolote al poniente y Chiflón de los Caldos al oriente; el límite sur lo forma la confluencia de

La barranca de Tetela es el afluente más septentrional del Apatlaco. Se alimenta de los manantiales ubicados en los bosques mesófilos de montaña al noroeste de Cuernavaca, y de un lugar tupido de vegetación conocido como el Tepeite. Recibe también aguas de las barrancas de Ahuatlán, Zompante y Atzingo; cambia de denominación a **Barranca de San Antón** en la colonia del mismo nombre; continúa hacia el Sur, y luego de recoger el caudal de la Barranca del Mango, varía su nombre por Barranca del Pollo; prosigue su curso para desembocar en el Apatlaco, a la altura de Temixco.

Problemática en la zona:

En todos los casos, las barrancas funcionan como vertederos de aguas residuales domiciliarias y municipales. Su tratamiento es deficiente en el mejor de los casos, y con frecuencia, debido a la falta de cobertura del servicio de recolección de los residuos sólidos domiciliarios, se han convertido también en amplios receptáculos de basura.



Figura 10 Fotografía del canal de Sacatierra, Cuernavaca, Morelos

El cauce que muestra el deterioro más avanzado, es el de Ahuehuetitla (Chiflón de los Caldos); le sigue **Sacatierra** (Figura 10), Chinameca, San Antón y El Tecolote. Éste último recibe descargas sólo en la margen oriental dentro de un tramo relativamente corto, por lo que su degradación es menos extensa.

Cabe señalar que el deterioro más severo desde el punto de vista sanitario, estético y económico se ha dejado sentir indiscutiblemente en la Barranca de San Antón, donde la sucesión de bellas cascadas, formaciones geológicas, vegetación y fauna, se han visto sobrepasadas por una absoluta falta de planeación urbana, así como por el irresponsable manejo de los residuos sólidos urbanos, y el vertido indiscriminado de aguas residuales domiciliarias que carecen de algún tratamiento. Como se puede observar en la Figura 11, las barrancas se ven actualmente invadidas por asentamientos urbanos irregulares.

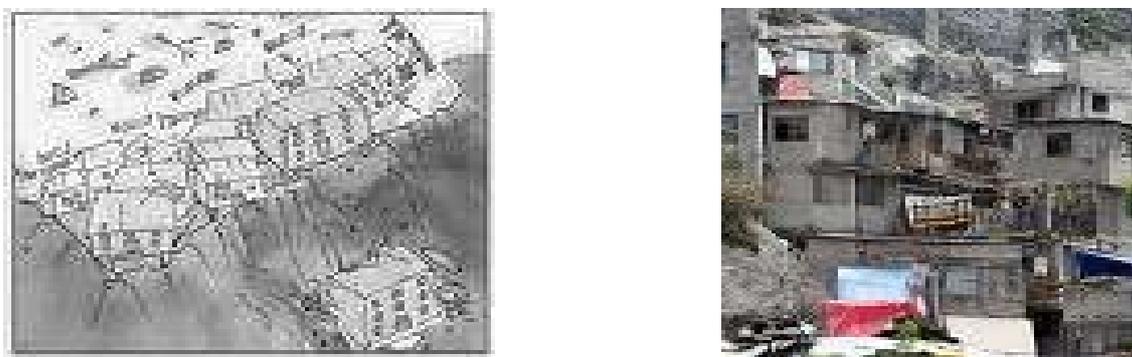


Figura 11. Ejemplificación de barrancas deterioradas

En el estado de Morelos se presenta claramente el **fenómeno** de la **concentración-dispersión de la población**. Más del 80% de la población vive en localidades de tipo urbano, mientras que un 15% de la población vive en localidades de tipo rural (Ayuntamiento de Cuernavaca-UAEM, 2006).

Para el caso de la microcuenca de San Antón, existen dos colonias que ocupan cerca del 50% de la superficie total y tienen la mayor cantidad de habitantes. Estas son: Alta Vista y San Antón. Ambas demandan la mayor atención de los servicios municipales, contienen el área territorial con mayor superficie y constituyen también la fuente de aporte más considerable de aguas residuales y residuos sólidos urbanos dentro del polígono de la microcuenca.

Por otra parte, dentro de la microcuenca de San Antón, las colonias que muestran características similares a las ya enunciadas son: Provinciana, **Sacatierra**, José López Portillo,

y las franjas pobladas que ocupan ambas márgenes de la Barrancas de Tepeyehualco (San Antón) y Chiflón de Los Caldos (Figura 12). En éstas zonas se concentran tradicionalmente los estratos de menor poder adquisitivo, los cuales también sufren deficiencias en los servicios debido a su abrupta topografía y ubicación en zonas de alto riesgo geológico.

Tabla 1. Colonias de la microcuenca de San Antón (Ordenamiento Ecológico Territorial Microcuenca de San Antón, 2003)

RELACIÓN DE COLONIAS CIRCUNSCRITAS DENTRO DEL POLÍGONO DE ESTUDIO E INDICADORES SOCIO - ECONÓMICOS EMPÍRICOS							
Colonia	Superficie territorial (has)	No. de Habitantes	No. de albercas	Índice económico	Estrato socio económico	Superficie ocupada (has)	Densidad Estimada (Hab/ha)
Alta Vista	57.33	6,720	45	0.007	Bajo	40.69	165
Alta Vista Barrancas	7.52	1,042	0	0.000	Bajo	5.31	196
Chulavista	33.64	1,504	41	0.027	Medio - alto	22.43	67
El Tecolote	3.55	202	0	0.000	Bajo	2.39	85
José López Portillo	2.92	260	0	0.000	Bajo	1.49	174
Loma Hermosa	11.15	1,610	6	0.004	Bajo	7.85	205
Lomas de San Antón	24.39	2,286	77	0.034	Alto	17.11	134
Margarita Maza de Juárez	13.82	1,244	17	0.014	Medio - bajo	7.73	161
Minas de Atzingo	2.72	218	2	0.009	Bajo	1.36	160
Plan de Ayala	25.72	2,115	29	0.014	Medio - bajo	15.75	134
Plan de Ayala Barrancas	9.84	1,233	1	0.001	Bajo	6.8	181
Provinciana	3.13	453	1	0.002	Bajo	2.65	171
Sacatierra	8.14	1,161	3	0.003	Bajo	7.92	147
San Antón	78.72	6,581	89	0.014	Medio - bajo	57.58	114
Santa Fé	9.04	793	1	0.001	Bajo	4.23	187
Suma:	291.63	27,422	312	0.011	Medio - bajo	201.29	136

Dentro del área demarcada (Tabla 1), sólo se encuentra una colonia catalogada dentro del estrato medio-alto: Lomas de San Antón, la cual dispone de servicios y adecuada infraestructura municipal.

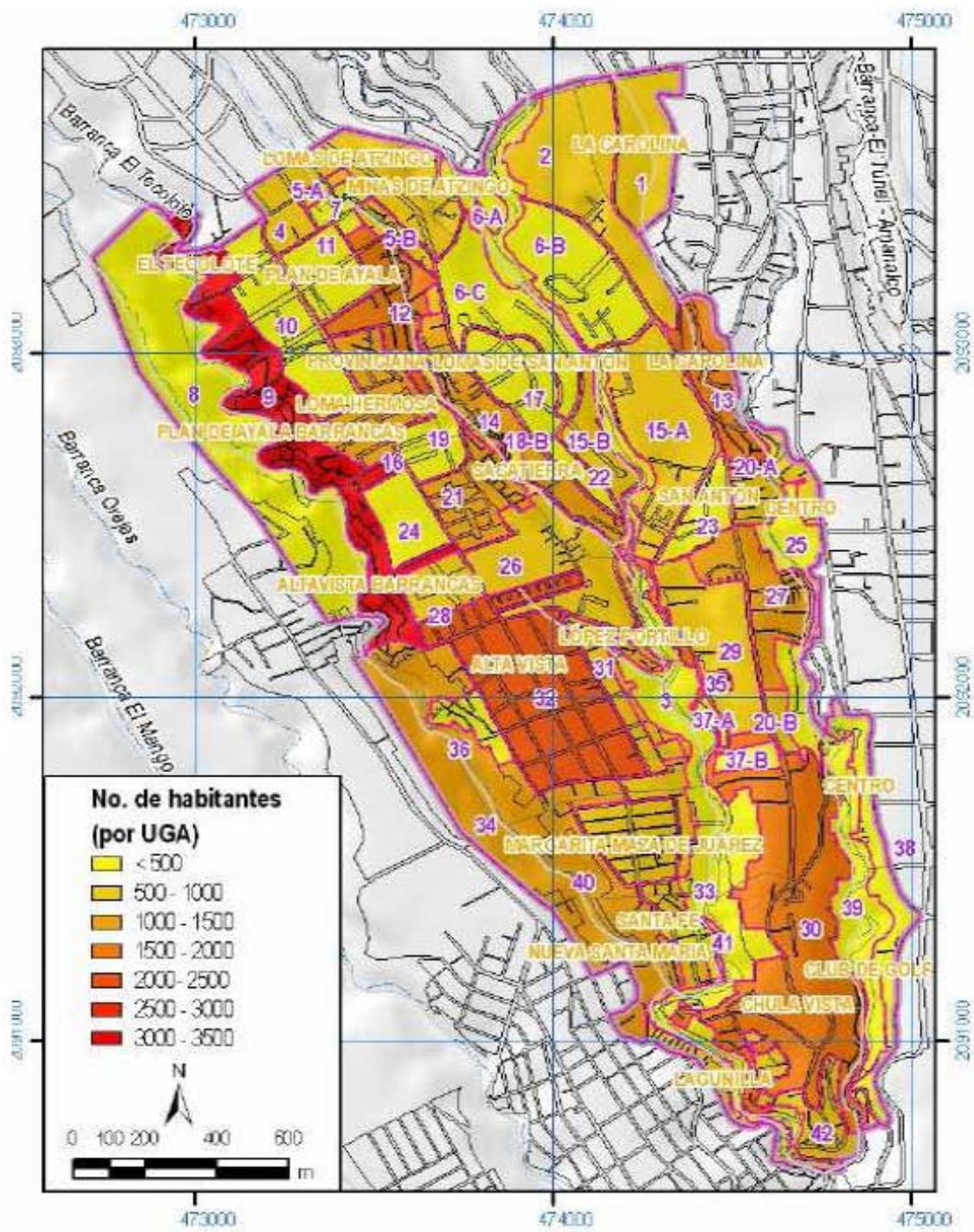


Figura 12. Densidad poblacional de la microcuenca de San Antón (Ordenamiento Ecológico Territorial Microcuenca de San Antón, 2003)

2.4.3. *Las Barrancas*

Cuernavaca es conocida como “la ciudad de la eterna primavera”, como la nombró por primera vez el naturalista alemán Alejandro Von Humboldt a principios del siglo XIX. Se refería principalmente a su agradable clima, a la exuberante vegetación y al singular paisaje caracterizado por profundas barrancas que cruzan la ciudad (García, 2003).



Figura 13. Fotografía de la barranca La Tilapeña, Cuernavaca, Morelos

Las barrancas de Cuernavaca son el paso de ríos permanentes y temporales, algunos cruzan la ciudad y se van uniendo poco a poco, formando el río Apatlaco. La presencia de estas barrancas, aunada a las corrientes de agua de los ríos y a la vegetación, provocan un clima agradable para las ciudades de Cuernavaca y Temixco principalmente, en donde el gradiente térmico no muestra grandes oscilaciones durante el año, ya que el sistema de barrancas promueve el paso de vientos templados provenientes del norte, que al atravesar las barrancas genera un descenso de la temperatura creando un clima fresco (Figura 13). Por esta acción, se considera que el sistema de barrancas actúa como un radiador que favorece la estabilidad del clima de Cuernavaca (García 2007).

En el municipio de Cuernavaca se encuentran más de 200 barrancas, las principales que flaquean la ciudad son: Amanalco al oriente y Analco al poniente, al norponiente comienza una red de barranquillas, todas con agua, que se unen a la de Tetela, para formar la de Atzingo o la del Salto de San Antón. Le siguen al poniente las del Tecolote, la Tilapeña, la Colorada, los Sabinos y Tembembe (Figura 14).



- Barrancas de:**
- **El Tecolote**
 - **San Antón**
 - **Los Caldos**

Figura 14. Barrancas “El Tecolote”, “San Antón” y “Los Caldos” (Ordenamiento Ecológico Territorial Microcuenca de San Antón, 2003)

Estas últimas mantienen una gran extensión de bosques riparios, bosques mesófilos, selva baja caducifolia y encinares, que son hábitat de una gran diversidad de especies de flora y fauna silvestres (Figura 15 y 16).

651 especies de fauna:

- Invertebrados
 - 292 especies de mariposas
 - Un Decápodo (Cangrejito barranqueño).
- Peces: Un pez endémico amenazado
- Aves: 263
- Reptiles: 9
- Anfibios 16
- Mamíferos: 69



Figura 15. Biodiversidad de las barrancas de Morelos (Ordenamiento Ecológico Territorial Microcuenca de San Antón, 2003)

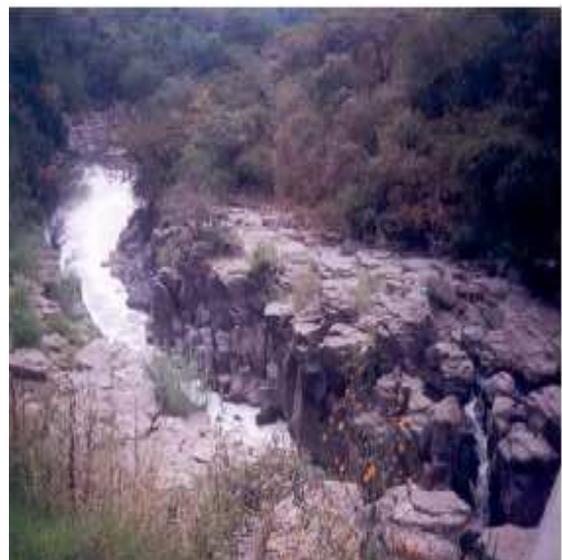
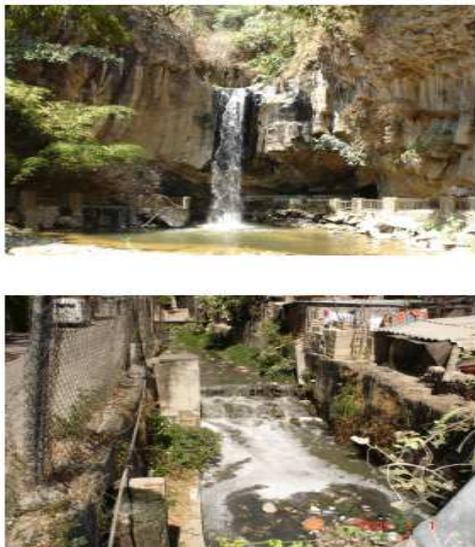


Figura 16. Fotografías de barrancas en la microcuenca de San Antón (García, 2007)

2.4.4. Barrio de San Antón Analco

A solo 3 kilómetros del centro de Cuernavaca se puede ubicar el antiguo pueblo de San Antonio Analco, ahora llamado **Barrio de San Antón**, famoso por su cascada de más de 40 metros de altura, entre prismas de basalto cristalizado y una exuberante vegetación. Los alrededores del ahora llamado Barrio de San Antón se caracterizan por su alfarería, principalmente macetas y vasijas, así como por sus múltiples viveros que ofrecen plantas y flores de la región (García, 2003).

Cabe señalar que el deterioro más severo desde el punto de vista higiénico, estético y económico se ha dejado sentir indiscutiblemente en la Barranca de San Antón, donde la sucesión de bellas cascadas, formaciones geológicas, vegetación y fauna se han visto sobrepasadas por una absoluta falta de planeación urbana, así como por el irresponsable manejo de los residuos sólidos urbanos y el vertido indiscriminado de aguas residuales domiciliarias y municipales que carecen de algún tratamiento (García, 2003).

Aunque los datos no son concluyentes, se calcula que el Salto de San Antón recibe aproximadamente el 70% de las aguas residuales y el 30% de los residuos sólidos generados en la microcuenca. El Salto reporta entre 1 y 5 millones de unidades formadoras de colonias de coliformes fecales (Mazari, 2006).



Figura 17. Salto de San Antón, Cuernavaca, Morelos

2.4.5. Zona de estudio: canal de Sacatierra

A un paso de San Antón se encuentra Sacatierra. Sacatierra es un grupo de viviendas a orillas del canal de Sacatierra, tributario del Salto de San Antón, de gente en su mayoría migrante, provenientes de Guerrero. Se caracteriza por ser una zona de alto grado de marginación, con carencia de servicios básicos y recurrentes problemas de salud. Dicha comunidad vive hacinada encima del canal, al cual vierten sus aguas residuales directamente, sin tratamiento alguno, aunado a los aportes de aguas residuales de las poblaciones canal arriba. El canal de Sacatierra, antiguamente un arroyo, constituye un aporte importante al cauce del río Apatlaco a partir del río Tetlama.

El canal de Sacatierra es probablemente el lugar más contaminado de Cuernavaca. Sus descargas explican casi el 80% del problema del Salto (Figura 18 y 19).



Figura 18. Fotografías del canal de Sacatierra



Figura 19. Colonia Sacatierra, Cuernavaca, Morelos

La venta de terrenos ejidales y comunales con fines de urbanización, sin contar con autorizaciones legales para ello y mucho menos con servicios básicos, ha traído como consecuencia que durante las últimas tres décadas la ciudad de Cuernavaca ha sufrido el embate del desarrollo urbano anárquico, especialmente en esta zona de barrancas, como es el caso de algunas de las barrancas de la microcuenca de San Antón, en que diversos asentamientos humanos regulares e irregulares han invadido las zonas federales de las barrancas y las han utilizado para sus descargas de aguas negras, la mayor parte de estas sin tratar, así como para basureros de desechos domésticos y de la construcción.

El entramado social de dicha zona presenta un grado de organización previa. En tiempos anteriores se caracterizaba por conductas delictivas e inseguridad, producto de su inestabilidad, al ser un asentamiento irregular, y de lo escarpado y difícil del terreno. La labor del “Padre Toño” Sandoval dio frutos al trabajar con jóvenes de la zona, logrando un pacto comunitario de no violencia en 1997. Entre estos jóvenes se encuentra Rodrigo Morales, quien ha contribuido activamente en favor de esta zona. Con la partida del padre Toño se perdió un poco esta organización, pero quedó establecido un Patronato de vecinos.

Entre los objetivos de dicho patronato se encuentra el rescate y mejoramiento de las condiciones del canal de Sacatierra, a través de acciones encaminadas a limpiar directamente el canal para evitar brotes estacionarios de dengue.

Como antecedente de organización y participación en la zona se encuentra registrada además la intervención de Biosustenta S.C, a petición del Patronato, la cual estaba integrada por jóvenes estudiantes de la UNAM y de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Esta asociación sostuvo tres ejes de acción: 1) la Organización Social; 2) el Mejoramiento Técnico y Operativo del Programa y 3) la Educación Ambiental. Entre las acciones realizadas aquí destaca un proyecto de separación y recolección de basura que a la fecha continúa vigente.

A pesar de estas iniciativas, el canal se encuentra actualmente muy deteriorado, ocasionando múltiples problemas, tanto de salud como de deterioro del nivel de vida de los pobladores en el canal y aguas abajo.

La consecuencia actual es que dicho canal recibe directamente nueve descargas generales provenientes de otras colonias canal arriba, y más de 250 descargas domiciliarias en Sacatierra



Figura 20 Colonia Sacaterra, Cuernavaca, Morelos

En la zona se desarrolla actualmente el **Programa de Saneamiento Integral de la Cuenca del río Apatlaco**. Iniciativa entre la federación y el municipio de Morelos. Busca promover el saneamiento integral de la cuenca mediante la planeación e implementación de infraestructura de saneamiento particularmente en Cuernavaca, Jiutepec, Emiliano Zapata y Tlaltizapan. Además, se busca usar tecnologías apropiadas de saneamiento en lugares de difícil acceso.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

A menudo la naturaleza es capaz de remediar por sus propios mecanismos la contaminación, aunque solo con ciertos compuestos y en un limitado rango de concentraciones. Cuando se presentan descargas caudalosas en una pequeña área la naturaleza se muestra incapaz de recuperarse de dichos desajustes. En estos casos debemos ayudar a mantener su equilibrio. Durante años se han venido desarrollado diferentes tecnologías para el tratamiento de efluentes acuosos en gran medida mediante la utilización de sistemas físico-químicos. La búsqueda de sistemas de tratamiento denominados «medioambientalmente amigables» ha desembocado, en los últimos años, en una revolución en la utilización de sistemas biológicos no convencionales para la depuración de aguas.

En estas estrategias se encuentra la utilización de los sistemas de biofiltros sobre lecho orgánico (BF) y los humedales construidos del tipo entramados de raíces (ER).

3.1. Sistemas de Tratamiento Biológicos no Convencionales

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales con base en procesos biológicos no convencionales son aquellos en los que el tratamiento principal es proporcionado por componentes del medio natural, en los que el efecto depurador se debe a la interrelación de la vegetación, del suelo y de los microorganismos (terrestres y acuáticos).

Estos sistemas se caracterizan por requerir un mínimo de personal de operación, por un menor consumo energético y una menor producción de lodos. Sin embargo, habitualmente requieren de mayores superficies de terreno. Entre estos sistemas se encuentran los BF y ER (Garzón, 2003).

3.2. Biofiltración sobre Lecho Orgánico

Los **Biofiltros (BF)** son dispositivos que eliminan una amplia gama de compuestos contaminantes desde una corriente de fluido (aire o agua) mediante un proceso biológico (Figura 21). La biofiltración es un proceso de filtración biológico en el que la biomasa está fija en un soporte granulado que permite simultáneamente la depuración de la fracción biodegradable del agua residual y la retención de materias en suspensión.

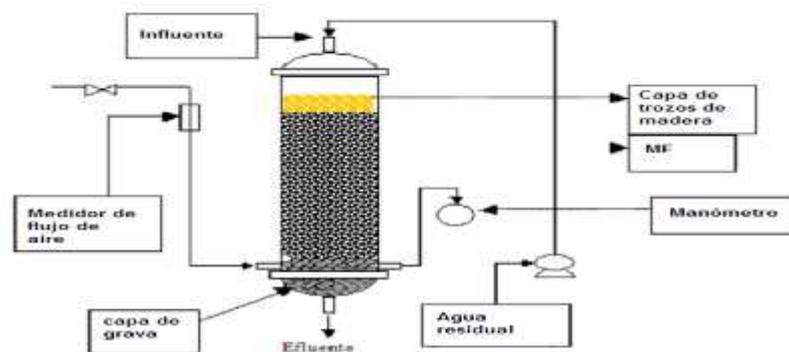


Figura 21. Diagrama de biofiltro sobre lecho orgánico (Garzón, 2004)

El soporte es el medio biológico filtrante, donde los compuestos indeseables, en primera instancia, son **absorbidos** y **adsorbidos**, para posteriormente ser degradados por microorganismos. El material filtrante es una mezcla de materiales naturales con un área específica y espacios vacíos grandes. Este medio provee una gran superficie de contacto y los nutrientes necesarios para que en ella se desarrolle una **biopelícula** de microorganismos. Una vez establecidos, éstos microorganismos son los que realizan la degradación de los compuestos indeseables. Por lo tanto, el principal componente del biofiltro es el medio biológico filtrante, debido a que es el hábitat de la población microbiana. Sus características son esenciales, pues determinan el modo de desarrollo de los procesos metabólicos, así como la capacidad de degradación de los contaminantes. La naturaleza del material de soporte afecta el tiempo de operación, la actividad de las bacterias y los costos de operación del biofiltro (Garzón, 2004).

La transformación de la materia orgánica presente en las aguas residuales se lleva a cabo por poblaciones bacterianas que se adhieren al soporte granulado y lo colonizan, formando la biopelícula ya mencionada, que es una zona donde se presenta un permanente intercambio de masa entre las fases líquida y gaseosa. En ella se presentan fenómenos relacionados con los equilibrios interfaciales, como la transferencia de contaminantes y del oxígeno por difusión, la retrodifusión de los productos metabólicos, la absorción de contaminantes en el soporte y la absorción y desorción de agua del lecho (Thalasso, 2006).

La principal característica del proceso es el aprovechamiento de la capacidad de algunos microorganismos para oxidar una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos. Esta oxidación es posible por la utilización de los contaminantes como fuentes de energía y/o carbono por parte de los microorganismos. En esta oxidación los compuestos contaminantes de mayor peso molecular se oxidan en compuestos de menor peso molecular, y los microorganismos pueden entenderse como **catalizadores** de esta reacción (Garzón, 2004).

La Figura 21, anteriormente mostrada, nos muestra que un biofiltro consta de tres capas: una capa de grava gruesa seguida por una capa de material de soporte, para luego contener una tercera capa de trozos de madera más delgada. La capa de grava realiza la acción de retener la cama orgánica y la última capa de trozos de madera delgados ayuda a distribuir homogéneamente el influente.

El agua residual por tanto es distribuida uniformemente de manera vertical descendente para así atravesar la cama orgánica, donde se va depurando, para luego salir por la parte inferior del sistema. Para realizar un correcto diseño y dimensionamiento del sistema se debe tomar en cuenta: la carga y profundidad hidráulica del medio filtrante, el área superficial específica, y la velocidad de la carga hidráulica.

3.3. Humedal construido del tipo entramado de raíces

El sistema de humedales construidos del tipo entramado de raíces (ER) es un tipo de humedal artificial de flujo subsuperficial (Figura 22), es decir, se constituye de canales empacados con grava como material de soporte para la vegetación hidrófita emergente (Seidel, 1966).

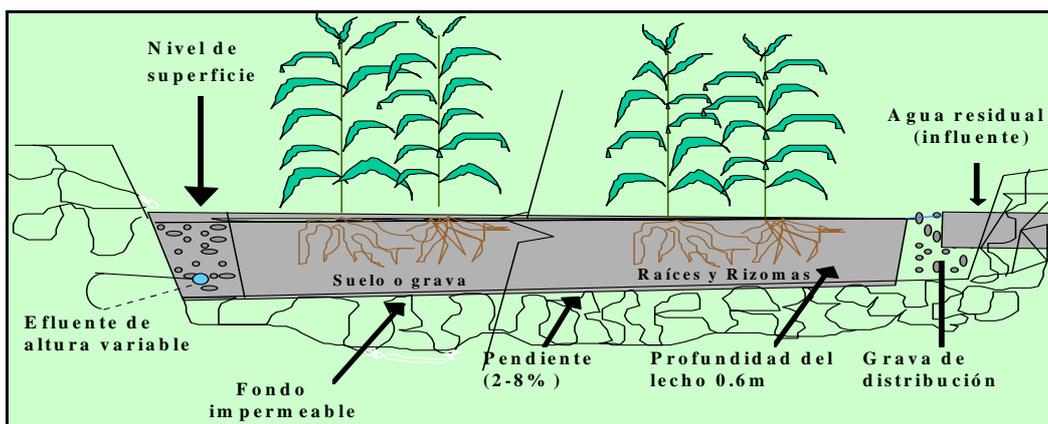


Figura 22. Humedal de flujo subsuperficial (Rivas, 2005)

Son también un sistema de depuración basado en los procesos de purificación natural que ejercen las plantas en arroyos y ríos. Combinan las ventajas de los filtros con las de plantas flotantes y plantas enraizadas (Rivas, 2006). El sistema se basa en la creación de varios canales impermeabilizados donde se colocan plantas del tipo hidrófilas enraizadas emergentes. El agua residual pasa a través del entramado de raíces que se forma bajo el agua, el cual sirve de soporte a numerosos microorganismos que reciben el oxígeno directamente de las macrófitas sin necesidad de aireación. En estas condiciones, los microorganismos degradan la mayor

parte de la materia orgánica. Por otro lado, las plantas absorben por su sistema radicular los nutrientes minerales eutrofizantes. Las plantas suministran el oxígeno al proceso de depuración que se realiza en el sistema radicular. Estas degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los contaminantes, pero también proporcionan una extensa superficie donde se posibilita el crecimiento bacteriano y se filtran los elementos sólidos en suspensión (Rivas, 2006).



Figura 23. Humedal construido del tipo entramado de raíces

Los humedales de tipo subsuperficial tienen la ventaja de que al estar al nivel de la superficie del agua debajo de la cama del medio se disminuye el riesgo de olores, insectos vectores, además de que el medio proporciona mayor superficie de contacto, eficientándose así el tiempo de residencia, y por lo tanto requiriendo menor área. (Crites, 1991).

Un sistema de ER operando a escala real fue recientemente monitoreado por el Dr. Marco Garzón del IMTA en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Morelos, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados eficiencia de remoción de contaminantes del sistema fosa séptica-entramado de raíces ubicado en el CENIDET (Garzón, 2008)

PARÁMETRO	Agua Residual Cruda	Salida Fosa Séptica	Salida Humedal tipo ER	Porcentaje de remoción	Limite de descarga según NOM-001-SEMARNAT-1996		
					A Uso en riego agrícola	B Uso público urbano	C Protección a la vida acuática
				(%)			
Temperatura (°C)			19.85		N.A.	40	40
G y A (mg/L)	38.2	22.1	9.58	74.92	15	15	15
SST (mg/L)	228	120	42	81.58	150	75	40
DBO ₅ (mg/L)	295	87	43.5	85.25	150	75	30
N-Total (mg/L)	154	138	107	30.52	40	40	15
P-Total (mg/L)	13.5	15.3	12.85	4.81	20	20	5
Coliform. Fecal (NMP/100mL)	8.40 E+06	3.75 E+05	1.00 E+05	98.81	1000	1000	1000
H. Helminto (Num. HH./1L)					1	1	1
DQO _{Total} (mg/L)	648	302	124	80.93	-	-	-
DQO _{Soluble} (mg/L)	573	246	104	81.84			

Estos resultados indican que el sistema tiene una remoción aceptable para la mayoría de los parámetros (DQO, DBO₅, SST y G y A) pero no remueve bien los nutrientes, nitrógeno y fósforo. Cabe mencionar que en este caso la concentración del nitrógeno es muy elevada con respecto a un agua residual doméstica típica, debido a que son aguas de tipo sanitario y en estos casos la concentración de nitrógeno se encuentra entre 100 y 250 mg/L. En el caso del CENIDET la concentración fue de 154 mg/L y solo se removió el 30.52% que corresponde a 47 mg/L removidos. En cuanto al fósforo (P_{Total}) la concentración no es muy elevada (13.5 mg/L), sin embargo el sistema removió tan solo 4.85% (Garzón, 2008).



Figura 24. Entramado de raíces ubicado en el CENIDET (Garzón, 2008)

4. OBJETIVO

- Tomando en cuenta que ambas tecnologías (BF y ER) parecen adecuadas para su aplicación en pequeñas comunidades y zonas urbanas marginadas, **el objetivo principal** del presente trabajo de investigación es el de estudiar el efecto sobre la eficiencia del tratamiento, al combinar ambas tecnologías en un nuevo sistema de tratamiento.

Alcances

- Probar tres diferentes caudales con el objetivo de determinar las condiciones de operación óptimas, así como la capacidad real de depuración del sistema combinado.
- Emplear como material filtrante desechos de podas de la región, así como emplear en los humedal construido tipo entramados de raíces especies de plantas que sean de beneficio social y económico a los pobladores de la colonia Sacatierra, canal de Sacatierra, Cuernavaca, Morelos.
- Desarrollar un nuevo sistema que a mediano plazo sea utilizado como base para implementar un proyecto de tratamiento de aguas residuales en la colonia Sacatierra, Cuernavaca Morelos, que sea factible dentro del Programa de Saneamiento del Río Apatlaco.
- Desarrollar un estudio de factibilidad de aplicación que abarque aspectos socioeconómicos y de gestión social.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

5. HIPÓTESIS

- Al integrar adecuadamente un sistema de biofiltro y humedal tipo entramado de raíces se obtendrán significativos porcentajes de remoción de contaminantes del agua residual doméstica.
- El sistema combinado es capaz de soportar cargas superiores a la carga de diseño.

6. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

Parte Técnica

- i. Diseño del sistema de tratamiento de BF y ER, con base en experiencias previas a nivel laboratorio.
- ii. Diseño del sistema de BF y ER con base en su localización dentro del IMTA.
- iii. Selección, trituración y traslado del material filtrante del Centro de Acopio de Jiutepec Morelos a las instalaciones del IMTA.
- iv. Cotización y construcción del sistema de tratamiento de BF y ER.
- v. Puesta en marcha y maduración.
- vi. Seguimiento de control y evaluación de la eficiencia del sistema de tratamiento de BF y ER a diferentes cargas orgánicas e hidráulicas. Este seguimiento incluye:
 - *Seguimiento de la calidad del influente y efluente:* El proceso de biofiltración es controlado por los parámetros de operación que influyen en la eficiencia del proceso. El influente y el efluente de los biofiltros se deben monitorear frecuentemente. Los parámetros de control que se analizaron son los siguientes: Parámetros de campo (pH, temperatura, conductividad), Demanda Química de Oxígeno (DQO), nitrógeno en forma de NH_4 , nitrógeno total, fósforo en forma de PO_4 , fósforo total y coliformes fecales.
 - *Seguimiento del comportamiento del material filtrante:* Se determinó el grado de compactación a lo largo del tiempo.
 - *Monitoreo del crecimiento y salud de las plantas del ER:* Se registró el crecimiento de las plantas, así como el número de estas a lo largo del tiempo.

Desarrollo del Estudio de Factibilidad

- i. Selección del lugar de aplicación de la tecnología.
- ii. Realización de la Ingeniería Básica:
 - Selección de las descargas y plan de conexiones.
 - Aforo de las descargas.
 - Dimensionamiento de los sistemas de tratamiento a escala real.
- iii. Realización del estudio socioeconómico.
 - Estudio de Costo–Beneficio en la implementación del sistema de tratamiento de AR.
- iv. Gestión Social.
 - Participación social
 - Acuerdos de operación y mantenimiento entre la población.
- v. Elaboración e integración del documento final (estudio de factibilidad), para su posterior financiamiento y aplicación.

El siguiente diagrama metodológico esquematiza la lógica seguida en la realización de este trabajo de tesis. En general consta de dos partes: la parte técnica y el estudio de factibilidad. En un primer momento se desarrolló la parte técnica integrada por un periodo de capacitación, seguido por el desarrollo del diseño del sistema basándose en un caudal de diseño de 100 L/día. Una vez determinado el diseño y las dimensiones se procedió a la selección y acondicionamiento de los materiales a emplear en el sistema. A la par, se determinó la mejor ubicación para la construcción del prototipo tomando en cuenta que la calidad del agua residual a emplear fuera significativa y de fácil acceso, que se contara con el espacio requerido y que hubiese alguna fuente de electricidad cercana.

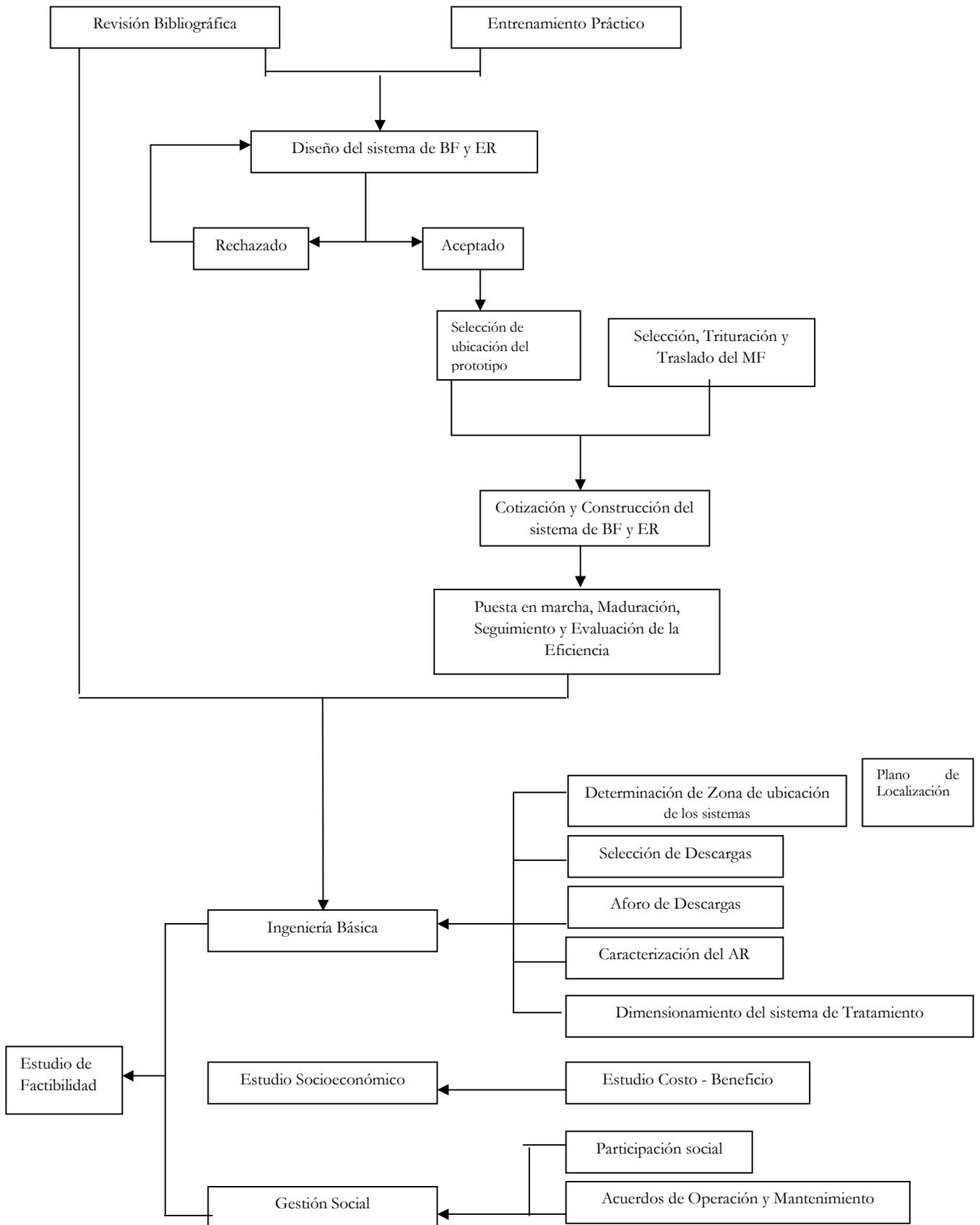
Una vez determinado el mejor sitio se procedió a solicitar cotizaciones para la construcción del sistema. Construido el sistema, lo siguiente fue empacar el biofiltro, colocar las capas de grava

y las plantas. Hecho esto prosiguió la puesta en marcha, la etapa de maduración y aclimatación para luego comenzar con los monitoreos constantes, tanto del influente como del efluente, el crecimiento y salud de las plantas y la compactación del material filtrante.

Por otro lado, la segunda parte del presente trabajo de tesis consistió en la realización de un estudio de factibilidad que busca sentar las bases para su posterior aplicación en la colonia de Sacatierra, Cuernavaca, Morelos. Dicho estudio constó de tres partes:

- Ingeniería básica: que se integró por la determinación de la mejor ubicación del sistema en la zona de estudio y los actores involucrados, la selección de las descargas, y el aforo y caracterización de las mismas, como lo cual se pudo determinar las dimensiones del sistema.
- Estudio socioeconómico: donde se realizó un aproximado de los costos de la construcción y operación del sistema.
- Y por último un estudio general de gestión social: para determinar el grado de participación social en la zona de estudio y los posibles acuerdos y compromisos entre los actores involucrados.

Diagrama Metodológico seguido



7. RESULTADOS PARTE TÉCNICA

7.1. Diseño del Sistema de Tratamiento

7.1.1. Dimensiones del Biofiltro

Con base en la experiencia del Dr. Marco Garzón del IMTA se determinó que el biofiltro tuviera las siguientes características para el caudal de diseño (100 L/día).

BF	As (m ²)	D (m)
1	0.165	0.45

Donde:

- As: Área superficial
- Diámetro

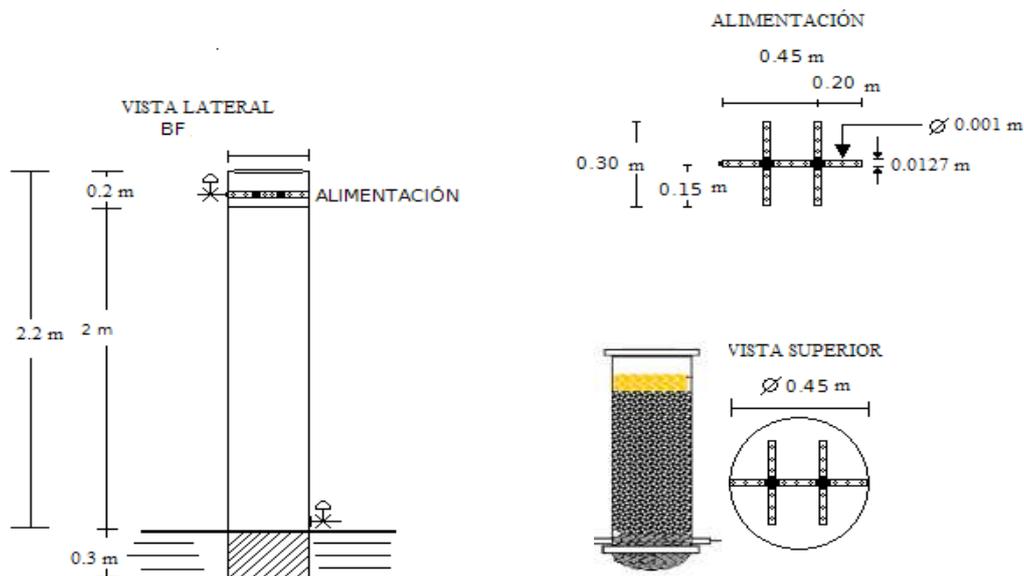


Figura 25- Dimensiones del BF

Se empleó tubería de concreto liso prefabricado de 2 m el tramo.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

7.1.2. Parámetros de operación del biofiltro

Decididas estas dimensiones, se determinó el volumen real del biofiltro (volumen de espacios vacíos) para calcular el tiempo de retención hidráulica (TRH) del sistema. Se decidió además probar con caudales de 100 L/día (caudal de diseño), 200 L/día y 400 L/ día.

Volumen del biofiltro vacío.

$$V_{BF} = (\pi)(r^2)(h)$$

$$V_{BF} = (\pi)(0.225\text{ m})^2(2\text{ m}) = 2.8\text{ m}^3$$

Volúmen de espacios vacíos, tomando en cuenta que se utilizó 2 m³ de madera de Tabachín con una porosidad de 74.9% (García, 2007):

$$V_{\text{Espacios vacíos}} = (2\text{ m}^3)(0.749) = 1.498\text{m}^3$$

Este volumen se puede comprobar con la ecuación: de espacios vacíos

y = -0.2348x + 15623 obtenida por (García, 2007) para el Tabachín.

Área Superficial del Biofiltro

$$A_s = (\pi)(r^2) = (\pi)(0.225\text{ m})^2 = 0.165\text{m}^2$$

Caudal suministrado en la Primera Etapa:

$$Q = 100\text{ L/día} = 0.1\text{ m}^3/\text{día}$$

Caudal suministrado en la Segunda Etapa:

$$Q = 200\text{ L/día} = 0.2\text{ m}^3/\text{día}$$

Caudal suministrado en la Tercera

Etapa:

$$Q = 400\text{ L/día} = 0.4\text{ m}^3/\text{día}$$

Tiempo de Retención Hidráulica en el Biofiltro

$$TRH = E_{\text{espacios vacíos}} / Q$$

Donde:

$E_{\text{espacios vacíos}}$: Volumen de espacios vacíos

Q: Caudal

$$TRH_{100} = (1.498\text{m}^3) / (0.1\text{ m}^3/\text{día}) = 14.98\text{ días}$$

$$TRH_{200} = (1.498\text{ m}^3) / (0.2\text{ m}^3/\text{día}) = 7.59\text{ días}$$

$$TRH_{400} = (1.498\text{ m}^3) / (0.4\text{m}^3/\text{día}) = 3.7\text{ días}$$

Es necesario además conocer la carga hidráulica que ingresará al sistema en los diferentes caudales, esta carga hidráulica se refiere al volumen de agua aplicado por unidad de superficie en un determinado período de tiempo.

Demanda Química de Oxígeno promedio en el Influyente

$$\text{DQO} = 600 \text{ mg/L} = \mathbf{0.600 \text{ kg} / \text{m}^3}$$

Carga Hidráulica

$$\text{CH} = Q / A_s$$

$$\text{CH}_{100} = 0.1 / 0.165 = \mathbf{0.6060 \text{ m} / \text{día}}$$

$$\text{CH}_{200} = 0.2 / 0.165 = \mathbf{1.2121 \text{ m} / \text{día}}$$

$$\text{CH}_{400} = 0.4 / 0.165 = \mathbf{2.4242 \text{ m} / \text{día}}$$

Cargas orgánicas superficial en el Biofiltro

$$\text{COS} = (\text{CH}) (\text{DQO}_{\text{inf}})$$

Donde:

CH: Carga Hidráulica

DQO_{inf}: Concentración de DQO en el influente

Determinada la carga hidráulica por caudal podemos calcular la carga orgánica superficial, la cual se refiere a la cantidad de materia orgánica que ingresa al biofiltro por unidad de área superficial.

$$\text{COS}_{100} = (0.6060 \text{ m} / \text{día}) (0.600 \text{ kg DQO} / \text{m}^3) = \mathbf{0.3636 \text{ Kg DQO} / (\text{m}^2 \cdot \text{día})}$$

$$\text{COS}_{200} = (1.2121 \text{ m} / \text{día}) (0.600 \text{ kg DQO} / \text{m}^3) = \mathbf{0.7272 \text{ Kg DQO} / (\text{m}^2 \cdot \text{día})}$$

$$\text{COS}_{400} = (2.4242 \text{ m} / \text{día}) (0.600 \text{ kg DQO} / \text{m}^3) = \mathbf{1.4545 \text{ Kg DQO} / (\text{m}^2 \cdot \text{día})}$$

Estos parámetros de operación son elementales para entender mejor las características del biofiltro, el tiempo que tardará en depurarse el agua y la carga orgánica que entrará al sistema en los diferentes caudales.

7.1.3. Dimensiones del humedal tipo entramado de raíces

A lo largo del diseño, construcción y operación del humedal construido de tipo entramado de raíces se contó con una amplia asesoría por parte del Biólogo Armando Rivas, investigador del IMTA.

Para el dimensionamiento de humedales construidos de flujo subsuperficial, como es el caso del humedal construido tipo entramado de raíces se emplean las siguientes ecuaciones de diseño:

- Ecuaciones de diseño para humedal de flujo subsuperficial (Kadlec y Knight, 1996).

$$\ln\left(\frac{C_e - C^*}{C_i - C^*}\right) = \frac{-k}{q} \quad q = \frac{365Q}{A_s} \quad A_s = \frac{365Q}{k} \ln\left(\frac{C_i - C^*}{C_e - C^*}\right)$$

Donde

A_s = área de humedal requerida (m^2)

C_e = concentración del efluente (mg/L)

C_i = concentración del influente (mg/L)

C^* = constante del contaminante (mg/L) – para climas fríos

k = constante de velocidad del primer orden (m/año)

q = velocidad de la carga hidráulica (m/año)

Q = caudal promedio en el humedal (m^3 /día)

En la Tabla 3 se presentan los datos base de diseño que corresponden a las concentraciones teóricas de cada contaminante que se esperan tener a la salida del biofiltro que es el influente del humedal construido y a la salida del humedal (efluente).

El sistema se construyó para 100 L/día. Pero se aplicarán dos caudales mayores 200 y 400 L/día, para saber hasta que caudal sigue manteniendo su eficiencia.

Tabla 3. Datos de diseño humedal

Parámetro	Concentración Influyente (mg/L)	Concentración Efluente (mg /L)	Constante C* (mg/L)	K₂₀
DBO	150	20	11.45	180
N _T	20	15	1.5	
P _T	15	5	0.02	12
C _T	2.23 X 10 ⁴	5 X 10 ²	10	95

Con base a la ecuación de diseño se calculó el área superficial requerida para tres contaminantes base (Demanda Química de Oxígeno, fósforo total y coliformes fecales). Como se demuestra en los cálculos la mayor área requerida corresponde a la remoción de fosforo total, dicho contaminante, difícil de remover, se convierte entonces en el factor limitante base. Es decir, el área requerida es la necesaria para la remoción del contaminante más difícil de remover: el fósforo.

En la Tabla 4 se muestra el volumen y el área superficial requerida para un caudal de 100 L/día empelando dichas ecuaciones en cada uno de los tres contaminantes base.

Tabla 4. Área superficial y volumen, caudal 100 L/día

Caudal (L/día)	Parámetro	As requerida(m²)	Volumen requerido (L)
100	DQO	0.84	241.9
100	C _T	1.675	483.8
100	P _T	3.35	964.2

Con base en lo anterior se pudo determinar las dimensiones que requeriría el humedal para obtener el área superficial requerida para la remoción de cada uno de los contaminantes (Tabla 5), buscando un arreglo adecuado para mantener la forma de canales. También se determinó el tiempo de retención hidráulica (TRH) para la remoción de cada uno de los contaminantes base.

Tabla 5 Datos de diseño del humedal tipo entramado de raíces con un caudal de 100L/día

ER	As (m ²)	Ancho (m)	Largo (m)	Profundidad (m)	TRH (d)	Parámetro de diseño
1:0.5	0.84	0.60	1.4	0.60	2.4	DQO
1:1	1.675	0.60	2.8	0.60	4.8	CF
1:2	3.35	0.60	5.58	0.60	9.6	PT

V total para 100 L / día = (Largo)(ancho)(alto)(% de porosidad de la grava)(%Porosidad Raíces) = (7m)(0.60m)(0.60m)(0.48*) = 1.2 m³ = **1,200 L**

* Porosidad Grava (Las pruebas de vaciado se realizaron de acuerdo con la metodología descrita por Garzón, 2003)

CARGA HIDRÁULICA= Q / As

CARGA SUPERFICIAL = (CH) (concentración del contaminante en el Influyente)

Bajo estas condiciones el volumen real del humedal construido de tipo entramado de raíces tomando en cuenta la porosidad de las raíces y la grava sería de **1,200 L**.

Debido a todo lo anterior se decidió que el humedal construido tipo entramado de raíces tuviera las siguientes dimensiones:

- **Longitud: 7m (acomodado en forma de U para ganar espacio)**
- **Ancho: 0.60 m**
- **Profundidad: 0.60 m**
- **Primer punto de muestreo (DQO): a los 1.4 m**

- Segundo punto de muestreo (coliformes fecales): a los 2.8 m
- Tercer punto de muestreo: fósforo total: a los 6 m

Se calculó además el área requerida y volúmenes del sistema en caso de que se diseñara para 200 y 400 L/día para, con estos datos, realizar una comparación de la eficiencia real con la teórica.

En resumen, para 200 L/día aplicando las ecuaciones de diseño tendríamos:

Tabla 6. Datos ER 200L/día

As (m ²)	Volumen (L)	Ancho (m)	Largo (m)	Profundidad (m)	TRH (d)	Parámetro de diseño
1.14	328.32	0.60	1.9	0.60	3.28	DQO
2.92	839.8	0.60	4.86	0.60	8.4	CF
6.7	1930.1	0.60	11.17	0.60	19.3	PT

Es decir, que teóricamente, para un caudal de 200 L/día se requeriría:

Un ER de: **12 m** de largo, 0.60 m de ancho, 0.60 m de profundidad con el primer punto de muestreo para el monitoreo de DQO a los 2 m, el segundo punto de muestreo para coliformes fecales a los 5 metros y el tercer punto para fósforo a los 10 m. En forma de espiral como se muestra en la Figura 26.

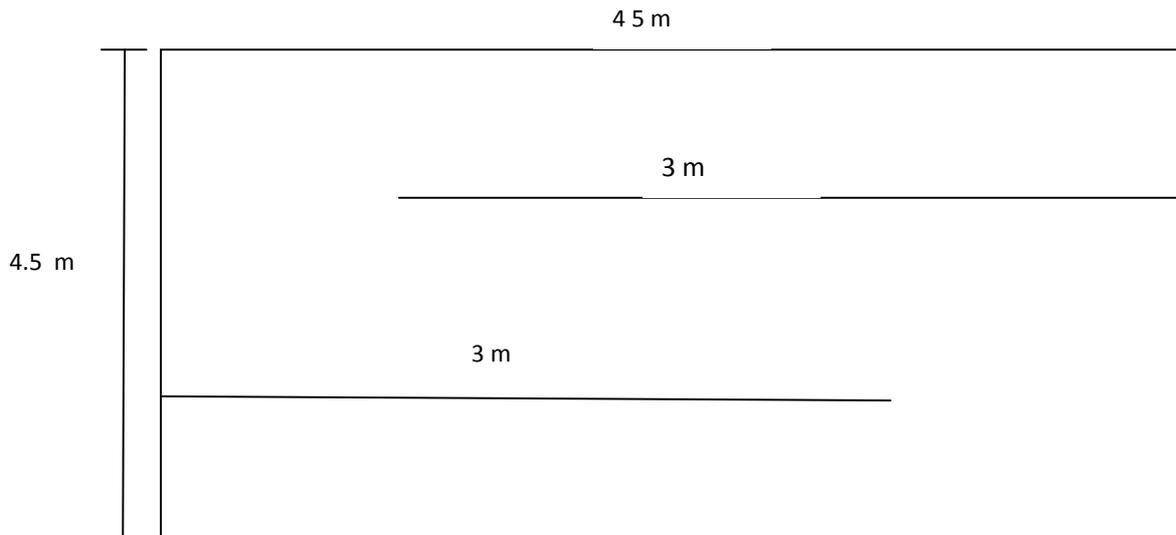


Figura 26. Dimensiones del ER con un caudal 200L/día

Volumen de agua total: **2,073.6 L** (Tomando en cuenta la porosidad)

Por otro lado, para un caudal de 400 L / día se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7. Datos obtenidos para el ER con un caudal de 400L/día

Caudal (L/día)	Parámetro	As (m ²)	Volumen (L)
400	DBO	2.26	656.64
400	C _F	5.88	1693.4
400	P _T	13.4	3853.4

Por lo tanto, resumen las dimensiones requeridas serían:

Tabla 8. Datos área superficial y volumen del ER para un caudal de 400 L/día

As (m ²)	Ancho (m)	Largo (m)	Profundidad (m)	TRH (d)	Parámetro de diseño
2.26	0.60	3.8	0.60	1.64	DQO
5.88	0.60	9.8	0.60	4.23	CF
13.4	0.60	22.3	0.60	9.6	PT

Es decir, que teóricamente, para un caudal de 400 L/día se requeriría:

Un ER de: **22 m** de largo, ya que es el largo necesario para la remoción de fósforo (contaminante limitante), 0.60 m de ancho, 0.60 m de profundidad con el primer punto de muestreo para el monitoreo de DQO a los 4 m, el segundo punto de muestreo para coliformes fecales a los 10 metros y el tercer punto para fósforo a los 22m. En espiral Figura 27.

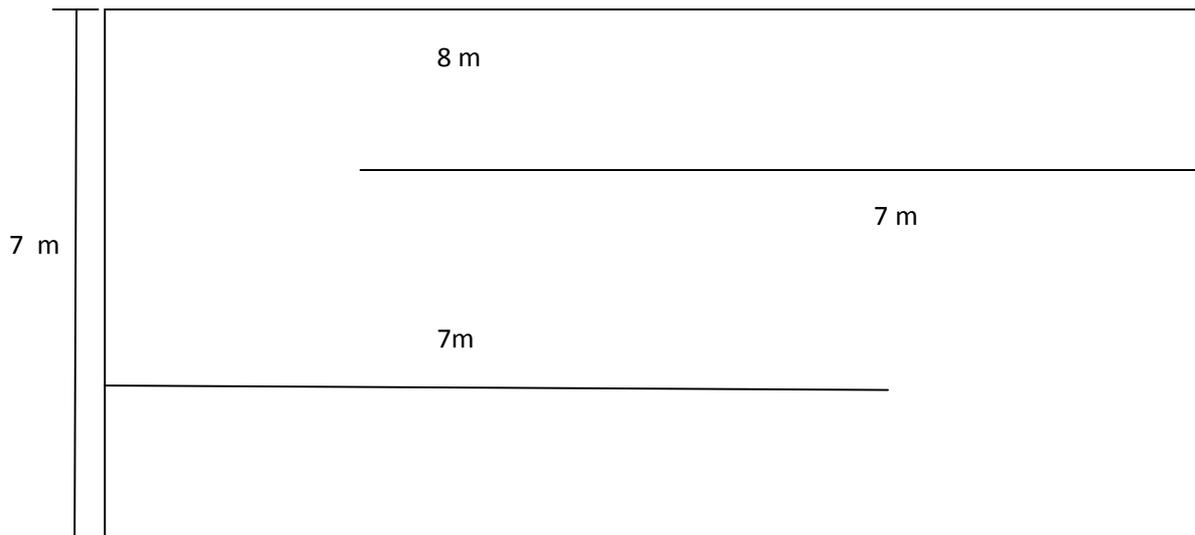


Figura 27. Dimensiones del ER con un caudal de 400L/día

Volumen total de agua = **3,800 L**

De este análisis podemos observar que las dimensiones del humedal requeridas para la remoción de los tres contaminantes base aumentan teóricamente de 7 m de longitud para un caudal de 100 L/día a 12 m para un caudal de 200 L/día y 22 m para un caudal de 400 L/día.

7.1.4. *Parámetros de operación del humedal tipo entramado de raíces*

De la misma forma que para el biofiltro se calculó la carga hidráulica y la carga orgánica superficial para cada uno de las caudales y los diferentes contaminantes base (Tablas 9,10 y 11).

Tabla 9. Datos carga hidráulica y orgánica ER, caudal 100L/día

Parámetro	C.H. de diseño para remover cada contaminante (m/ día)	Carga Superficial (Kg de Contaminante/ m². día)
DQO	0.119	0.0714
CF	0.06	0.0134
PT	0.03	0.0045

Tabla 10. Datos carga hidráulica y orgánica ER, 200L/día

Parámetro	C.H. de diseño para remover cada contaminante (m/ día)	Carga Superficial (Kg de Contaminante/ m². día)
DQO	0.087	0.0522
CF	0.034	0.076
PT	0.015	0.0022

Tabla 11. Datos carga hidráulica y orgánica ER, 400L/día

Parámetro	C.H. de diseño para remover cada contaminante (m/ día)	Carga Superficial (Kg Contaminante/ m².día)
DQO	0.0442	0.026
CF	0.017	0.04
PT	0.0074	0.001

En las Tablas anteriores podemos observar que la carga hidráulica y la carga superficial van disminuyendo conforme aumenta el caudal.

7.2. Caracterización del agua residual a emplear en el sistema

El agua residual doméstica empleada como influente en el sistema proviene de la planta de tratamiento “El Texcal” ubicada en Jiutepec, Morelos, a unos minutos del IMTA.

De estudios previos realizados a cargo del Dr. Marco Garzón del IMTA se conocen los valores de contaminantes presentados en la Tabla 12 para dicha agua, por lo que se sabe que el agua residual del “Texcal” presenta niveles elevados de contaminación. Por otro lado, en la Tabla 12 también se pueden observar valores provenientes de un muestreo realizado por la Secretaría de Agua Potable y Alcantarillado de Morelos (SAPAC) en el canal de Sacatierra el 23 de enero de 2009, y los valores típicos del agua residual doméstica. Por lo tanto, al comparar los valores de los contaminantes en dicha Tabla podemos decir que el agua del “Texcal” es representativa, incluso en algunos parámetros su carga es poco más elevada, al agua de la zona de estudio (canal de Sacatierra).

Tabla 12 Caracterización del AR y comparación entre tres tipos de AR

PARÁMETRO	AR Típica	AR Sacatierra*	AR El Texcal	Límite de Descarga según NOM-001- SEMARNAT-1996		
				A Uso en Riego Agrícola	B Uso Público Urbano	C Protección a la Vida Acuática
Temperatura(°C)	NA	19.7	28	N.A.	40	40
pH	7.5	7.70	7.44	N.A.	N.A.	N.A.
Conductividad (mS/cm)	920	493	882			
G y A (mg/L)	50	14.32	43.4	15	15	15
DB O ₅ (mg/L)	300	197.28	146	150	75	30
N _{Total} (mg/L)	30	17.61	30.2	40	40	15
P _{Total} (mg/L)	15	7	9.3	20	20	5
Coliform. Fecales (NMP/100MI)	5X 10 ⁶	4.95 X 10 ⁶	4.6 X 10 ⁶	1000	1000	1000
DQO _{Total} (mg/L)	500	390.62	503.3	-----	-----	-----

*Muestra tomada del Canal de Aguas Negras Ubicado en Privada Mango S/N, Colonia Sacatierra
 Fecha de Muestreo: 23/01/2009
 Laboratorio: Mercury Lab. S.A. DE C.V.
 Fuente: SAPAC

En la Tabla 12 podemos observar que se tienen valores muy similares y significativos tanto para la DQO, como para los valores de fósforo y nitrógeno.

7.3. Descripción del Sistema de Tratamiento

El sistema consta de tres tanques: dos de 450 L que hacen la función de fosa séptica y uno de 1100 L donde se almacena el AR cruda. Una vez que el agua pasa por estos tanques es bombeada del tanque de 1100 L al BF mediante otra bomba sumergible. Cada bomba cuenta con un tablero de control y la bomba que alimenta al BF está programada automáticamente.

Una vez que el agua es bombeada al BF lo atraviesa por gravedad y cae en un registro para luego entrar por gravedad al ER. Después de su travesía por el ER el agua escurre a un tanque enterrado para luego ser conducida por gravedad aprovechando la pendiente a una rejilla.

7.4. Dimensionamiento del Sistema de Tratamiento

Como se dijo anteriormente, el sistema consta de los siguientes componentes:

- Dos tinacos de 450L + un tinaco de 1100L (hacen la función de fosa séptica)
- Biofiltro: Con un diámetro de 0.45 m y una altura de 2 m.

Tabla 13. Dimensiones BF

BF	As (m ²)	D (m)
1	0.165	0.45

- Humedal tipo entramado de Raíces: Con una longitud de 7 m (en espiral), un ancho de 0.60 m y una profundidad de 0.60 m.

Tabla 14 Dimensiones del ER

ER	As (m ²)	Ancho (m)	Largo (m)	Profundidad (m)	TRH (d)	Parámetro de diseño
1:0.5	0.84	0.60	1.4	0.60	2.4	DQO
1:1	1.675	0.60	2.8	0.60	4.8	CF
1:2	3.35	0.60	5.58	0.60	9.6	PT

Primer punto de muestreo (DQO): **a los 1.4 m**

Segundo punto de muestreo (coliformes fecales): **a los 2.8 m**

Tercer punto de muestreo: fósforo total: **a los 6 m**

- Tinaco de 450 L enterrado (salida)

7.5. Localización del sistema de tratamiento

El sistema se sitúa dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua en Jiutepec, Morelos, a un costado de la planta de tratamiento del Instituto y muy cerca de la barda posterior del mismo. En la figura 28 se muestra un bosquejo lateral del sistema de tratamiento.

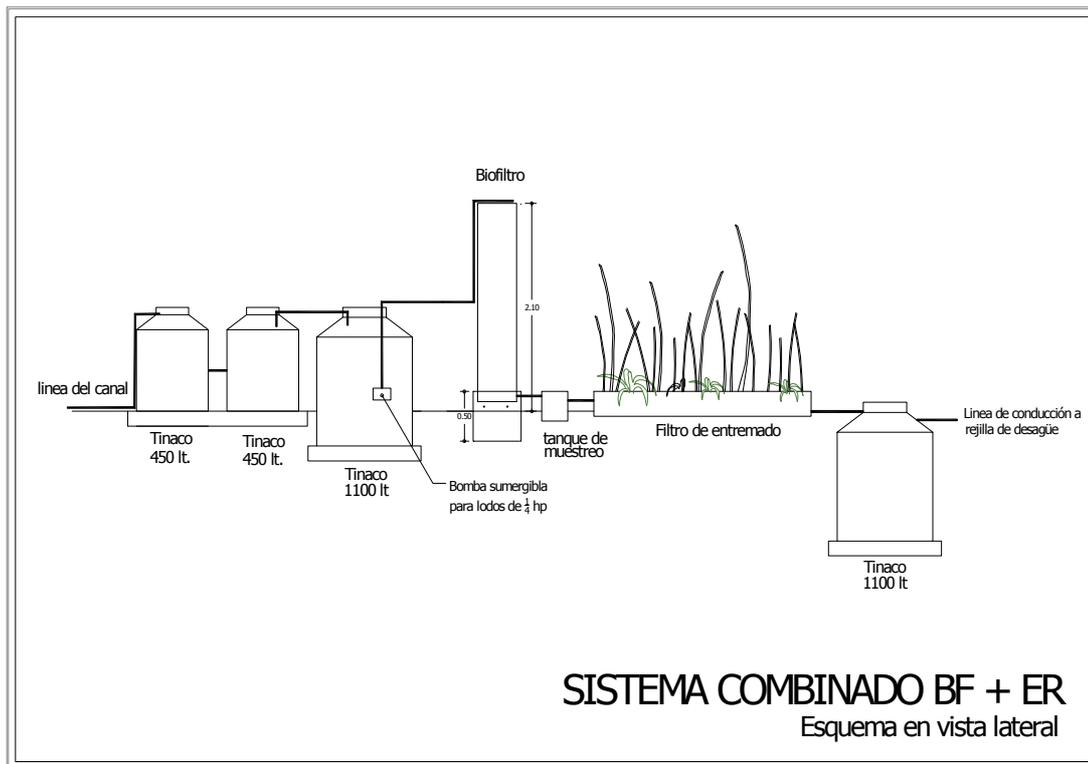


Figura 28 Diagrama del sistema combinado de BF + ER

Una vez dadas las condiciones, se procedió a la construcción del sistema de BF +ER (Figura 29), para esto se contrató a la empresa: Sistemas Integrales de Ingeniería y Diseño (SIID) a cargo del Ing. Alejandro Muñoz.

<p>Se instaló un tren de tratamiento compuesto por:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dos tinacos de 450 L interconectado en la parte superior. Estos tinacos hacen la función de fosa séptica. - Un tinaco de almacenamiento de 1100 L. 	<ul style="list-style-type: none"> - Humedal empacado con una capa de piedra de 3-5 cm de diámetro y otra capa de grava de ¼ de diámetro 
<ul style="list-style-type: none"> - Líneas de conducción entre los tinacos y hacia la parte superior del biofiltro. Sistema de dispersión uniforme del agua compuesta por tubería de PVC perforada.  <ul style="list-style-type: none"> - Biofiltro compuesto por cilindro de concreto. Empacado con una capa de grava de ¼ y material filtrante leñoso 	<ul style="list-style-type: none"> - Tubería de salida con tanque de 450L enterrado y sistema de conducción hacia rejilla. 

Figura 29. Proceso de construcción del sistema

En la figura 30 y 31 se muestra los planos de construcción del sistema y algunas fotografías del proceso de construcción.



Figura 30. Fotos del proceso de construcción del sistema

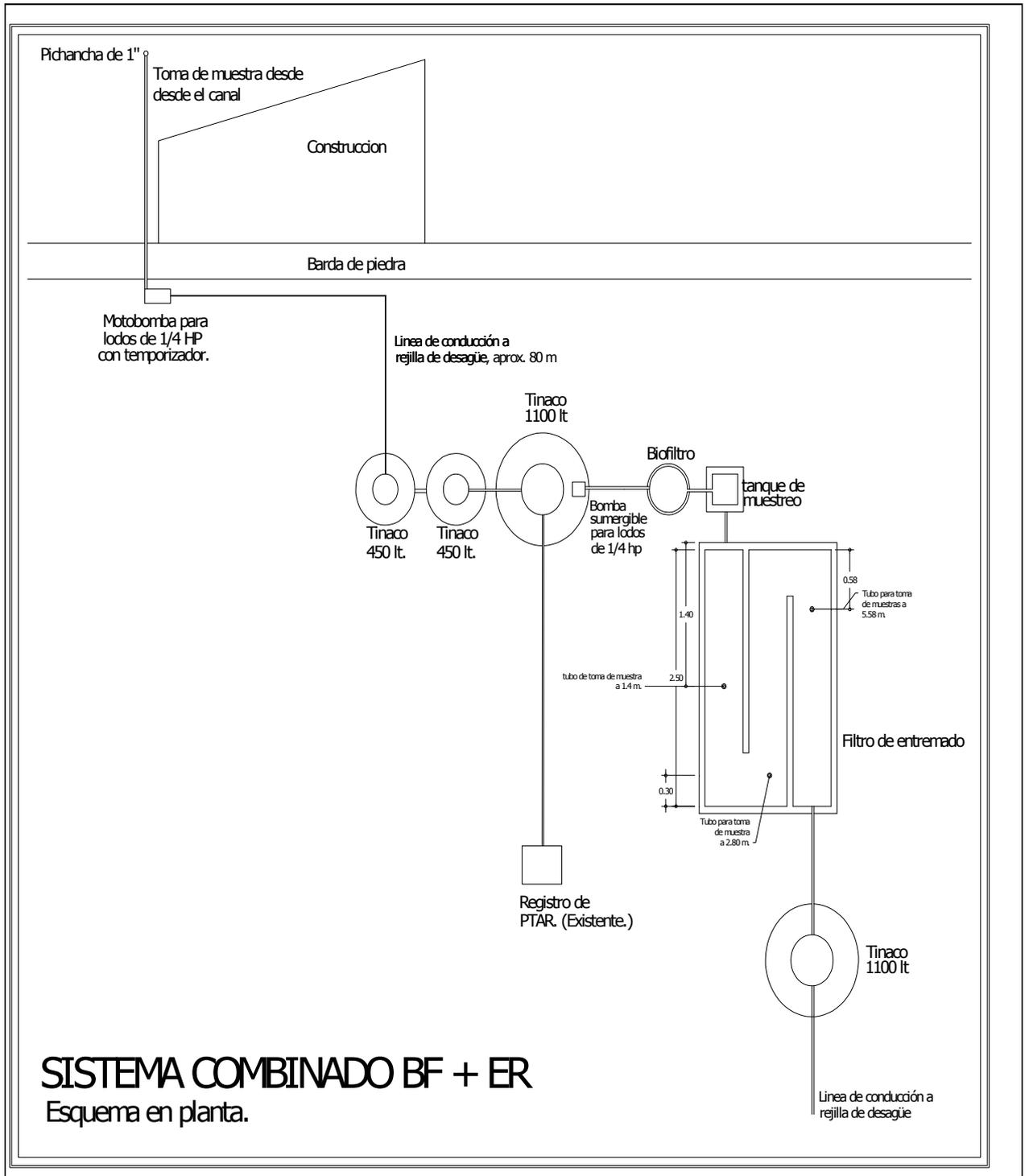


Figura 31. Planos de construcción del sistema

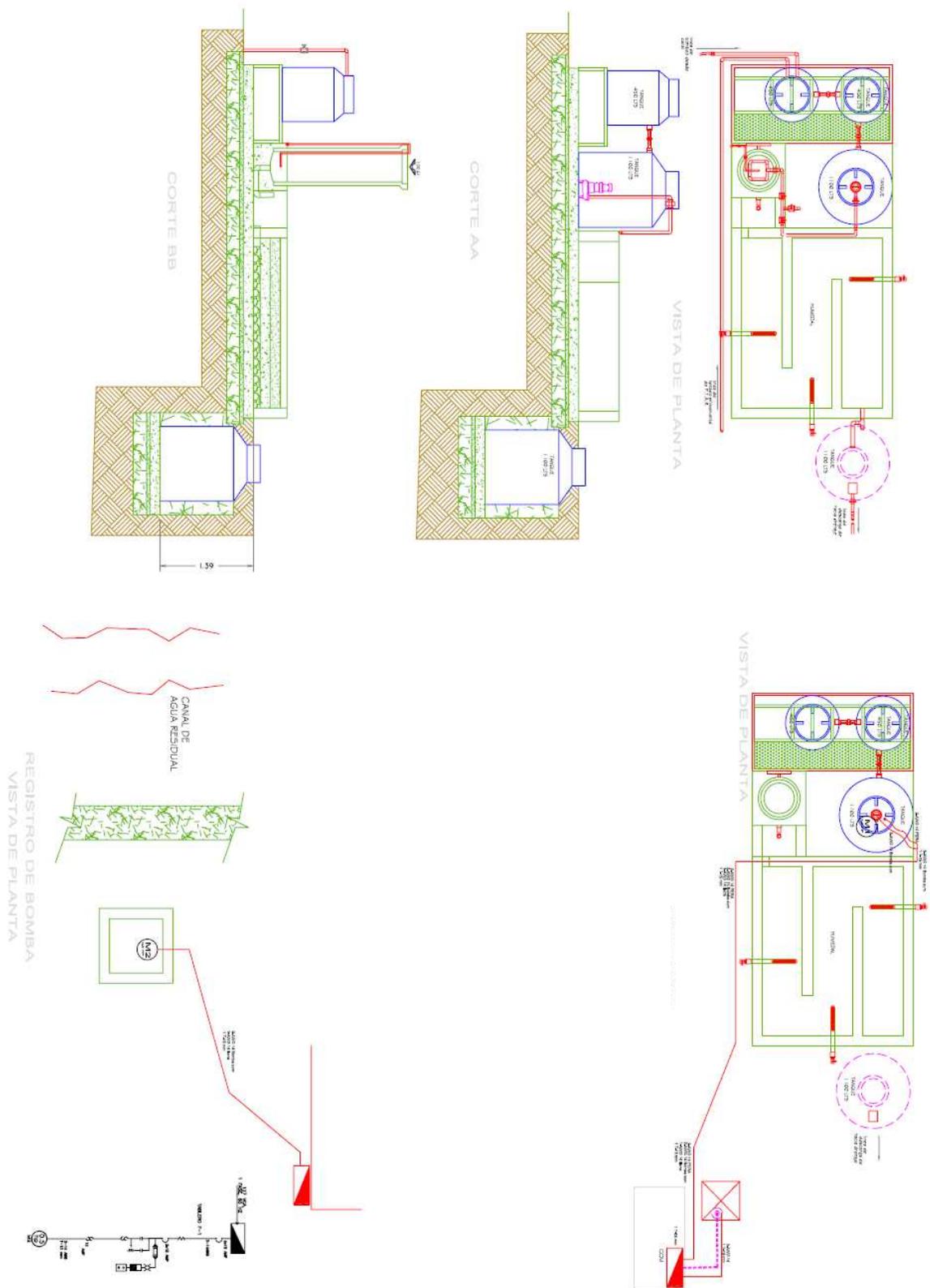


Figura 31. Planos de construcción del sistema

7.7. Proceso de selección y caracterización de los materiales

En esta sección se mencionarán las características principales de los materiales empleados tanto en el biofiltro como en el humedal tipo entramado de raíces, así como su selección.

7.7.1. Proceso de selección y caracterización de materiales para el biofiltro

El biofiltro fue empacado con desechos de poda de Ficus (Figura 32). A continuación se hace una breve descripción de dicho árbol.



Figura 32. Árbol de Ficus

Picus benjamina sp, características generales:

Árbol siempre verde de 4-6 m de altura, con copa densa y ramillas colgantes, muy ornamental. Corteza lisa, gris. Yemas terminales de color verde, agudas. Hojas alternas, de unos 10-12 cm de longitud, de forma ovado-elíptica, con la superficie verde brillante. El ápice es bastante acuminado, la base es redondeada y su textura es un poco coriácea. Pecíolos largos, de 2.5 cm de longitud, glabros, algo acanalados por la parte de arriba. Frutos axilares, sésiles, de globulares a oblongos, de alrededor de 1 cm de diámetro, de color púrpura-rojizo en la madurez. Se usa como adorno de jardines y para proporcionar sombra.

Características físicoquímicas del ficus:

Al contacto con el látex tiene una acción irritante sobre la piel, por acción de las furocomarinas. También el simple contacto con la planta puede producir fotosensibilidad, que

se muestra en forma de ampollas. Se tiene que evitar comer frutos no maduros, pues resultan tóxicos del aparato digestivo y pueden producir lesiones en las manos (<http://www.botanical-online.com/florficus.htm>).

Costo y disponibilidad:

Se puede obtener sin costo ya que es un desecho de la poda de jardines y áreas verdes municipales. Su disponibilidad es durante todo el año.

Se seleccionó el ficus debido a que en pruebas anteriores a nivel laboratorio en el IMTA a cargo del Dr. Marco Garzón, demostró ser un material estable, que confiere la rigidez estructural que necesita el medio para resistir largos periodos de operación sin degradarse y taponar el sistema y permite la formación de una biopelícula sana, diversa y estable (Garzón, 2003).

7.7.2. Proceso de selección y caracterización de materiales para el humedal tipo entramado de raíces

Antecedentes:

Entre las plantas más comúnmente empleadas en humedales encontramos la *Typha* (espadaña o eneas), *Scirpus* (Juncos) y *Phragmites* (Carrizos). Recientemente se han realizado estudios sobre la posibilidad de emplear plantas de ornato en dichos sistemas depuradores.

De acuerdo con (Zurita, 2008) la *Z. aethiopica* (Ave del Paraíso) y la *Canna. hybrids* (Canna) son especies ornamentales muy eficientes para la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub-superficial.

Descripción del lecho del humedal tipo entramado de raíces:

Bajo el asesoramiento del Arq. Cesar Añorve se tomaron en cuenta las siguientes observaciones:

- Dejar aproximadamente 20 cm entre cada planta.
- Empacar el humedal tipo entramado de raíces con capas de material de diferente gravimetría. En el fondo lleva una capa de 25 cm de espesor de piedra de 3 a 5 cm de diámetro, encima una capa de 20 cm de grava triturada de $\frac{3}{4}$ y por último una capa de 15 cm de granzón, arena y tierra. A esta observación se le realizó la modificación de

poner solo dos capas de material: la capa de 25 cm de piedra de 3 a 5 cm de diámetro y otra capa de grava de $\frac{3}{4}$ de 35 cm, ya que si se dejaba la capa de tierra se corría el riesgo de taponear el sistema y provocar una inundación.

- Dejar algo de pendiente y elevar la salida a 15 cm del suelo para lograr el tiempo de retención deseado.

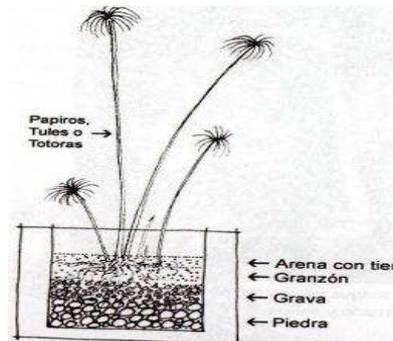


Figura 33. Diagrama de las capas grava en el ER (Arq. César Añorve, 2007)

Selección de la Plantas:

Los criterios de selección fueron:

- Plantas halófitas enraizadas emergentes con alta tolerancia a ambientes acuosos contaminados.
- Plantas que pudieran serle de utilidad a la comunidad, es decir, plantas con valor ornamental.
- Plantas de fácil crecimiento, que soportaran el sol y de fácil propagación.
- Que no sean plagas o causen efectos nocivos al ecosistema.

Con base en la investigación realizada en los diferentes viveros de Cuernavaca, jardines botánicos como el Jardín Etnobotánico de Acapatzingo, opinión de expertos y la literatura, se determinó utilizar las siguientes especies:

Nombre Común	Nombre Científico	Tipo	Características	Foto
Cuna de Moisés	<i>Spathiphyllum wallisii</i>	Hidrófita enraizada emergente	Se adapta incluso a los interiores que tienen poca luz, pero prefiere los luminosos.	
Papiro	<i>Cyperus papyrus</i>	Hidrófita enraizada emergente	Planta acuática o palustre, arraigante por lo general con rizomas, prefiere pleno sol y semisombra, necesita un suelo rico, compuesto de 2 partes de turba húmeda por 1 parte de tierra de jardín y una parte de arena.	
Lirio Persa	<i>Iris japonica</i>	Hidrófita enraizada emergente	Plantas bulbosa de la familia <i>Iridaceae</i> con vistosas flores.	
Platanillo	<i>Heliconiaceae</i>	Hidrófita enraizada emergente	Son hierbas grandes, con las hojas opuestas y dispuestas drásticamente, es decir, en un solo plano.	

Ave del Paraíso	<i>Strelitzia reginae,</i>	Hidrofito enraizada emergente	Sol directo, planta perenne de la familia de las <i>Strelitziaceae</i> de 1 a 2 m. de altura.	
Jengibre Mariposa	<i>Hedychium coronarium</i>	Hidrofito enraizada emergente	Planta perenne tropical, muy resistente a las aguas contaminadas, con aroma a jazmín. Forma rizomas largos.	
Hoja Elegante	<i>Alocasia</i>	Hidrofito enraizada emergente	Se cultiva en interior y en exterior (climas cálidos) por sus grandes hojas verdes	
Alcatraz	<i>Zantedechia aethiopica</i>	Hidrofito enraizada emergente	Semisombra. Es una planta herbácea de la familia de las aráceas, crece a partir de rizomas	

Tabla 15. Selección de las Plantas a emplear en el ER

Para la obtención de las plantas se contó con la donación de una buena proporción de estas por parte del Jardín Etnobotánico de Acapatzingo.

Los criterios de distribución en el ER se basaron en buscar la homogeneidad para así hacer una determinación realista de las plantas más eficientes, quedando de la siguiente forma (Figura 34):

50 plantas a lo largo de los 7 m del ER:

- 30 Papiros
- 4 Cunas de Moisés
- 4 Alcatraces
- 4 Lirios Persa
- 2 Jengibre Mariposa
- 2 Hoja Elegante
- 4 platanillos
- 4 Aves del Paraíso



Figura 34 Sistema combinado de tratamiento una vez colocadas las plantas

Como se observa en la Figura 35 la distribución buscó mantener cierta homogeneidad y armonía con respecto a los puntos de muestreo.

7.8. Proceso de acondicionamiento de materiales para el sistema de tratamiento

Para empacar el BF se utilizaron 2 m³ de madera. El material se preparo como sigue:

- 1.-La madera se obtuvo en el Centro de Acopio de Jiutepec como desecho de poda.
- 2.-Se molió con malla de 1 pulgada (Figura 36).



Figura 36 Fotografías proceso de construcción del sistema

- 3.-Una vez listo el material se transportó al IMTA.
- 4.-Se almacenó para su posterior uso.
- 5.-Se extendió el material para eliminar humedad en exceso (Figura 37).



Figura 37. Fotografías proceso de construcción del sistema

- 6.- Se tamizó con tamiz de 1 pulgada para eliminar impurezas y homogenizar el material (Figura 38).



Figura 38. Fotografías proceso de construcción del sistema

7.- El siguiente paso fue acondicionar la grava a utilizar en el BF para lo cual se cribó como malla de 1 pulgadas (Figura 39).



Figura 39. Fotografías proceso de construcción del sistema

7.9. Instalación del Biofiltro

En el fondo del biofiltro se colocó una tarima para evitar posibles taponamiento del tubo de salida del BF, se colocó además una capa de 30 cm de grava de 1 plg y 1.7 m de medio filtrante orgánico (ficus) previamente humedecida de un 60-80% (Figura 40).

7.10. Instalación del ER

En el ER en serpentín se colocaron las dos capas de grava tal y como se mencionó anteriormente. Una vez hecho esto se observó que el nivel de inundación no era el adecuado para el correcto crecimiento de las plantas por lo que se realizaron adecuaciones para aumentar el tiempo de retención y asegurarse de que las raíces quedaran perfectamente inundadas (se subió el tubo de salida 15 cm).

Acordada la distribución de las plantas en relación a el tránsito del agua residual por el ER, se procedió a adecuar a las plantas para su adaptación teniendo mucho cuidado con no lastimas las raíces y rizomas, se sumergieron primero en un tambo de agua para evitar burbujas que pudieran afectar la capilaridad y eficiencia de las plantas.

En las Figuras 40,41 y 42 podemos observar algunas fotografías del proceso de instalación del biofiltro y del humedal tipo entramado de raíces.



Figura 40. Fotografías proceso de acondicionamiento de materiales



Figura 41. Fotografías proceso de acondicionamiento de materiales



Figura 42. Fotografías proceso de acondicionamiento de materiales

7.11. Arranque del sistema de tratamiento

El sistema fue operado en un principio con 300 L/día. Se decidió disminuir el caudal a 100 L/día ya que este fue el caudal de diseño. Posteriormente se operó con un caudal de 200 L/día para pasar después a un caudal de 400 L/día. Se decidió probar hasta 400 L/día ya que refleja el caudal aproximado de producción de agua residual de la casa prototipo en Sacatierra, como se comentará en el estudio de factibilidad. Cada caudal fue probado y monitoreado 2 meses. El proceso fue operado a partir de noviembre de 2008.

Una vez completadas las acciones anteriores, se procedió a arrancar el sistema el día 23 de Noviembre. Su alimentación fue de 300 L/día en discontinuo (Figura 43).



Figura 43. Fotografías sobre la puesta en marcha del sistema de tratamiento

7.12. Plan de maduración y variación de caudales

Se realizó el aforo de caudal para que pasaran 10 L en 22 segundos. La bomba prendía automáticamente en programas de un minuto. Durante ese minuto pasaban 27 L.

Caudal de 100 L/día: **4 programas al día**

Caudal de 200 L/día: **8 programas al día**

Caudal de 400 L/día: **16 programas al día**

En total se hicieron 2 cambios de tipo de agua residual a lo largo del tiempo operado. Se inició con agua de un canalito que pasa a las afueras del IMTA pero comenzó a diluirse la concentración de contaminantes del agua, por lo que se decidió utilizar el agua de la planta de tratamiento de “el Texcal” realizando comisiones dos veces por semana. Después, debido a la dificultad de transportar 400 L diarios desde el Texcal, para el día 175 de operación, con el cambio de caudal, se decidió utilizar el agua de la planta de tratamiento del IMTA. Para lo cual se rehabilitó una línea de alimentación que se había construido desde el principio pero que no había sido utilizada hacia la planta de tratamiento del IMTA. Fue necesario adicionar 0.5 g de azúcar por cada litro de agua residual para aumentar su DQO de 200 mg/L a 600 mg / L aproximadamente. Esta azúcar era adicionada en el primer tanque de la fosa séptica de manera que se diluya en su paso por los tinacos hacia el tinaco de almacenamiento.

7.13. Seguimiento de la evolución del sistema de tratamiento

Con respecto al caudal, se inició con 300 L/día, con agua del canal exterior al IMTA, como se mencionó anteriormente. Esta agua resultó contener concentraciones muy bajas de contaminantes y por lo tanto, poco representativas a el agua residual doméstica propia de la zona de estudio (canal de Sacatierra). Es por esto que se decidió disminuir el caudal a 100 L/día (de acuerdo con los criterios ya mencionados anteriormente) y emplear agua de la planta de tratamiento de “El Texcal”.

Se probó durante dos meses con cada caudal (es decir, con 100, 200 y 400 L/día), reportándose las siguientes observaciones:

Observaciones con un caudal de 100 L/día:

REFERENCIA	OBSERVACION	
03/12/2008	Plantas un poco resentidas por el transplante. El nivel del agua sobresale por lo que para evitar malos olores y proliferación de mosquitos se elevó un poco más el nivel de grava	
10/12/2008	Algunas plantas de ornato han florecido (cuna de moisés, lirio persa). Papiros con poca turgencia (se van de lado)	
18/12/2008	Plantas de ornato en el último tramo del ER algo quemadas (les da el sol directo)	
09/01/2009	Plantas muy saludables. Buena remoción de contaminantes incluido el fosforo. Crecimiento acelerado de papiros. Plantas ornamentales primero algo débiles pero se fueron fortaleciendo poco a poco, sobre todo en zonas favorecidas por las sombras de los papiros y la concentración de contaminantes	
14/01/2009	Se observa diferenciación entre papiros: en la primera parte del ER se observan fuertes, frondosos, saludables y con una alta tasa de crecimiento y reproducción; en la parte media no son tan altos pero se observan desarrollados y saludables; en la última parte se observan pequeños, con follaje poco desarrollado, color amarillento. (Todo esto debido a que la disponibilidad de nutrientes es mayor al inicio del ER)	
20/01/2009	Papiros van ganando lugar a ornamentales, excelente turgencia, mucho rebrote, gran explosiva tasa de crecimiento, dan sombra a las plantas ornamentales; alcatrazes muy saludables, sobre todo en la zona media del ER, con mucha flor.	
03/02/ 2009	Alcatrazes: mucho crecimiento, mucho rebrote, color verde brillante, con flores (sobre todo los de la orilla pegada a los tinacos) Durante el caudal de 100L /día el agua tarda mucho en salir	

Observaciones con un caudal de 200 L /día:

REFERENCIA	OBSERVACION	
10/03/2009	<p>17 /02 Visita Seminario JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón)</p> <p>Trasplante de 4 plantas mas (1 lirio persa, 1alcatraz, 2 platanillos)</p> <p>Lirios persa algo secos. Hoja elegante con hojas muy grandes y frondosas (parte media del entramado, donde se da la mayor sombra). El sistema estuvo sin alimentarse un semana por falta de camioneta para ir al Texcal.</p>	
20/03/2009	<p>Papiros siguen ganando mucho espacio. Las plantas de ornato de la primera parte del ER se ven ahogadas por los papiros. Aves de paraíso con flor. Explosión de Papiros (El sistema se ve muy frondoso pero algo amarillento, muchas cabezas de papiros secas)</p>	
25/03/2009	<p>Poda de papiro</p>	
30/03/2009	<p>Muestreo canal exterior IMTA y Planta de Tratamiento del ITMA</p> <p>Plantas con aspecto muy saludable. En flor alcatraz y cuna.</p>	
03/04/2009	<p>Invasión por hormigas. Gran depredación de plantas de ornato, sobre todo alcatrazes y cunas de moisés. Se les aplicó agua con jabón y ajo, pero no sedia la plaga así que se decidió aplicar Paration Metílico en la parte externa del humedal, es decir, sobre el muro que lo delimita.</p>	
05/04/2009	<p>Las plantas de ornato se ven mas recuperadas. Papiros muy saludables</p>	
07/04/2009	<p>Sistema muy esponjado, muchas cabezas de papiro secas.</p>	

Observaciones con un caudal de 400 L/día

REFERENCIA	OBSERVACION
21/05/2009	Temporada de lluvias. Papiros y plantas de ornato muy favorecidos. Plantas de ornato en la primera parte muy ahogadas por papiros.
27/05/2009	Plantas muy saludables, algunas cabezas de papiro secas.



Figura 44. Fotografías de las condiciones del humedal con un caudal de 400 L/día

De las observaciones anteriores se puede comentar que los papiros fueron muy efectivos para el sistema, tienen una gran capacidad de adaptación y propagación, asimilan eficazmente los contaminantes, benefician dando sombra a las otras plantas ornamentales y son indicadores del grado de contaminación en el agua. Los alcatraces son los siguientes en el orden de eficacia, después la hoja elegante y el jengibre mariposa, posteriormente el ave del paraíso y los platanillos. El lirio persa no pudo adaptarse al medio debido a la exposición constante al sol y el exceso de agua.



Figura 45. Papiros en el sistema de tratamiento

El material filtrante se ha compactado 50 cm y presenta un aspecto algo degradado pero consistente.

7.14. Comentarios sobre el desarrollo del sistema

	COMENTARIO
1	<p>En el primer tanque de la fosa séptica se mantienen condiciones aerobias que van cambiando conforme el agua se traslada hacia el tanque de almacenamiento, donde se dan condiciones anaerobias; es por esto que las poblaciones microbianas deben ser facultativas.</p> <p>En el caso del BF, al no estar aireado, se supone que en la superficie se presentan poblaciones aerobia y conforme aumenta la profundidad las características se vuelven algo anaerobias.</p> <p>Para el caso del ER, en el fondo, se tendrían condiciones anóxicas o anaerobias de no ser por el oxígeno inyectado por las raíces y rizomas de las plantas.</p> <p>Debido a lo anterior los metabolismos y formas de degradar los contaminantes van cambiando a lo largo del proceso</p>
2	<p>Las constantes de diseño empleadas para obtener las áreas necesarias para la remoción de contaminantes fueron obtenidas en climas fríos, por lo que existe cierto grado de sobredimensionamiento.</p>

3	El agua de la Planta de Tratamiento del IMTA es principalmente de los baños y se ve algo involucrada con desechos de laboratorios
4	El proyecto tardó mucho tiempo en concretarse, aproximadamente año y medio. Debido a la dificultad de obtener un terreno para la construcción del prototipo y la firma del convenio entre el IMTA y el CRIM.

7.15. Métodos de análisis

El monitoreo del sistema consistió en realizar análisis una vez por semana de los siguientes parámetros.

Tabla 16. Métodos de análisis

PARÁMETRO	MÉTODO	EQUIPO
pH	Stándar Methods for the Examination of Water and Wastewater 4500 / USA EPA	Potenciómetro HACH Modelo 43800-00
Temperatura	Stándar Methods for the Examination of Water and Wastewater 2550/ USA EPA	Medidor de CND,T y SDT HACH Modelo 44600
Conductividad Eléctrica	Stándar Methods for the Examination of Water and Wastewater 2510/ USA EPA	Medidor de CND,T y SDT HACH Modelo 44600
N-NH₄ / P- PO₄⁻³	Stándar Methods for the Examination of Water and Wastewater 4500 /US EPA	Espectrofotómetro HACH Modelo DR/2400
DQO	Stándar Methods for the Examination of Water and Wastewater 5220H8000 /USA EPA	Digestor HACH Modelo 45600, Espectrofotómetro HACH Modelo DR/2400

Además, para cada caudal se mandaron muestras al Laboratorio de Calidad del Agua en el IMTA para monitorear contaminantes como grasas y aceites, coliformes fecales, fósforo y nitrógeno total, entre otros. Los métodos utilizados fueron los siguientes:

PARÁMETRO	MÉTODO
DBO ₅	NMX-AA-028SCFI-2001
Fósforo total	NMX-AA-029SCFI-2001
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000
Nitrógeno total Kjeldahl	IMTA-CAQAF6-61 NMX-AA-026-SCFI-2001
Coliformes totales y fecales	Membrana filtrante (UFC) NMX-AA-102-SCI-2006

7.16. Resultados Parámetros de Control

7.16.1. Temperatura

La temperatura del sistema es un parámetro de control muy importante que conviene dar seguimiento ya que afecta directamente la velocidad de reacción de los procesos biológicos que se dan lugar en el sistema de saneamiento. A continuación, en las Figuras 46, 47 y 48 se muestran los valores de temperatura monitoreados a través del tiempo de operación del sistema para los caudales de 100, 200 y 400 L/día

- PM1: Primer tanque fosa séptica**
- PM2: Tanque de almacenamiento**
- PM3: Salida del BF (caseta de muestreo)**
- PM4: Primer punto ER**
(1.4m)
- PM5: Segundo punto ER**
(2.8 m)
- PM6: Tercer punto ER**
(6 m)
- PM7: Tanque de almacenamiento a la salida del sistema**

Para un caudal de 100 L/día se obtuvieron los siguientes resultados:

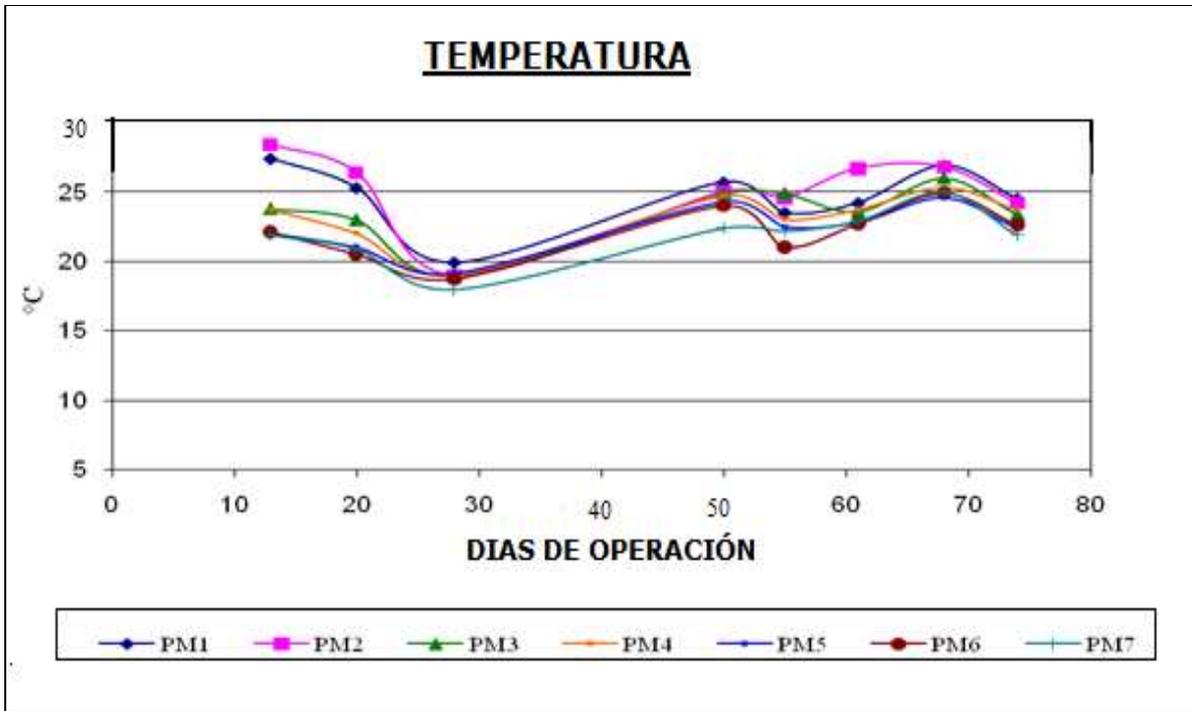


Figura 46. Gráfica de la temperatura del sistema con un caudal de 100 L/día

Con un caudal de 200 L/ día se obtuvieron los siguientes resultados:

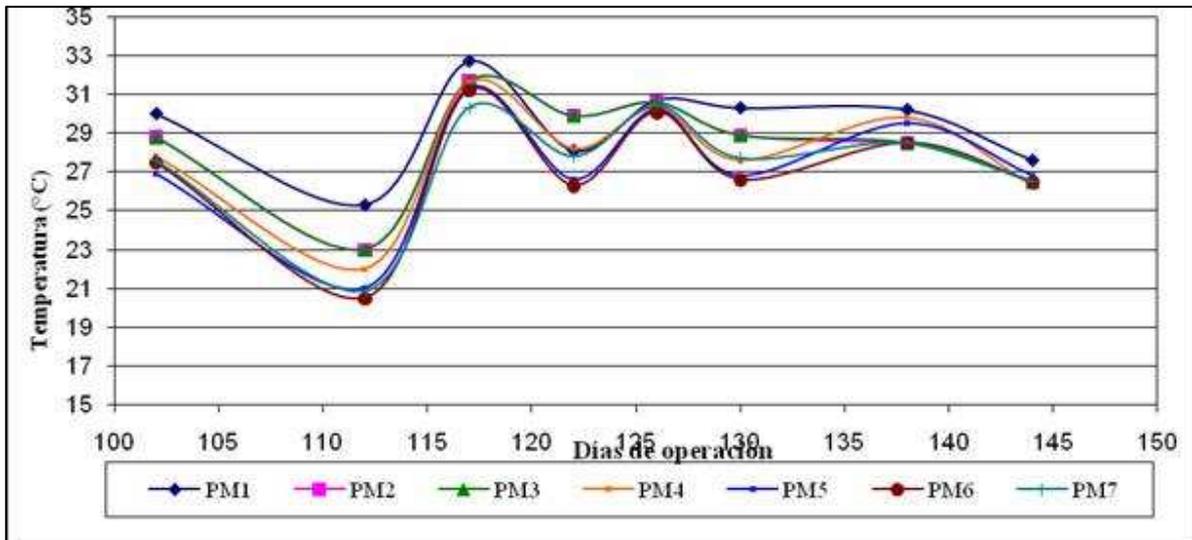


Figura 47. Gráfica de la temperatura del sistema con un caudal de 200 L/día

Por último, para un caudal de 400 L/día se obtuvo lo siguiente:

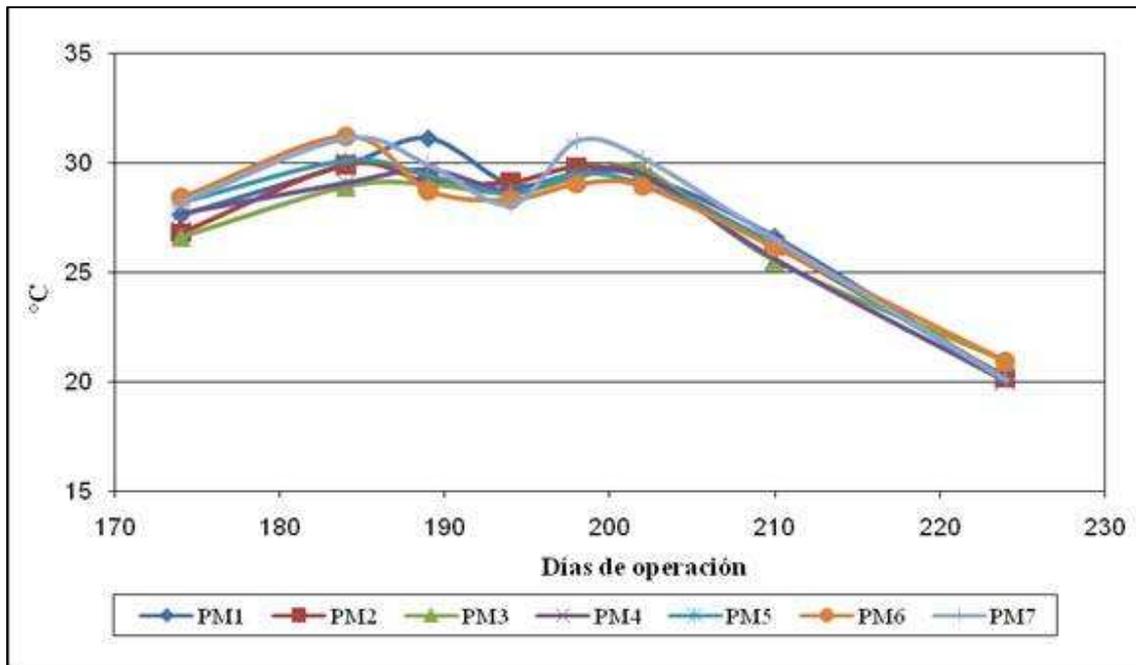


Figura 48. Gráfica de la temperatura del sistema con un caudal de 400L/día

Observando los datos anteriores podemos inferir que la cinética de reacción óptima se presenta en el intervalo de 18 a 30°C. Además podemos darnos cuenta que la temperatura promedio del sistema a lo largo del tiempo monitoreado se encuentra alrededor de los 25°C. En los meses de enero y febrero se presentan valores de 20°C A 25°C a diferencia de los meses marzo y abril donde los valores oscilan entre 22°C a 29°C Esto nos dice que los meses más calurosos son mas benéficos para la optimización de las reacciones de degradación y asimilación de los contaminantes. Esto también indica que la temperatura del sitio donde se implemente esta tecnología tendrá relación directa con el desarrollo y comportamiento del sistema.

Este mismo fenómeno nos corrobora que las ecuaciones de diseño para humedales tipo entramado de raíces se basan en valores diferentes a los presentes en países tropicales o subtropicales, por lo que, es común que se sobredimensione.

En relación con la temperatura también podemos decir que tiene inferencia directa con la elección del material filtrante disponible y la selección de las plantas a usar en el humedal tipo entramado de raíces, además influye directamente con el gradiente entre humedad y temperatura, para dar una mayor o menor evapotranspiración en el sistema, y por lo tanto, afectará directamente al balance hídrico del sistema y por lo tanto a la eficiencia de depuración del efluente.

1.1.1. pH

El pH, término referido a la magnitud de la actividad del ión hidrógeno, tiene repercusiones directas en las reacciones que se dan lugar a lo largo del sistema, tanto por la actividad microbiana albergada en los distintos puntos del sistema, como la conformación de la microfauna y de la actividad de las plantas, ya que, como es bien sabido, cada organismo tiene un intervalo de tolerancia o conveniente valor de pH, afecta la disponibilidad y grado de asimilación de los nutrientes, la facilitación o supresión de reacciones y la velocidad de reacción de dicha actividad. Las aguas residuales crudas, con valores de pH en ocasiones menores a 5 o superiores a 9 representan por si mismas un mecanismo de inhibición para los procesos biológicos de depuración.

En las Figura siguientes se muestran los valores presentados a lo largo del tiempo probado en el sistema para los caudales de 100, 200 y 400 L/día

Con un caudal de 100 L/día se obtuvieron los siguientes resultados:

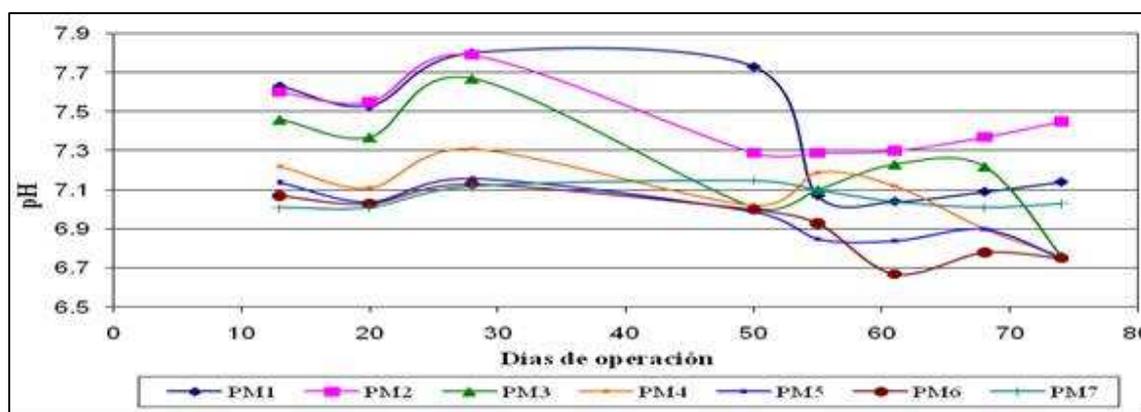


Figura 49. Gráfica de pH con un caudal de 100L/día

Con un caudal de 200L/día se obtuvo:

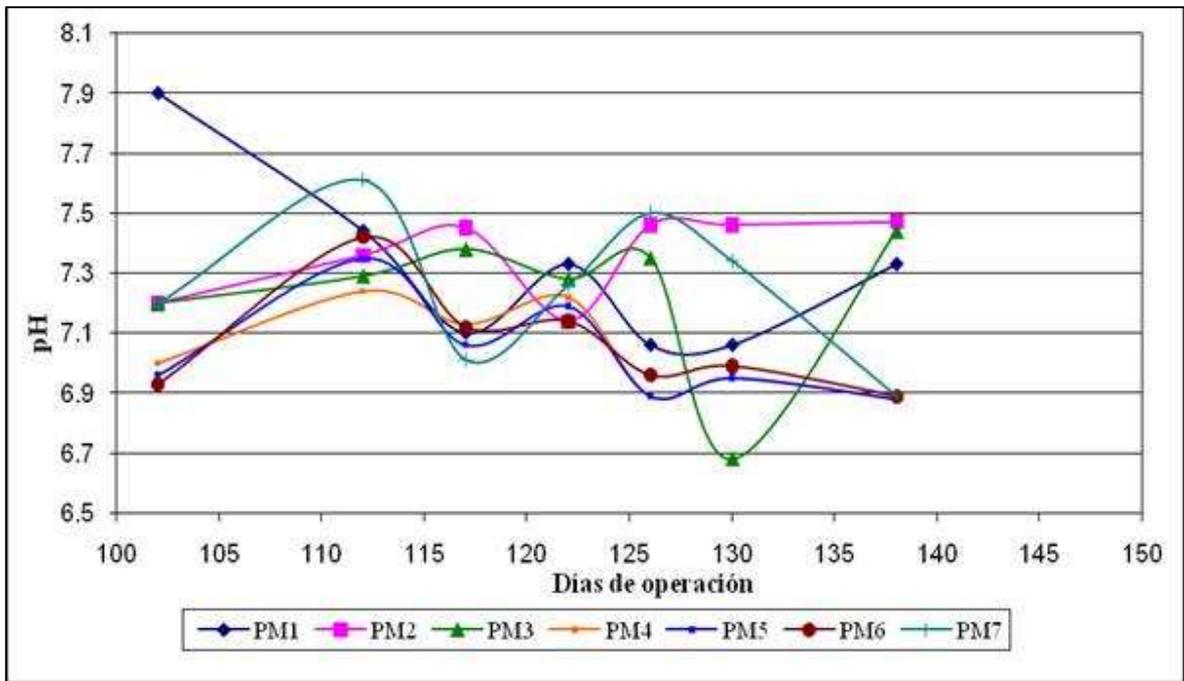


Figura 50 Gráfica de pH con un caudal 200L/día

Y por último, con un caudal de 400 L/día:

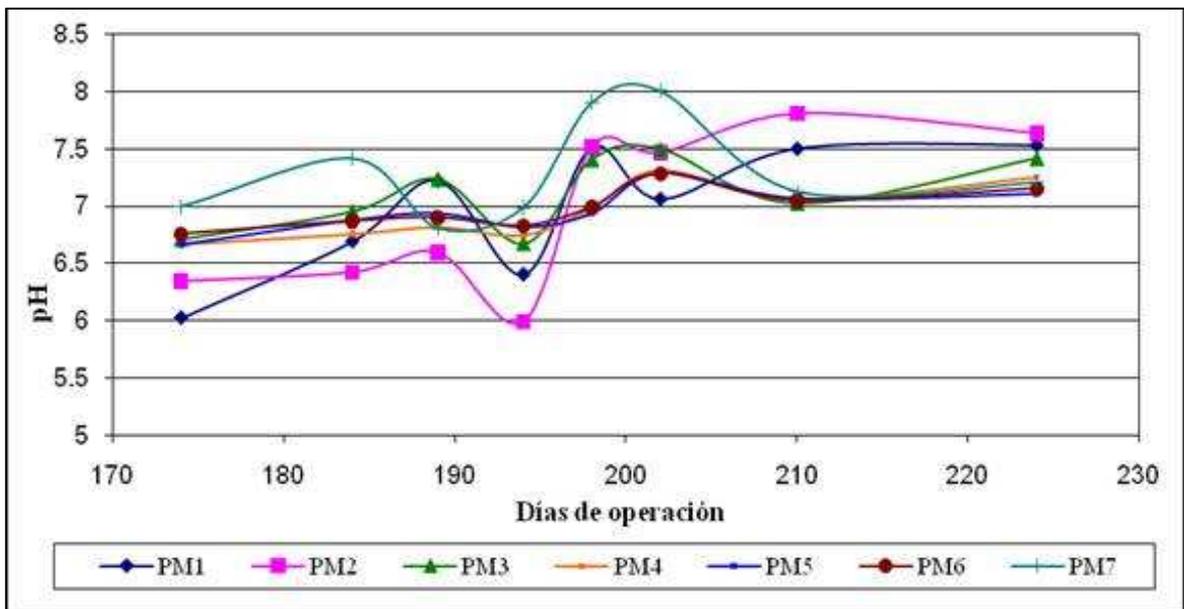
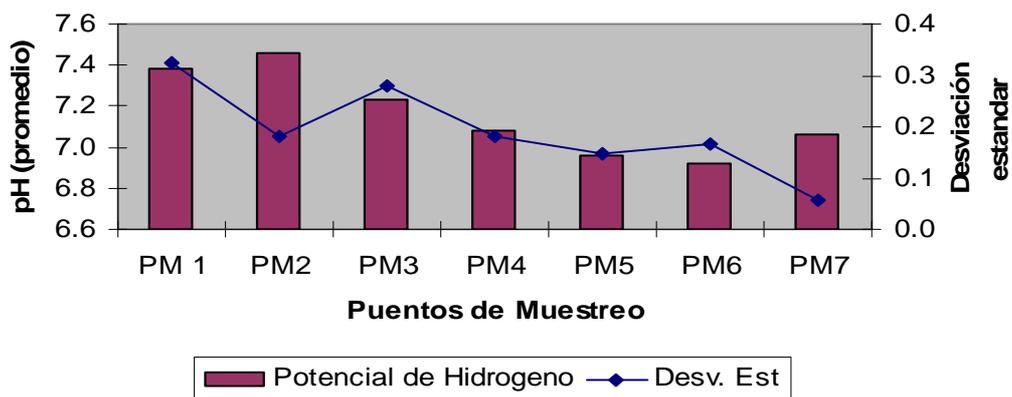


Figura 51. Gráfica de pH con un caudal de 400L/día

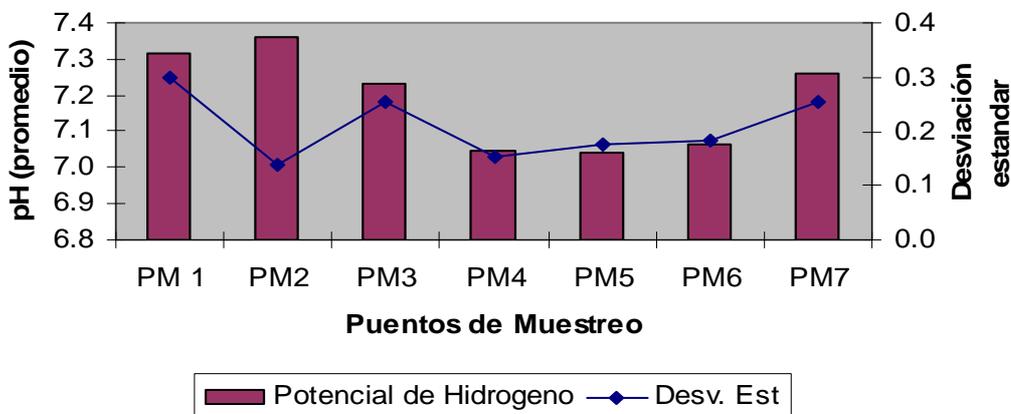
Durante el tiempo de experimentación los valores de pH oscilan entre los 6.8 y 7.5 siendo este un valor adecuado para el desarrollo y la promoción de los procesos biológicos de depuración. Se observa además que los valores más bajos se presentan en tendencia descendente hacia el efluente, es decir, el agua residual cruda tiende a ser básica y conforme se va depurando vuelve a su neutralidad. Los menores datos de pH se dan por los días 50 a 80 en el último periodo con caudal de 100L/día. En general la eficiencia de neutralización del agua residual en los tres caudales probados se mantiene constante.

En las gráficas siguientes se muestra el promedio por punto y la desviación estándar de los valores de pH para cada uno de los caudales probados.

Potencial de Hidrogeno en Q= 100L



Potencial de Hidrogeno en Q= 200L



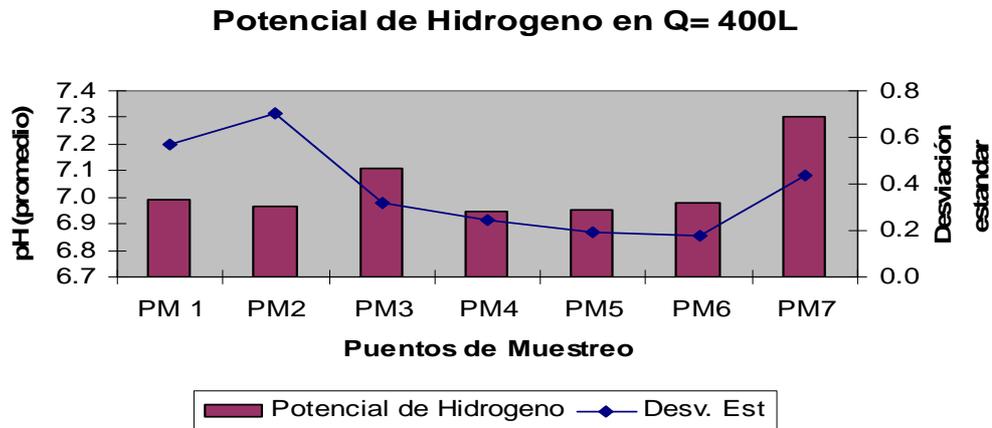


Figura 52. Gráficas sobre el promedio y la desviación estándar del pH

1.1.2. Conductividad eléctrica

La Conductividad eléctrica es un parámetro que nos permite conocer la capacidad de una solución de conducir una corriente eléctrica; este valor está relacionado directamente con los iones contenidos en la solución.

A lo largo del tiempo de experimentación se observó el siguiente comportamiento:

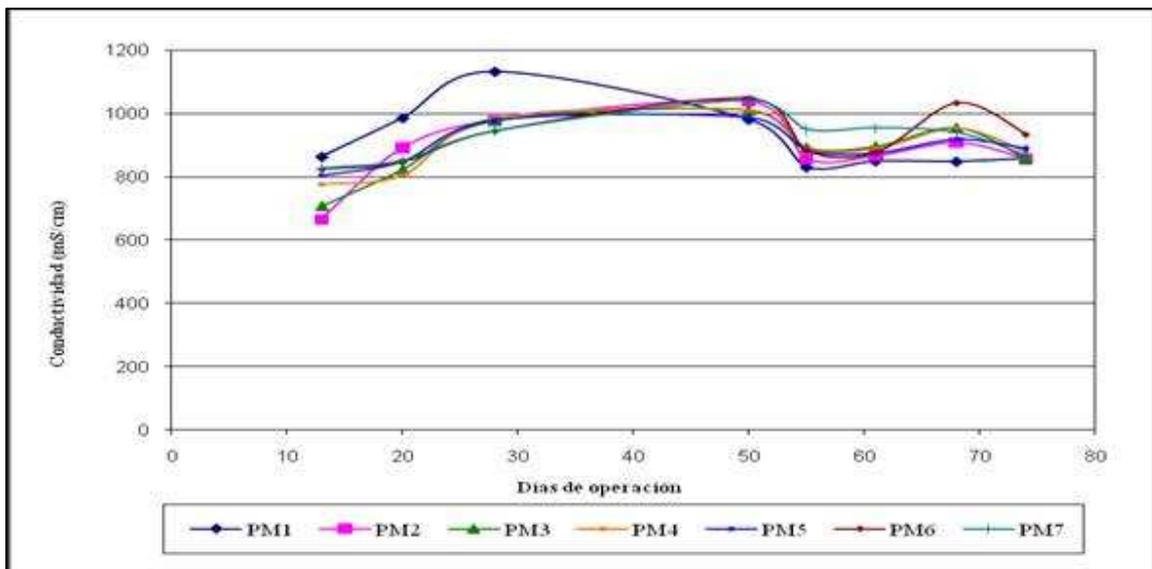


Figura 53. Gráfica sobre la conductividad con un caudal de 100L/día

Con un caudal de 200 L/día se obtuvieron los siguientes resultados:

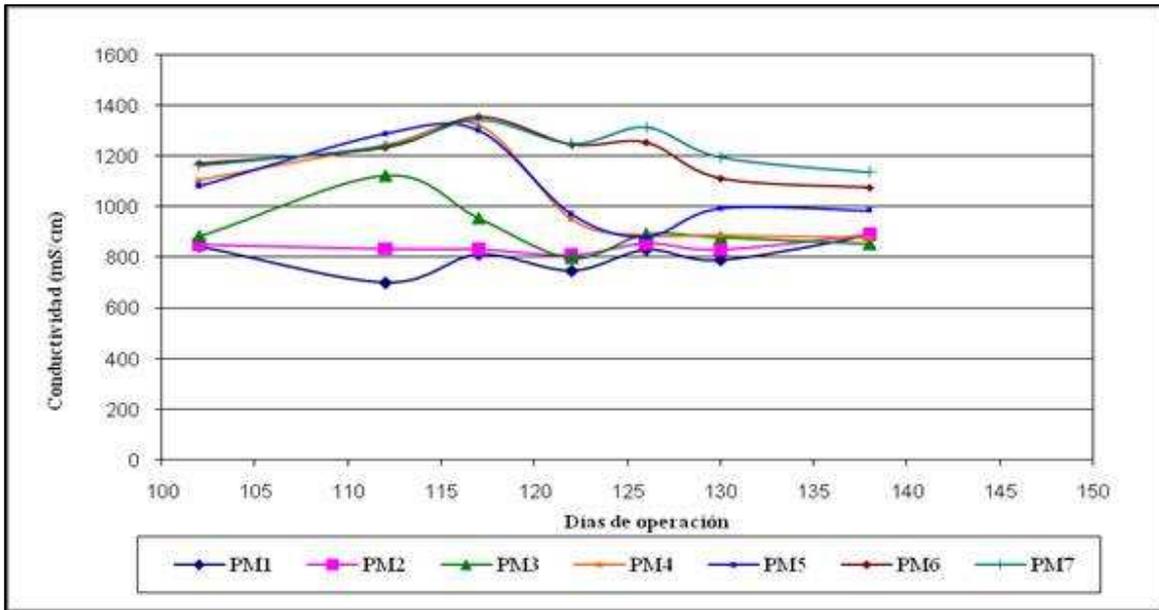


Figura 54 Gráfica sobre la conductividad con un caudal 200L/día

Y por último, con un caudal de 400 L/día:

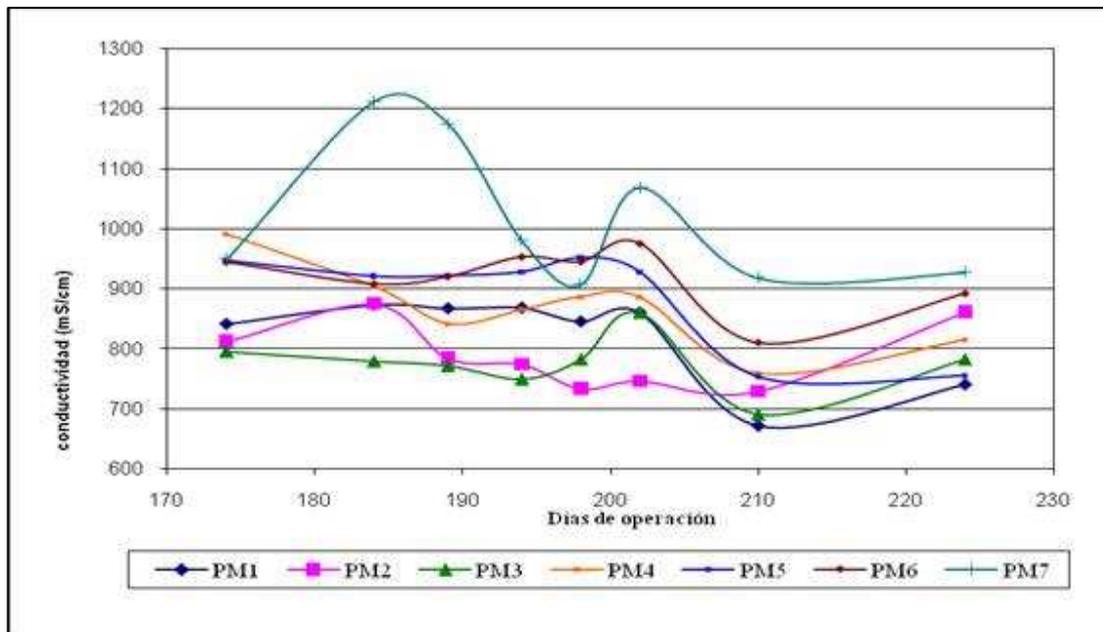


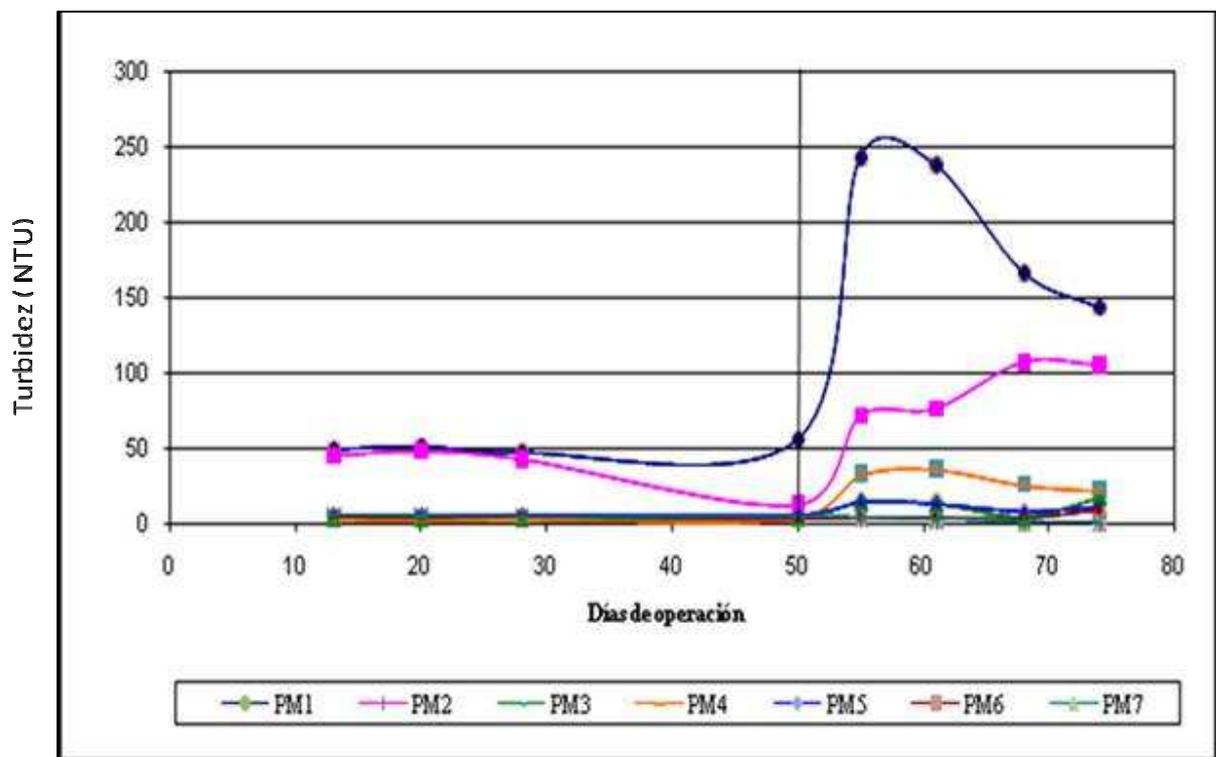
Figura 55. Gráfica de la conductividad con un caudal de 400 L/día

Como podemos observar en las Figuras 53, 54 y 55, la capacidad de conducción del agua disminuye conforme el agua se va depurando, esto es debido a que las sales que conducen la electricidad son removidas poco a poco del sistema. Con un caudal de 200 y 400 L/día, la conductividad aumentó, quizás debido a algún tipo de arrastre de sales, o a que, al irse depurando el agua las sales presentes van recuperando su capacidad de conducción.

1.1.3. Turbidez

La Turbidez está en relación a la capacidad de penetración que tendrá la luz en el agua, y por lo tanto, la capacidad fotosintética de las especies. Además, está en relación directa con la ausencia de materia orgánica y de sólidos suspendidos.

Con un caudal de 100 L/día se obtuvieron los siguientes datos:



-La línea marca cambio de tipo de Agua Residual (del canal a agua del Texcal)

Figura 56. Gráfica de la turbidez con un caudal de 100L/día

Con un caudal de 200 L/día:

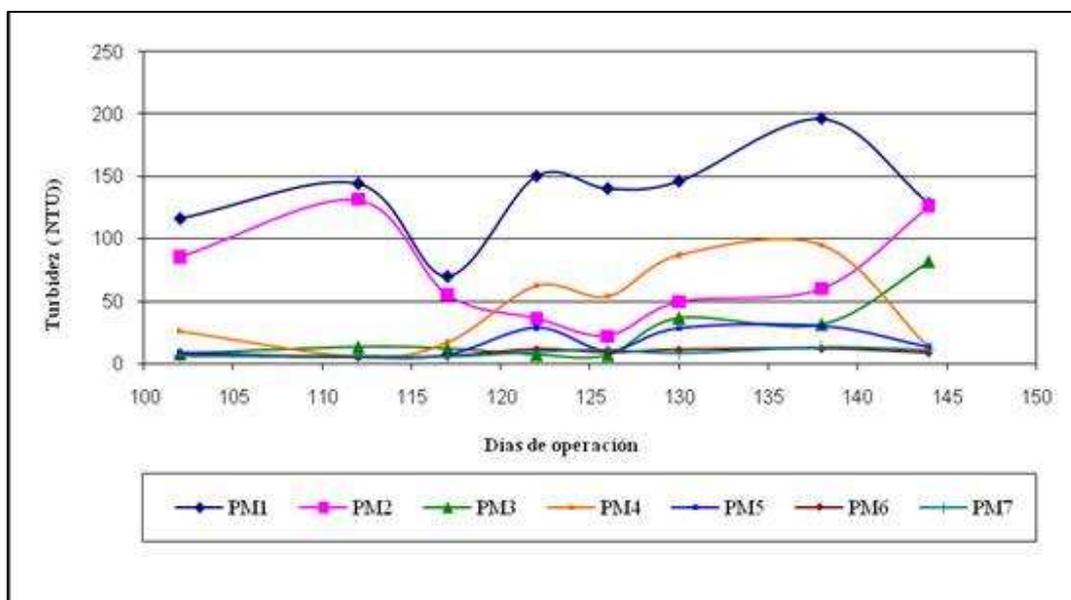


Figura 57. Gráfica de turbidez con un caudal de 200L/día

De las Figuras 56 y 57, se observa que la disminución de la turbidez es muy efectiva en el proceso, a partir del segundo punto de muestreo (tanque de almacenamiento), aumenta un poco a la entrada del entramado pero disminuye a lo largo de éste hasta bajar a valores de aproximadamente 5 NTU.

1.1.4. DQO

El parámetro de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se refiere a la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica y otros compuestos inorgánicos contenidos en el agua residual susceptibles a ser oxidados químicamente por una solución de dicromato de potasio en un medio ácido. En aguas residuales municipales (domésticas) es un buen indicador de la cantidad de materia orgánica disponible para ser oxidada, y por lo tanto, a la cantidad de contaminantes que es necesario remover. En las Figuras 58, 59 y 60 se puede observar el comportamiento de la DQO y el porcentaje de remoción a lo largo del tiempo probado.

Con un caudal de 100 L/día se obtuvo:

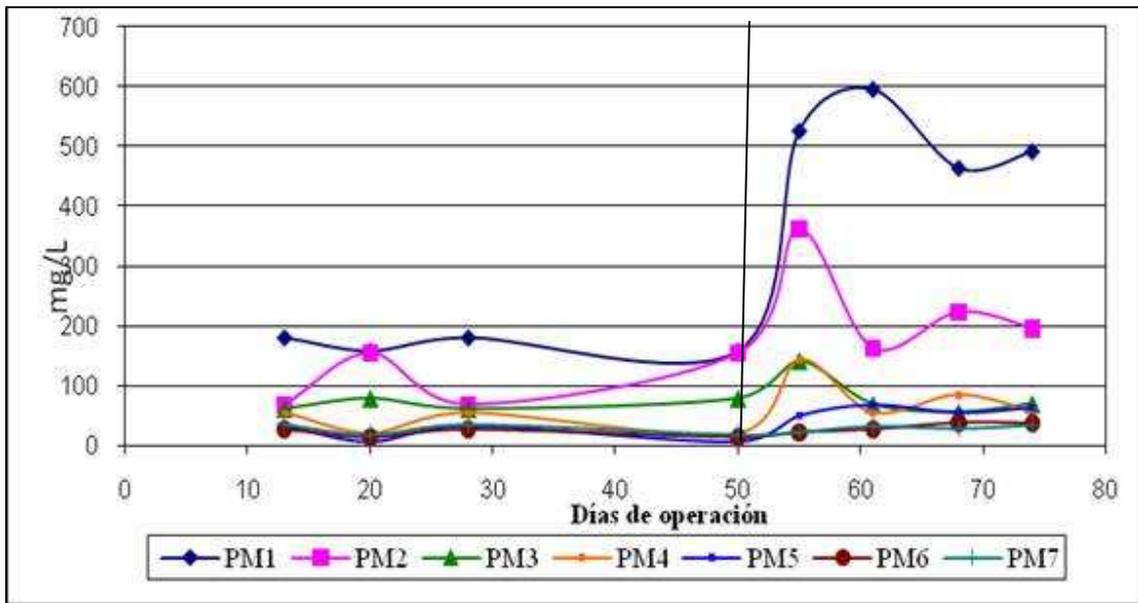


Figura 58 Gráfica de DQO para un caudal de 100L/día

Con un caudal de 200 L/día:

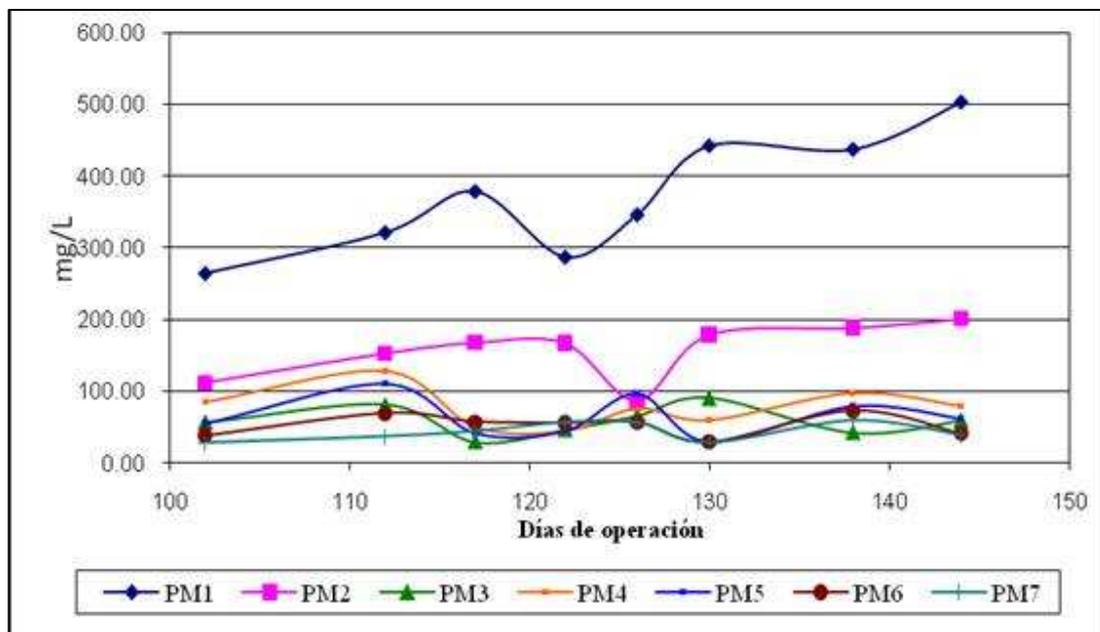


Figura 59. Gráfica de DQO para un caudal de 200L/día

Y por último, para un caudal de 400 L/día:

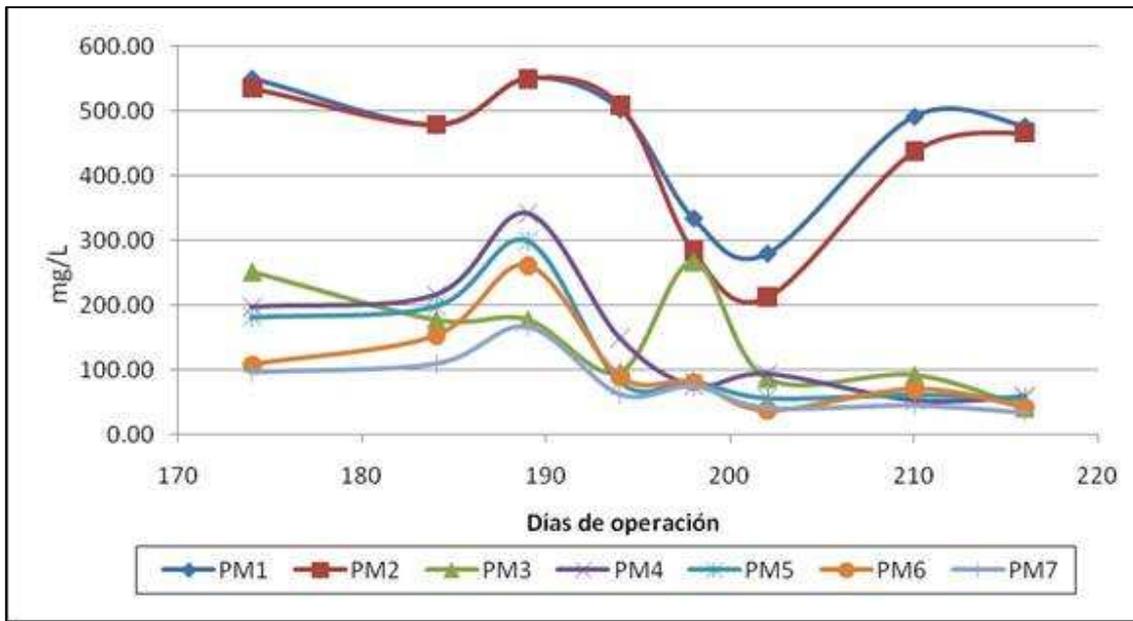


Figura 60. Gráfica de DQO para un caudal de 400L/día

En general se observa una importante remoción de materia orgánica a partir del tanque de almacenamiento y el BF. En el ER se depura hasta salir con concentraciones menores a 60 mg/L.

En el ER la remoción física de la materia orgánica ocurre rápidamente por la sedimentación y por que las partículas quedan atrapadas entre los espacios de la capa de grava. La materia orgánica soluble es removida por el crecimiento microbiológico sobre la superficie del medio y es fijado en las raíces y rizomas. La materia orgánica es la fuente de carbono para poder obtener energía en forma de ATP.

Se puede observar claramente como el valor de DQO aumenta en la tercera semana ya que se cambió de usar agua del canal externo al IMTA por agua de “el Texcal”. Para el día 50, en el mes de enero con un caudal de 100 L/día, se da la mayor remoción.

Tabla 17. Porcentaje de remoción total de DQO del sistema

Tiempo	Fecha	Remoción Total	Promedio
13	03/12/2008	80.33%	89.18% ±6.1%
20	10/12/2008	88.04%	
28	18/12/2008	80.33%	
50	09/01/2009	88.04%	
55	14/01/2009	95.52%	
61	20/01/2009	94.49%	
68	27/01/2009	93.73%	
74	03/02/2009	92.93%	
102	10/03/2009	88.99%	87.66%± 4.2%
112	20/03/2009	88.26%	
117	25/03/2009	88.19%	
122	30/03/2009	80.27%	
126	03/04/2009	83.64%	
130	07/04/2009	93.30%	
138	15/04/2009	86.46%	
144	21/04/2009	92.13%	
174	21/05/2009	82.68%	83.18%±7.8%
184	27/05/2009	77.29%	
189	03/06/2009	69.91%	
194	10/06/2009	87.80%	
198	17/06/2009	77.91%	
202	24/06/2009	85.56%	
210	01/07/2009	91.10%	
216	08/07/2009	93.16%	

Como se puede observar en la Tabla 17 el mayor porcentaje de remoción se obtiene a partir del día 50 y continua hasta el día 74 (es decir, principios de enero hasta principios de febrero). Luego con el cambio de caudal se sigue manteniendo una buena remoción pero disminuye un poco y para finales de abril aumenta.

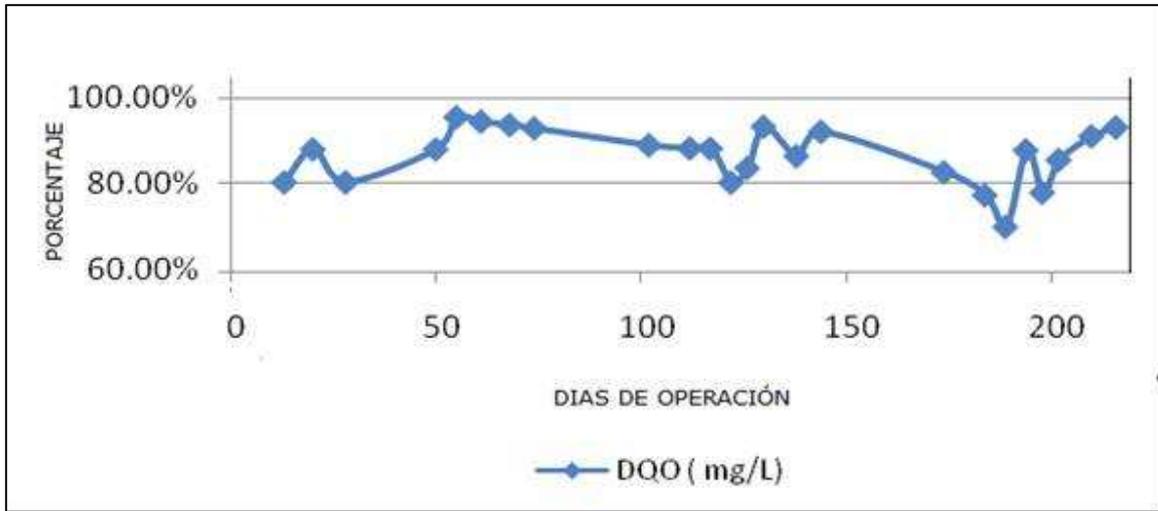


Figura 61. Remoción total de DQO en el sistema

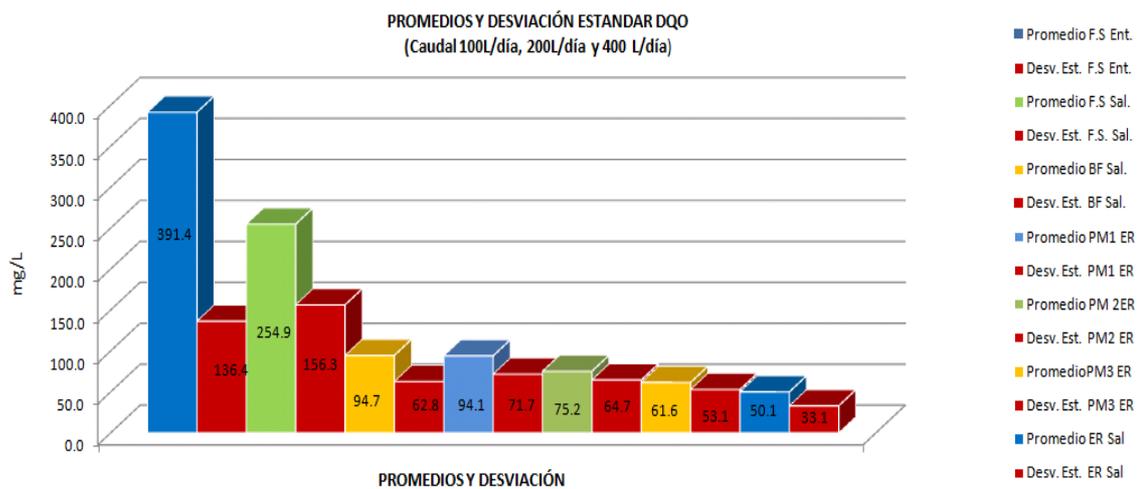


Figura 62. Gráfica promedio de la concentración DQO y desviación estándar

En la Figura 62 se puede observar el valor promedio de DQO en cada uno de los puntos de muestreo y la desviación estándar para cada punto. La desviación estándar nos permite ver que tanto divergen los valores en los tres caudales probados.

En las siguientes Tablas se muestran los promedios y desviaciones estándar en cada uno de los puntos para los tres caudales probados.

Tablas 18. Promedio, desviación estándar y porcentaje de remoción de DQO para los tres caudales probados

Entrada F.S. DQO (mg/L)	Caudal	Promedio	Desv Est	Remoción
	100	344.47	191.12	0.00%
PM 2	100	174.328	93.00249	49.39%
PM3	100	77.2563	27.39363	77.57%
PM4	100	61.5163	39.32969	82.14%
PM5	100	40.2925	23.80387	88.30%
PM 6	100	26.805	9.34867	92.22%
PM7	100	28.64	7.227195	91.69%

Entrada F.S. DQO (mg/L)	Caudal	Promedio	Desv Est	Remoción
	200	372.51	83.32	0.00%
PM 2	200	156.2975	38.6776	58.04%
PM3	200	59.06625	20.0843	84.14%
PM4	200	72.80875	19.07823	80.45%
PM5	200	58.62625	21.43049	84.26%
PM 6	200	53.35875	14.99212	85.68%
PM7	200	44.15	12.17	88.1%

Entrada F.S. DQO (mg/L)	Caudal	Promedio	Desv Est	Remoción
	400	457.27	98.98	0.00%
PM 2	400	434.07625	122.19872	5.07%
PM3	400	147.74875	82.502207	67.69%
PM4	400	147.99625	99.760577	67.63%
PM5	400	126.63875	89.343413	72.31%
PM 6	400	104.745	73.127007	77.09%
PM7	400	77.56	44.48	83.0%

En estas Tablas podemos observar los promedios de concentración de DQO en los puntos de muestreo y como va comportándose la remoción del sistema.

Importancia de la remoción de nutrientes:

El desarrollo de la biomasa en un ecosistema viene limitado, la mayoría de las veces, por la escasez de algunos elementos químicos, que los productores primarios necesitan para desarrollarse y a los que llamamos por ello factores limitantes, como son el N y el P. La contaminación puntual de las aguas, por efluentes urbanos, puede aportar cantidades importantes de esos elementos. El resultado es un aumento de la producción primaria (fotosíntesis) con importantes consecuencias sobre la composición, estructura y dinámica del ecosistema. La eutrofización produce de manera general un aumento de la biomasa y un empobrecimiento de la biodiversidad.

Con la eutrofización empiezan a proliferar algas unicelulares, lo más a menudo algas verdes, dando lugar a un “Boom Algal”. La explosión de algas que acompaña a la primera fase de la eutrofización provoca un enturbiamiento que impide que la luz penetre hasta el fondo del ecosistema. Como consecuencia en el fondo se hace imposible la fotosíntesis, productora de oxígeno libre, a la vez que aumenta la actividad metabólica consumidora de oxígeno de los descomponedores, que empiezan a recibir los excedentes de materia orgánica producidos cerca de la superficie. De esta manera en el fondo se agota pronto el oxígeno por la actividad aerobia y el ambiente se vuelve pronto anaerobio. La radical alteración del ambiente que suponen estos cambios, hace inviable la existencia de la mayoría de las especies que previamente formaban el ecosistema.

Es por esto que es de vital importancia buscar alternativas de tratamiento de las aguas residuales eficientes en la remoción de dichos compuestos.

1.1.5. *Nitrógeno*

El nitrógeno orgánico de las aguas negras es transformado en ion amonio por bacterias y a su vez el ion amonio es transformado por otras bacterias en el ion nitrato.

Las formas iónicas que una raíz puede absorber son el nitrato (NO_4^+) y el amonio (NH_4^+). Como la mayor parte del N del suelo está en forma orgánica es necesaria una actividad microbiológica que lo convierta en amonio o nitrato (*Nitrosomas* y *Nitrobacter*) son los géneros

de bacterias más comunes en esta tarea. Si la planta absorbe nitrato tiene que reducirlo a forma amoniacal antes de que pase a formar parte de los compuestos orgánicos de la planta. El amonio no se acumula sino que se incorpora directamente a compuestos como la glutamina, procedentes del ciclo de Krebs.

La remoción del nitrógeno se da por medio de una nitrificación biológica seguida de una desnitrificación (Figura 63).

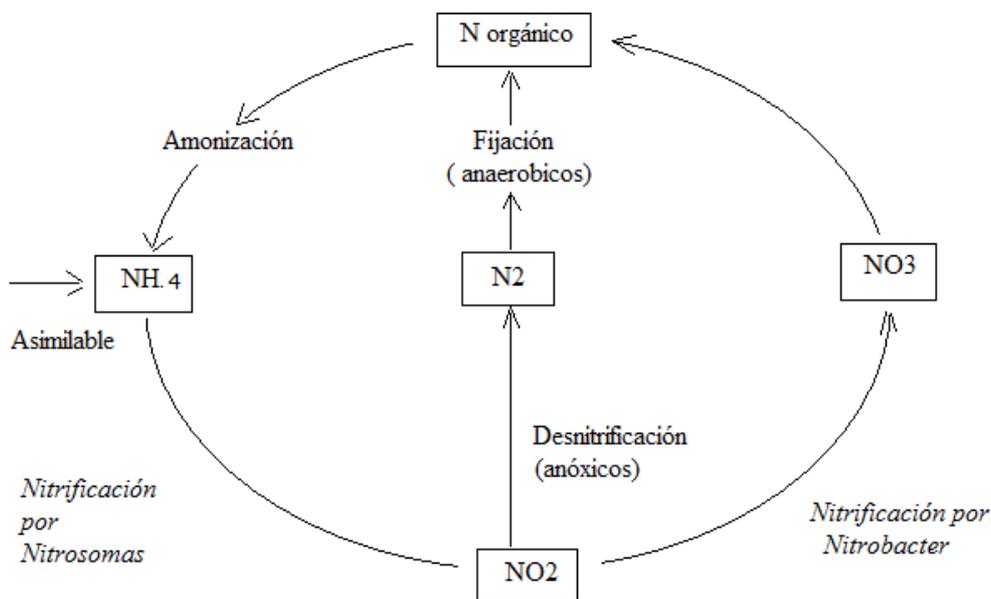


Figura 63. Ciclo del Nitrógeno (Garzón, 2005)

El parámetro conocido como *Nitrógeno Total* está compuesto por nitrógeno amoniacal (NH₄⁺), nitratos (NO₃⁻), nitritos (NO₂⁻) y nitrógeno orgánico.

En el BF se presentan zonas aerobias en la superficie y anaerobias a través del mismo. En presencia de oxígeno molecular (O₂) se da lugar al proceso de nitrificación convirtiendo el nitrógeno amoniacal a nitritos por medio de bacterias del género *Nitrosomas* para luego en la parte interior del BF dar paso al proceso de desnitrificación y con esto lograr una mayor remoción en el efluente del biofiltro.

Por otro lado, en el humedal tipo entramado de raíces o humedal de flujo subsuperficial se presentan también estos procesos ya que las raíces de la plantas transfieren el oxígeno desde la superficie hacia el interior, permitiendo dar lugar al proceso de nitrificación; y con esto aumentar el grado de asimilación del N hacia las plantas ya que los (NO_2^-) y (NO_3^-) son asimilados con mayor facilidad por las plantas (Sawyer, 2005).

N - Nitrógeno Amoniacal (N- NH_4^+)

Se relaciona con la “Edad Relativa” del agua residual ya que en un agua fresca el nitrógeno se encuentra representado principalmente por proteína y urea, que debido a la rápida acción de las bacterias dichas formas cambian rápidamente a NH_4^+ . Además tiene que ver con el grado de asimilación y por lo tanto de depuración de dicho contaminante.

En la conversión biológica de la materia orgánica contenida en el agua residual en tejido celular y productos gaseosos el nitrógeno contenido es convertido a nitrógeno amoniacal (Sawyer,2005). Por lo que para impulsar los procesos depurativos es deseable que el agua residual a tratar contenga nitrógeno en forma de nitrógeno amoniacal.

En las siguientes Tablas se muestran los valores obtenidos de nitrógeno amoniacal obtenidos durante el monitoreo del desarrollo del sistema en cada uno de los caudales probados.

Con un caudal de 100 L/día se obtuvo lo siguiente:

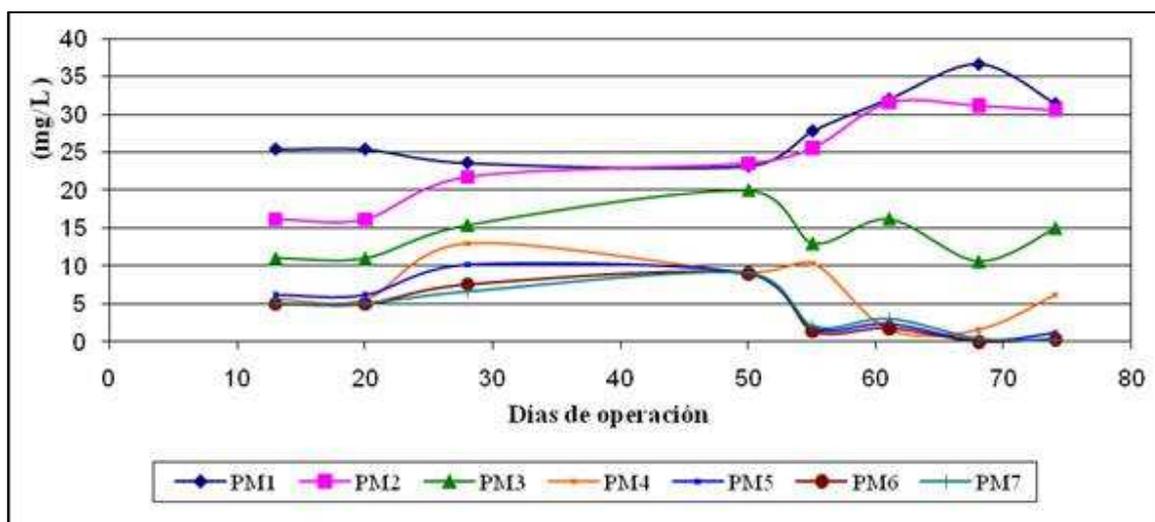


Figura 64. Gráfica de nitrógeno amoniacal con un caudal de 100L/día

Con un caudal de 200 L/día:

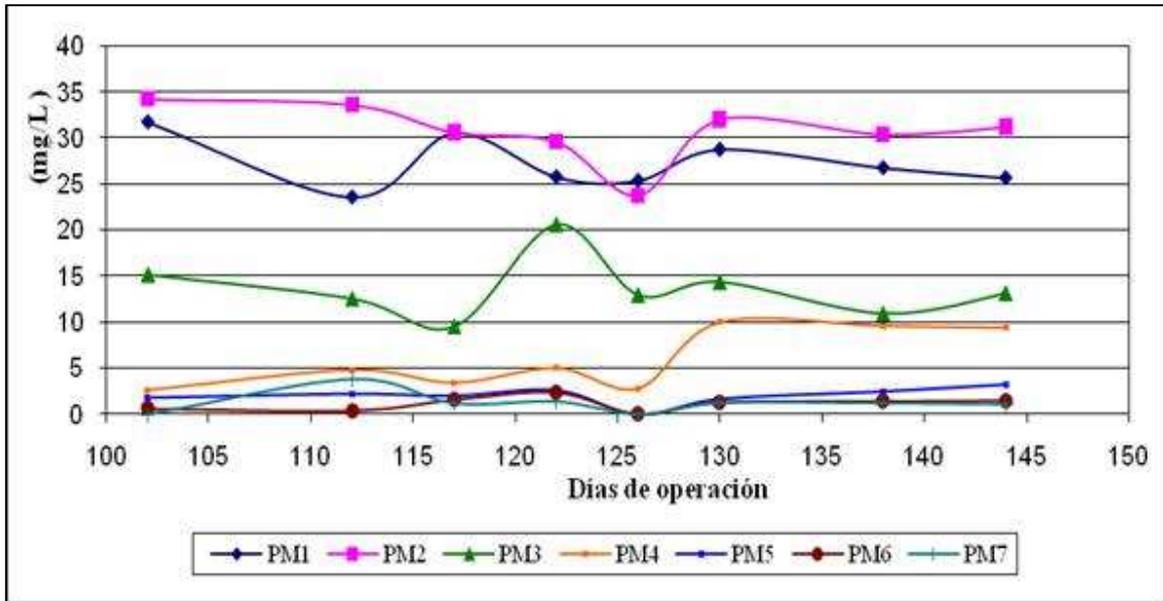


Figura 65. Gráfica de nitrógeno amoniacal con un caudal de 200L/día

Y por último para un caudal de 400 L/día:

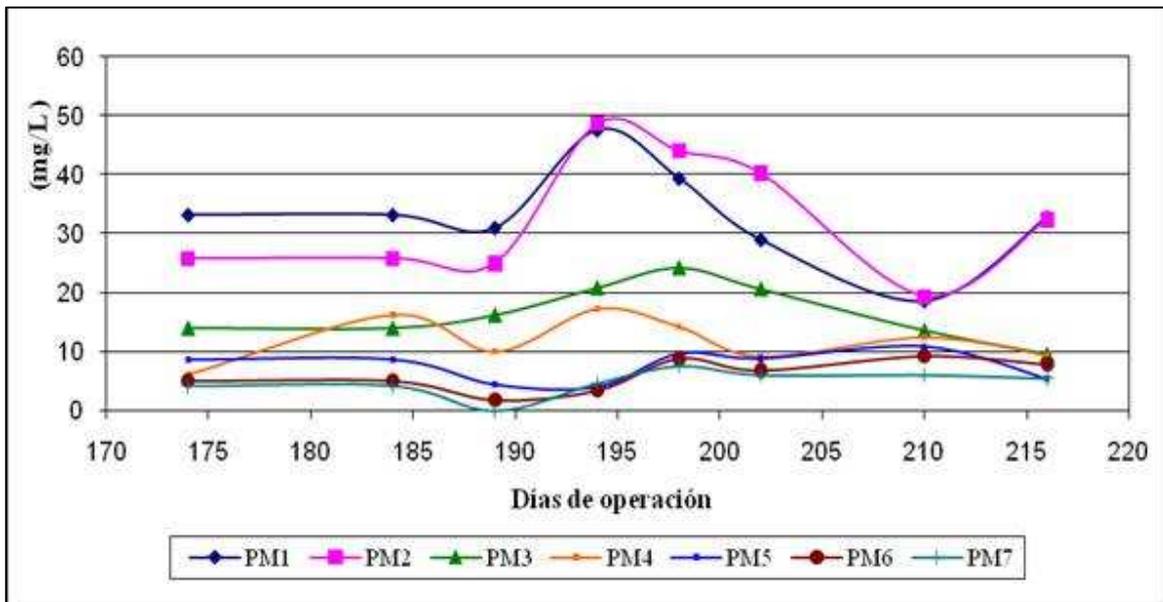


Figura 66. Gráfica de nitrógeno amoniacal para un caudal de 400 L/día

La concentración en un inicio es del orden de 25 a 35 mg/L y va disminuyendo a lo largo del proceso hasta llegar a valores cercanos al cero. (Figuras 64, 65 y 66). En general se tiene una importante remoción a partir del biofiltro, disminuyendo notablemente para el primer punto de muestreo. De igual forma con el cambio de agua a agua de “el Texcal” se elevan bastante los valores y el sistema se vuelve más eficiente.

% De Remoción Total del Sistema:

En la Tabla 19 podemos observar como el biofiltro remueve gran cantidad del nutriente y a lo largo del entramado se obtienen eficiencias de remoción muy elevadas, sobre todo en los últimos puntos de muestreo del entramado.

Tabla 19. Remoción total de nitrógeno amoniacal

Tiempo	Fecha	Remoción Total	Promedio
13	03/12/2008	80.31%	
20	10/12/2008	80.31%	
28	18/12/2008	72.03%	
50	09/01/2009	61.21%	84.45%
55	14/01/2009	92.81%	±13.46
61	20/01/2009	90.63%	
68	27/01/2009	98.91%	
74	03/02/2009	99.36%	
102	10/03/2009	100.00%	
112	20/03/2009	83.90%	
117	25/03/2009	96.08%	
122	30/03/2009	94.57%	95.27%
126	03/04/2009	99.92%	±5.19
130	07/04/2009	95.66%	
138	15/04/2009	95.45%	
144	21/04/2009	96.59%	
174	21/05/2009	87.35%	
184	27/05/2009	87.35%	
189	03/06/2009	100.00%	
194	10/06/2009	90.34%	84.57%
198	17/06/2009	80.96%	±9.34
202	24/06/2009	79.31%	
210	01/07/2009	67.74%	
216	08/07/2009	83.54%	

Las mayores remociones se presentaron con el cambio de caudal a 200 L/día ya que para ese momento el sistema estaba bastante maduro y el follaje bastante desarrollado. La tasa de crecimiento de los papiros aumento bastante y por lo tanto su demanda hacia los nutrientes. La remoción se logra casi en un 100% (Figura 67 y 68).



Figura 67. Remoción total del nitrógeno amoniacal

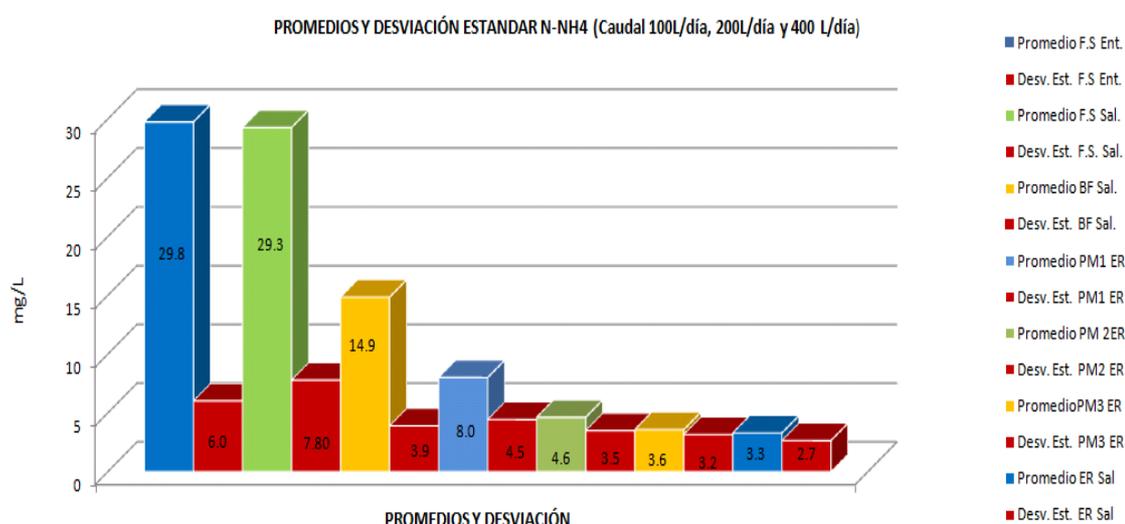


Figura 68. Gráfica promedio de la concentración de N-NH4 y desviación estándar

Tablas 20. Promedio, desviación estándar y % remoción. N-NH₄

		Caudal	Promedio	Desv Est	Remoción
	Entrada F.S. NH4 (mg/L)	100	28.18	4.74	0.00%
	PM 2	100	24.6	6.3191319	12.69%
	PM3	100	14.025	3.2591629	50.22%
	PM4	100	6.65	4.0408627	76.40%
	PM5	100	4.65	3.7686678	83.50%
	PM 6	100	3.775	3.383046	86.60%
	PM7	100	3.9	3.0724583	86.16%

		Caudal	Promedio	Desv Est	Remoción
	Entrada F.S. NH4 (mg/L)	200	28.03	3.07	0.00%
	PM 2	200	30.6	3.189268	-9.19%
	PM3	200	13.925	3.32598	50.31%
	PM4	200	5.55	2.887906	80.20%
	PM5	200	1.74375	0.826264	93.78%
	PM 6	200	1.01875	0.795747	96.36%
	PM7	200	1.27	1.17	95.5%

		Caudal	Promedio	Desv Est	Remoción
	Entrada F.S. NH4 (mg/L)	400	33.10	8.29	0.00%
	PM 2	400	32.65	10.475959	1.36%
	PM3	400	16.625	4.8266374	49.77%
	PM4	400	11.85	3.8123858	64.20%
	PM5	400	7.525	2.554408	77.27%
	PM 6	400	5.975	2.6282803	81.95%
	PM7	400	4.74	2.21	85.7%

En las Tablas anteriores podemos observar cómo se comporta el sistema con relación a la remoción de N-NH₄, siendo en los tres caudales mayor al 80%.

1.1.6. Fósforo

La remoción de fósforo en los biofiltros a nivel laboratorio probados y en algunos humedales no es muy eficaz debido a las limitadas oportunidades de contacto entre el agua residual y el medio de soporte, ya que la remoción del fósforo tiene mucho que ver con la capacidad de retención del medio de soporte. Los mecanismos principales para la remoción de fósforo son la captación por parte de las plantas y la retención en el terreno. Se da por medio de la grava y por los óxidos de hierro y aluminio asociados en este medio, la remoción de dicho elemento está en proporción directa con el tiempo de residencia hidráulico (TRH) (Rivas, 2005).

Los elementos C-N-P siempre se presentan relacionados en proporciones 100: 5:1, es decir, los microorganismos o descomponedores para poder degradar 100 partes de carbono requieren 5 partes de nitrógeno y 1 parte de fósforo.

Como la deposición de sedimentos es la principal vía de eliminación del fósforo, la masa removida es función del área superficial del humedal y de la concentración de fósforo en el agua residual.

No es completamente efectiva ni en los humedales de flujo vertical o superficial. Durante el

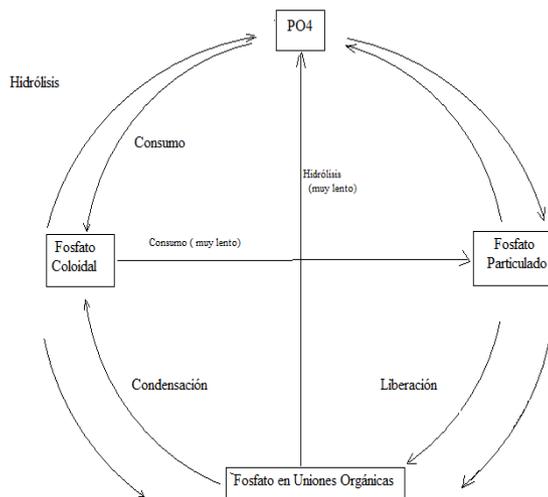


Figura 69 .Ciclo del fósforo

ocurre vía sedimentación particulada y precipitación química principalmente. Estos sedimentos se acumulan como turba dentro de la columna de agua de los humedales.

primer año de operación los rendimientos pueden ser excelentes, especialmente en sistemas superficiales, debido a la adsorción del recién expuesto suelo del fondo del humedal. La remoción de fósforo a largo plazo, sin embargo, puede ocurrir solo a través de la acumulación de sedimentos a largo plazo. La deposición de estos sedimentos

El fósforo puede entrar al sistema como ortofosfato o como fosfato orgánico (Kayombo, 2006). El fósforo orgánico puede liberarse como fósforo soluble con la degradación de la materia orgánica. Su remoción puede seguir distintas rutas: puede ser asimilado por las plantas o inmobilizado por los microorganismos o ser retenido por el sustrato y precipitado (Tousignant, 1999; Kayombo., 2006). El factor que juega un papel clave y además es el más fácil de controlar, es el sustrato; el de mayor capacidad para enlazar el fósforo es el más efectivo). Esto es debido a que los procesos de adsorción y precipitación dependen principalmente del contenido de minerales con iones precipitables con el fósforo como el hierro (Fe), aluminio (Al), calcio (Ca), y magnesio (Mg) y del área superficial, definida por el tamaño del grano (Prochaska y Zoubolis, 2006, Arias,2000) Otros factores determinantes para la remoción de los fosfatos por adsorción son el pH del sustrato y del agua residual, la carga hidráulica y el tiempo de retención Por otra parte, como los sitios de adsorción en el sustrato son finitos, se llega a la saturación del mismo; por eso al inicio de la operación un humedal puede remover eficientemente el fósforo pero a la larga su eficiencia disminuye. La asimilación de fósforo por las plantas es, generalmente menos del 5% del total que ingresa (Vohla., 2005).

El método más común de tratamiento de aguas negras para la eliminación de los iones fosfato se basa en la adición de compuestos químicos que forman precipitados sólidos con los fosfatos. Mediante el proceso de floculación se hace que los precipitados de los fosfatos se sedimenten y luego son eliminados por medio del proceso de filtración. También para eliminar los fosfatos del agua se está investigando su eliminación mediante el tratamiento biológico de intercambio selectivo de iones.

Como se observa en la Figura 69 la mayor parte del tiempo el fosforo se encuentra en estado no disponible para las plantas. Es por esto que para su remoción en proporción con el fosforo consumido, requerirá grandes extensiones, una elevada tasa de crecimiento de las plantas y una acelerada actividad microbiana.

Debido a su naturaleza, el fosforo se va acumulando en las gravas, que son las que retienen el mayor porcentaje.

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos a lo largo del tiempo de operación.

Con un caudal de 100 L /día se obtuvieron los siguientes resultados:

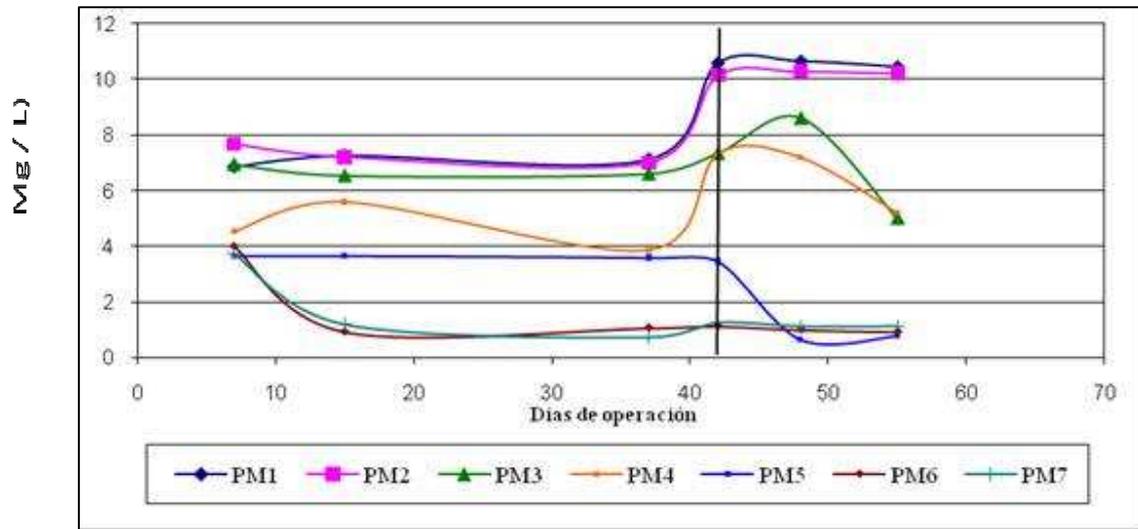


Figura 70. Gráfica de P-PO₄ para un caudal 100L/día

Con un caudal de 200 L/día:

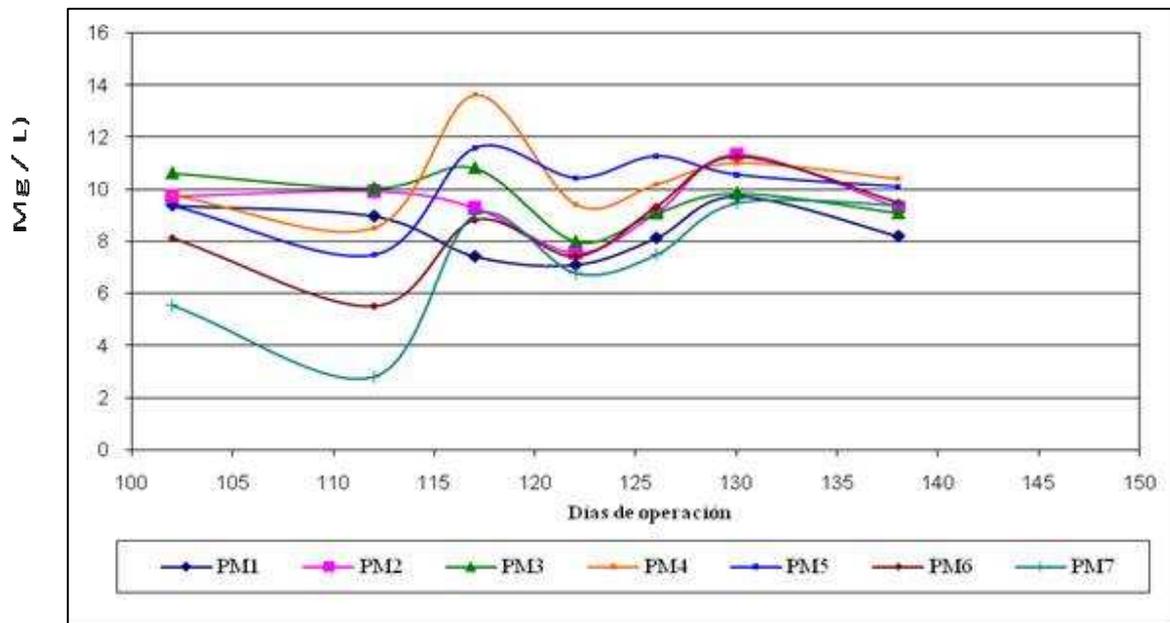


Figura 71. Gráfica de P-PO₄ para un caudal 200L/día

Por último para un caudal de 400 L/día:

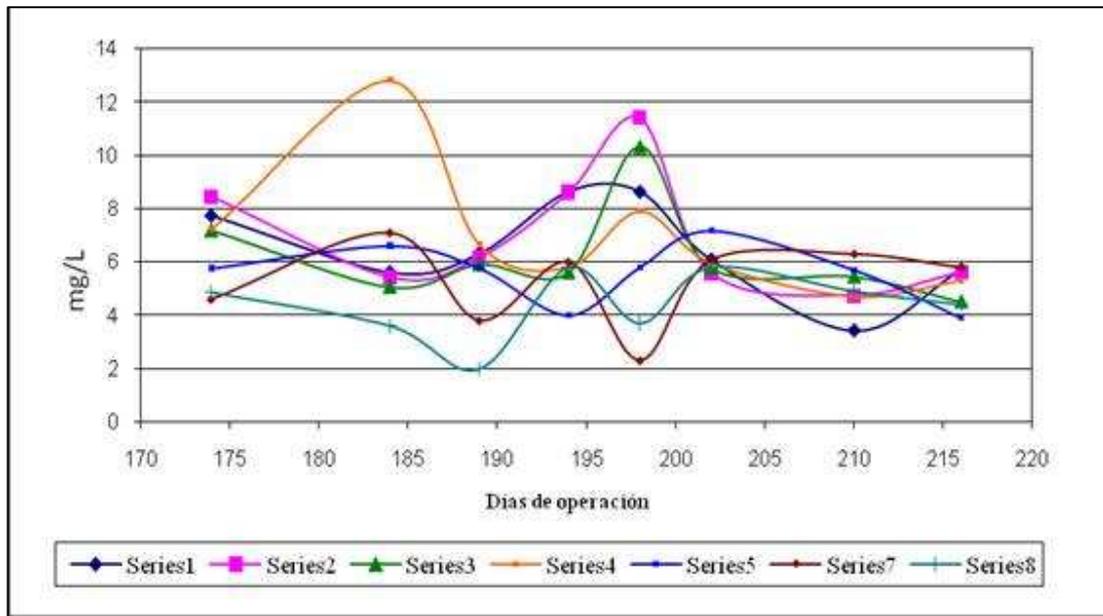


Figura 72 Gráfica de P-PO₄ para un caudal 400L/día

Como podemos observar en las Figuras 70, 71 y 72 se obtienen elevados porcentajes de remoción en la primera etapa de remoción con un caudal de 100 L/día obteniéndose concentraciones menores a 2 mg/L. Con el cambio de caudal a 200 L el sistema comienza a saturarse.

De la Tabla 21 podemos observar como el biofiltro remueve muy poco fósforo. Las mayores remociones se dan en el primer y último tramo del ER.

Tabla 21. Por ciento de remoción total de P-PO₄ del sistema

Tiempo	Fecha	Remoción Total	Promedio
13	03/12/2008	54.58%	
20	10/12/2008	86.49%	
28	18/12/2008	45.63%	
50	09/01/2009	83.49%	78.31%
55	14/01/2009	89.72%	±17.69
61	20/01/2009	88.05%	
68	27/01/2009	89.38%	
74	03/02/2009	89.17%	
102	10/03/2009	54.01%	
112	20/03/2009	40.96%	
117	25/03/2009	68.57%	
122	30/03/2009	-21.55%	25.69%
126	03/04/2009	4.50%	±31.45
130	07/04/2009	7.87%	
138	15/04/2009	2.63%	
144	21/04/2009	48.53%	
174	21/05/2009	37.21%	
184	27/05/2009	35.71%	
189	03/06/2009	68.57%	
194	10/06/2009	32.87%	26.86%
198	17/06/2009	57.18%	±34.70
202	24/06/2009	4.61%	
210	01/07/2009	-44.12%	
216	08/07/2009	22.81%	

Observamos que las mayores remociones se presentan en los días 50 a 74, donde al parecer el sistema en general trabaja en sus óptimas condiciones. A partir de la primera semana del cambio de caudal esa remoción se ve disminuida considerablemente.

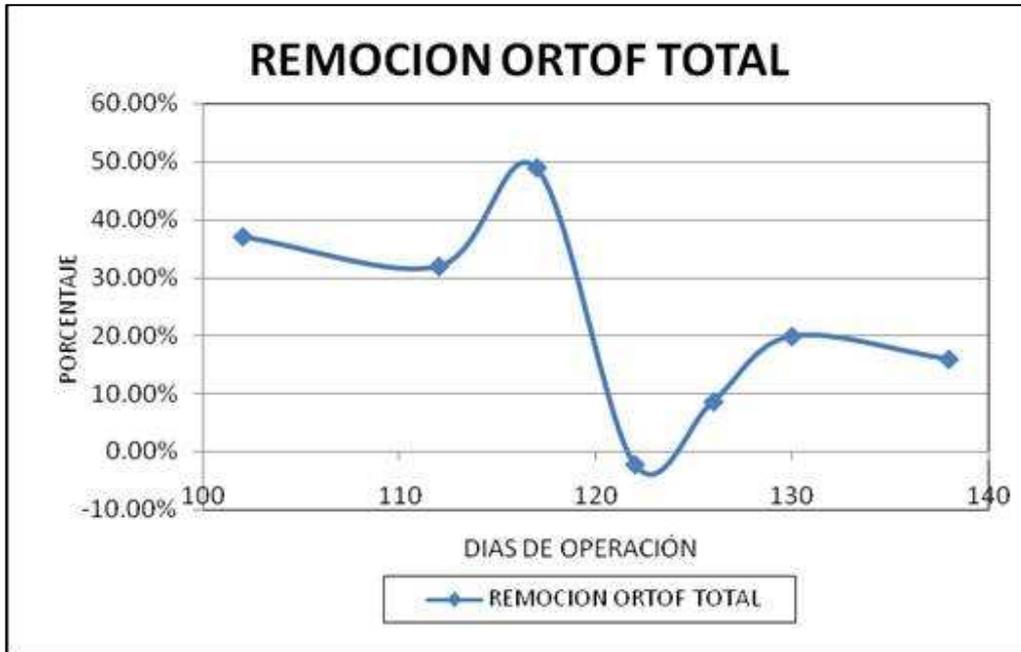


Figura 73. Remoción total P-PO₄ en el sistema

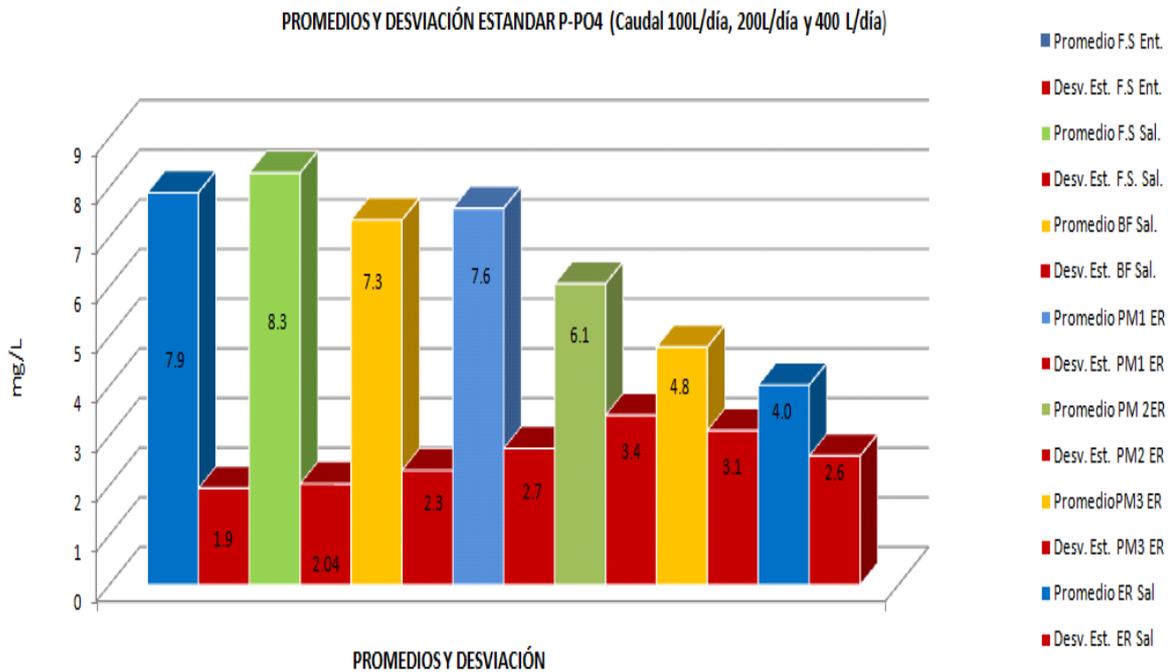


Figura 74. Gráfica Promedio concentración P-PO₄ y desviación estándar

Tablas 22. Promedio, desviación estándar y porcentaje de remoción de P-PO₄

	Caudal	Promedio	Desv Est	Remoción
Entrada F.S. PO4 (mg/L)	100	8.52	2.22	0.00%
PM 2	100	8.5708333	1.8440326	-0.64%
PM3	100	6.1083333	1.7638117	28.28%
PM4	100	5.4	1.2808727	36.59%
PM5	100	2.5191667	1.4575754	70.42%
PM 6	100	1.3458333	1.0773185	84.20%
PM7	100	1.3745833	0.9779277	83.86%

	Caudal	Promedio	Desv Est	Remoción
Entrada F.S. PO4 (mg/L)	200	8.66	1.02	0.00%
PM 2	200	9.3275	1.325279	-7.70%
PM3	200	9.721	1.184289	-12.24%
PM4	200	10.315	1.549942	-19.10%
PM5	200	10.088	1.340076	-16.48%
PM 6	200	7.7745	2.041485	10.24%
PM7	200	6.32	2.32	27.0%

	Caudal	Promedio	Desv Est	Remoción
Entrada F.S. PO4 (mg/L)	400	6.51	1.77	0.00%
PM 2	400	6.9875	2.282278	-7.29%
PM3	400	6.215	1.819843	4.57%
PM4	400	7.04125	2.5448628	-8.12%
PM5	400	5.58625	1.134812	14.22%
PM 6	400	5.2475	1.5723663	19.42%
PM7	400	4.38	1.27	32.7%

En la Tabla 22 podemos observar que la eficiencia de remoción del sistema comienza a disminuir en el segundo caudal probado (200 L/día).

7.16.2. Microbiológicos

Coliformes fecales

Indicadores de contaminación fecal. Se analizaron enviando muestras de cada uno de los puntos al Laboratorio de Calidad del IMTA. La Tabla 22 presenta dicho resultados. Los humedales son efectivos para la remoción de patógenos de las aguas residuales (Zdragas, 2006), registrándose remociones de coliformes totales y fecales generalmente entre 95 a 99% y en algunos casos superiores al 99% de coliformes totales. Los mecanismos que participan son muy diversos. Uno de ellos es la sedimentación, sobre todo para los patógenos de gran tamaño como *Giardia* y *Cryptosporidium* (Karim., 2004), los organismos más pequeños como los coliformes o virus se adhieren sobre partículas “acarreadoras” para que puedan sedimentar. Otro de los mecanismos es la adsorción, que tiene lugar como resultado de la interacción entre la superficie del sustrato y los polímeros bacterianos. La depredación también juega un papel importante encontraron que la depredación por protozoarios ciliados y flagelados abundantes en condiciones aerobias, fue uno de los mecanismo más importante para la remoción de *E. coli* en humedales subsuperficiales de flujo vertical (Sttot., 2001) encontraron que los oocitos de *Cryptosporidium parvum* fueron ingeridos en forma efectiva por protozoarios ciliados; en general, los protozoarios se desarrollan mejor en condiciones aerobias (Decamp y Warren, 2000). La muerte natural ocurre debido a que las condiciones dentro del humedal son desfavorables a la mayoría de los patógenos entéricos y coliformes; por ejemplo, se ha demostrado que las plantas emergentes, como la *Phragmites australis* liberan exudados de sus raíces que son tóxicas a un amplio rango de bacterias, incluyendo la *E. Coli*; adicionalmente algunas bacterias como las *Pseudomonas* con propiedades antibióticas, se desarrollan en los rizomas de las macrófitas. También la escasez de nutrientes y competencia con otros microorganismos pueden participar en la mortandad de los patógenos (Edwards., 2005).

7.17. Resultados análisis de Laboratorio de Calidad del Agua IMTA

En las Tablas 22, 23 y 24 observamos que para el primer caudal probado se obtuvieron remociones muy favorables para cada uno de los parámetros probados. Siendo para el caso de los Coliformes Fecales una remoción cercana al 100%.

PARÁMETRO	Agua Residual Cruda	Salida Fosa Séptica	Salida BF	ER-PM1	ER-PM2	ER-PM3	Salida Sistema		Límite de Descarga según NOM-001-SEMARNAT-1996		
									% de Remoción	A Uso en Riego Agrícola	B Uso Público Urbano
G y A (mg/L)	43.4	7.50	<4.97	<4.97	<4.97	<4.97	<4.97	88.5	15	15	15
DB O ₅ (mg/L)	146	70	33	11	12	4.6	1.2	99.2	150	75	30
N_Total (mg/L)	33.2	35.2	10.3	2.46	2.17	<1.20	<1.20	96.4	40	40	15
P_Total (mg/L)	15	8	8.14	5.60	3.40	<0.37	<0.37	97.5	20	20	5
Coliform. Fecales (NMP/100MI)	4.6 X 10 ⁶	2.4 X 10 ⁵	1.1 X 10 ⁴	1.5 X 10 ³	1.5 X 10 ²	43	43	99.99	1000	1000	1000

Tabla 22 Valores parámetros laboratorio con un caudal de 100L/día. Resultados Laboratorio de Calidad del Agua- IMTA 25 DE Febrero (Día 96 de operación)

PARÁMETRO	Agua Residual Cruda	Salida Fosa Séptica	Salida BF	ER-PM1	ER-PM2	ER-PM3	Salida Sistema		Límite de Descarga según NOM-001-SEMARNAT-1996		
									% de Remoción	A Uso en Riego Agrícola	B Uso Público Urbano
G y A (mg/L)	57.7	4.89	<4.80	<4.80	<4.80	<4.80	<4.80	91.7	15	15	15
DB O ₅ (mg/L)	175	48	31	16	31	37	24	86.3	150	75	30
N_Total (mg/L)	33.4	33.4	26.3	10.2	2.12	<1.57	<1.20	96.4	40	40	15
P_Total (mg/L)	12	6.92	7.87	7.24	6.52	6.16	5.13	57.25	20	20	5
Coliform. Fecales (NMP/100Ml)	1.7 X 10 ⁷	1.3 X 10 ⁸	9.2X 10 ⁵	1.6 X 10 ⁵	1.3 X 10 ⁴	1.1 X 10 ²	7.9 X 10 ²	99.99	1000	1000	1000

Tabla 23. Valores parámetros laboratorio 200L/días, 25 de Abril (Día 148 de operación)

PARÁMETRO	Agua Residual Cruda	Salida Fosa Séptica	Salida BF	ER-PM1	ER-PM2	ER-PM3	Salida Sistema		Límite de Descarga según NOM-001-SEMARNAT-1996		
									% de Remoción	A Uso en Riego Agrícola	B Uso Público Urbano
G y A (mg/L)	57.7	7.63	6.34	8.24	6.55	5.71	7.28	87.55	15	5	15
DB O ₅ (mg/L)	131	56.86	38.79	49.22	43.35	43.56	16.3	86.3	150	5	30
N_Total (mg/L)	32.6	33.3	7.02	15.8	15	10.5	6.22	80.9	40	0	15
P_Total (mg/L)	12	6.92	4.85	4.49	4.95	4.78	4.88	59.33	20	20	5
Coliform. Fecales (NMP/100ML)	1.3 X 10 ⁸	1.1 X 10 ⁸	7.0X 10 ⁵	1.3 X 10 ⁵	7.9 X 10 ⁴	7.9X 10 ³	7.9X 10 ²	99.99	1000	1000	1000

Valores 400 L/día

Tabla 24. Valores parámetros laboratorio, 400L/día 28 de Agosto (Día 267 de operación)

Para este caso, con 200 L/día se observa una disminución drástica de la remoción de fosforo, como ya se había constatado con las gráficas anteriores. La remoción de coliformes fecales sigue manteniéndose elevada. La remoción de grasas y aceites incluso aumento un poco y para el caso de la materia orgánica y del nitrógeno disminuye un poco su eficiencia

7.18. Comparativo entre los diferentes caudales y la eficiencia de remoción

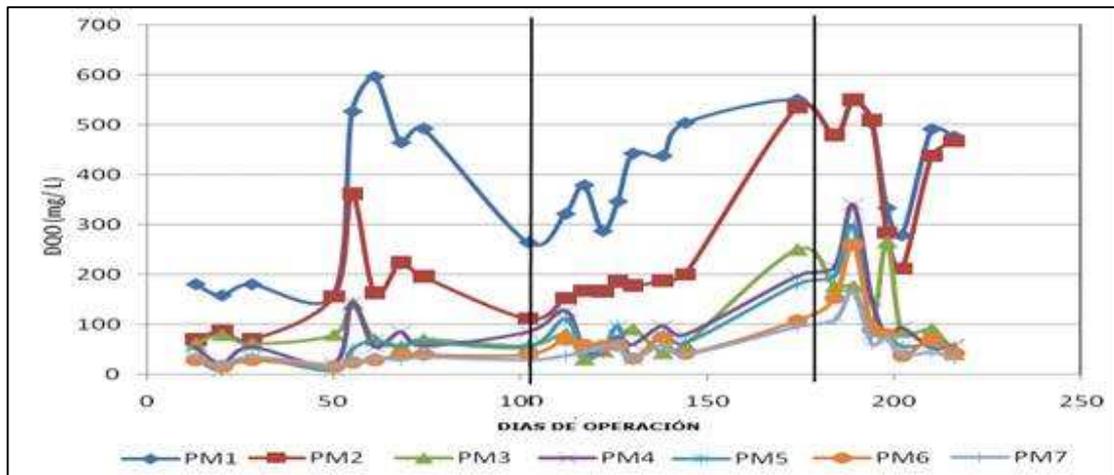


Figura 75 Gráfica comparativa de los diferentes caudales probados para DQO

Como se comentó en gráficas anteriores el cambio de tipo de agua residual se ve una reflejada para la cuarta semana. A partir de entonces se logran remociones menores a 5 mg/L. Con el cambio de caudal se mantiene la eficiencia elevada del sistema.

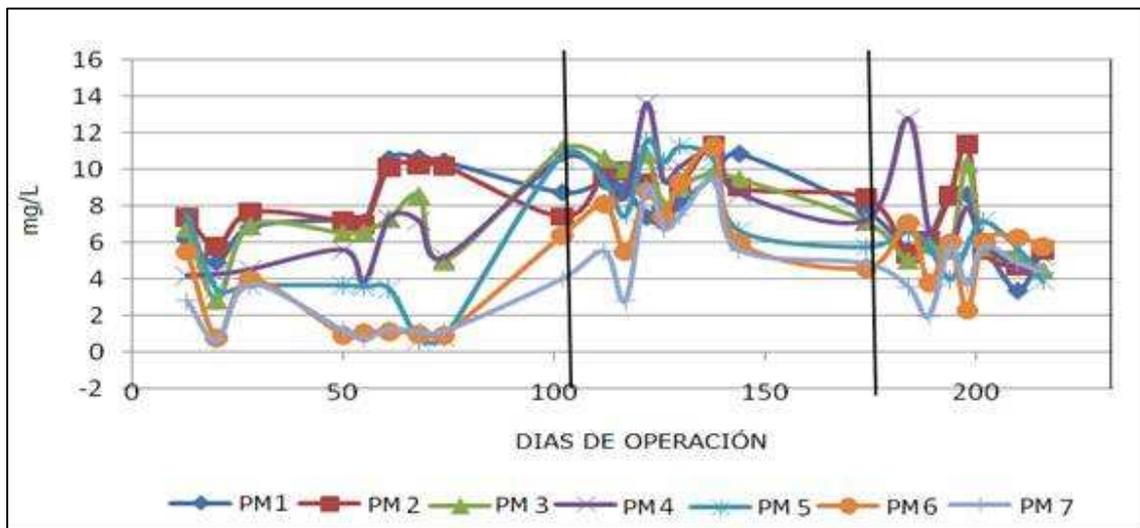


Figura 76 Gráfica comparativa de los diferentes caudales probados para P- PO₄,

Para el caso de los ortofostatos, como se comentaba anteriormente se obtienen eficiencias mucho mayores con un caudal de 100 L/día.

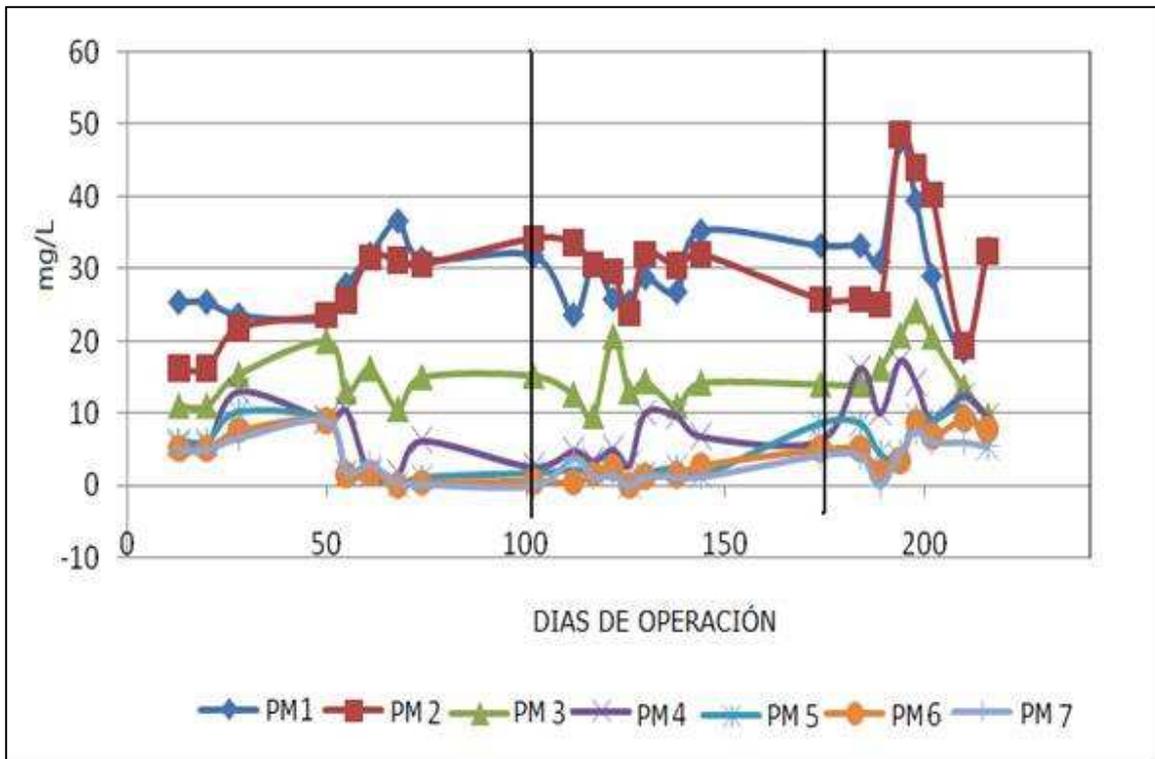


Figura 77. Gráfica comparativa de los diferentes caudales para N-NH₄

Con el nitrógeno amoniacal la remoción aumenta a partir del día 50 y mantenerse elevada durante el tiempo de operación con 200 L/día.

8. RESULTADOS ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

8.1. Introducción

El estudio de factibilidad es una herramienta de vital importancia en proyectos sociales y de este depende en gran medida su éxito o fracaso. Para la implementación o transferencia real y duradera de alguna tecnología a una comunidad específica, dentro de un contexto socio-ambiental complejo, el estudio de factibilidad se torna una herramienta elemental que permitirá conocer las características de la zona, identificar actores, tener un panorama amplio de la problemática, ubicarse bien en el contexto y dialogar de manera real con dicha comunidad.

Diversos son los elementos que pueden integrar un estudio de factibilidad, y el grado de detalle dependerá de los objetivos deseados. En general plantea un panorama o diagnóstico, refleja costos y beneficios y define una estrategia social; De esta forma permitirá tener más herramientas en la toma de decisiones y en la valoración de la inversión requerida para su posterior implementación (Figura 78).

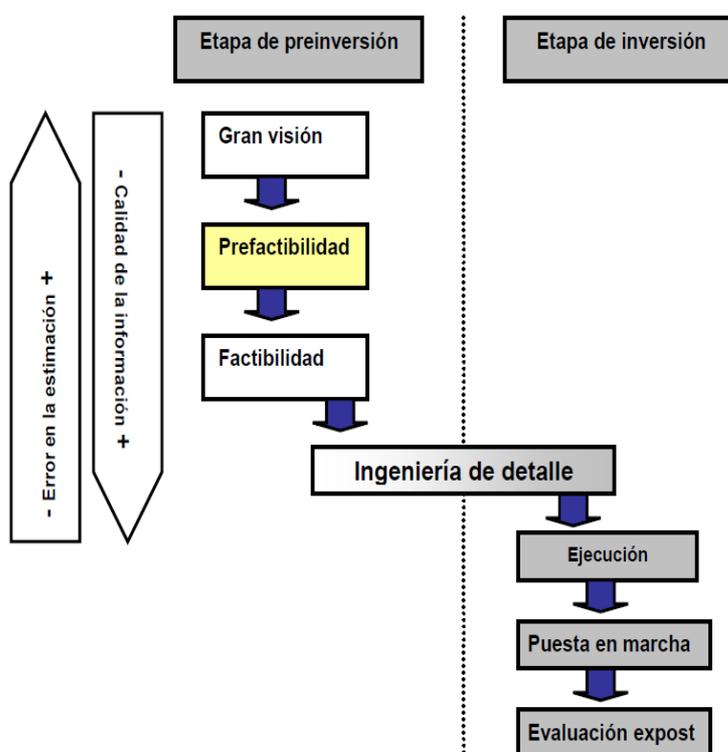


Figura 78. Esquema estudio de factibilidad

Aspectos que debe abordar un estudio de factibilidad:

Diagnóstico => Problema => Proyecto

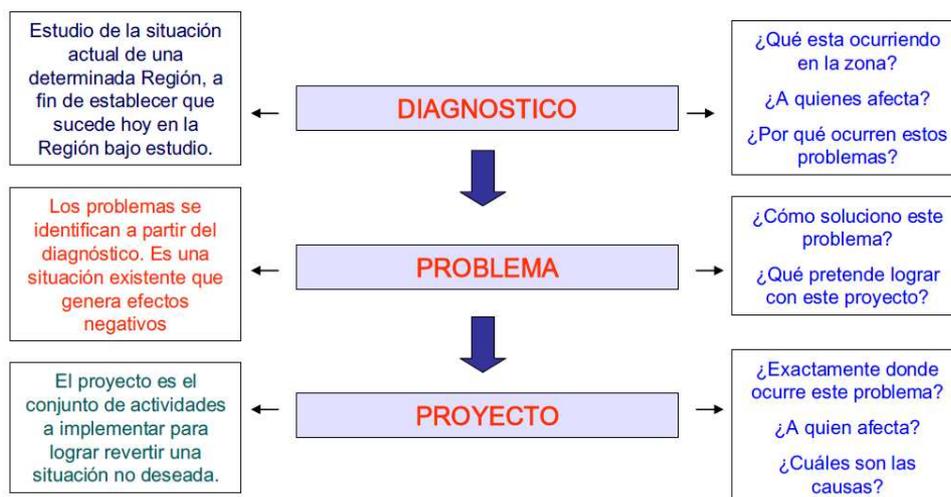


Figura 79. Aspectos generales estudio de Factibilidad

Como se observa en la Figura 78 y 79, el diagnóstico debe reflejar la situación actual de la región y de esta manera saber qué es lo que está ocurriendo en la actualidad en la zona de estudio y cuáles son los factores a tomar en cuenta. Una vez identificado el problema se plantean las posibles soluciones y se establecen los recursos y los alcances del proyecto.

Una vez que se tiene dicha información se implementa el plan de acción lo más específico posible, los actores, el contexto, los tiempos y los recursos financieros.

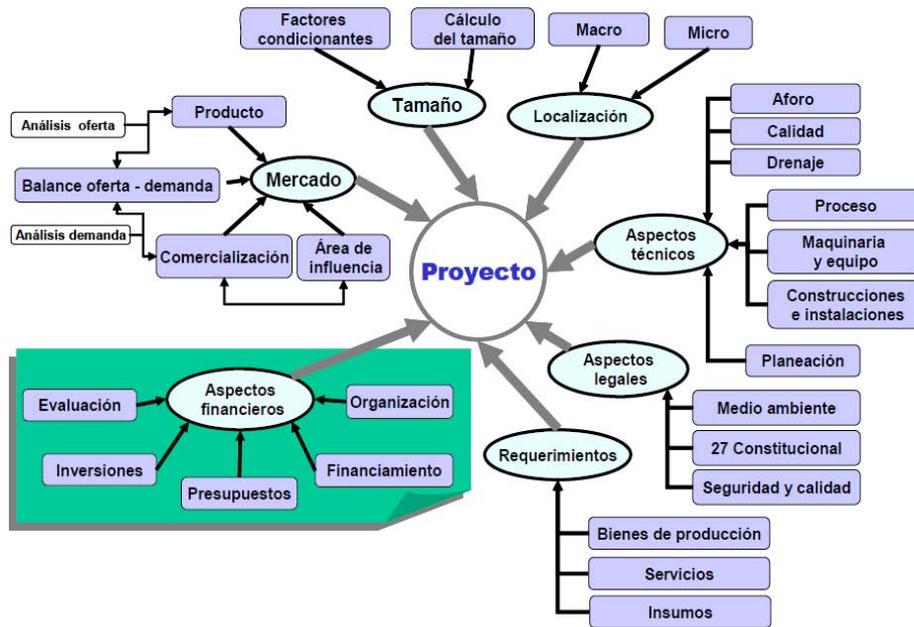


Figura 80 Esquema de las dimensiones estudio de factibilidad

Planteado ya el panorama se puede elegir mas acertadamente entre el universo de alternativas técnicas la más factible.

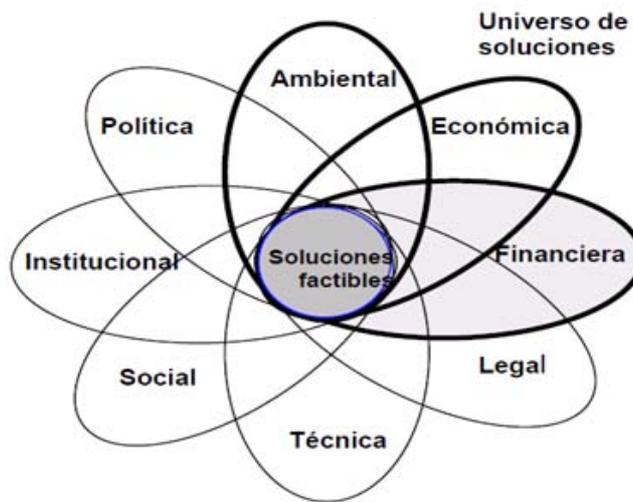


Figura 81. Alternativas de soluciones técnicas

Con base en lo anterior, el Estudio de Factibilidad en este trabajo incluirá:

Estudio de gran visión

- Descripción de la zona de estudio
- Identificación de la problemática
- Justificación y análisis de propuestas
- Elección del sistema

Ingeniería básica

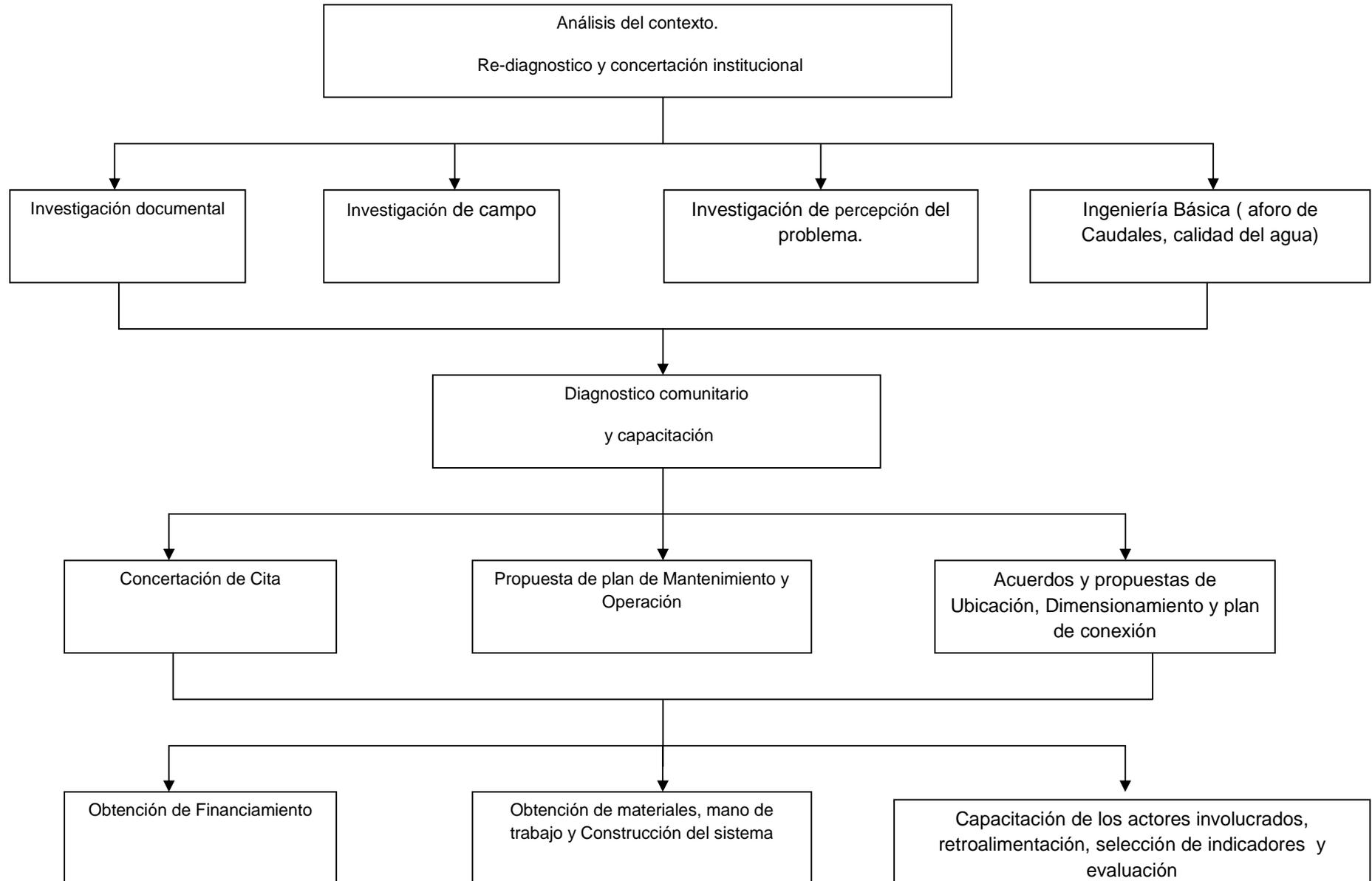
- Determinación de zona de ubicación del sistema y actores involucrados
- Selección de descargas
- Aforo de descargas
- Caracterización del agua residual
- Dimensionamiento del sistema e ingeniería del detalle
- Manual de operación y mantenimiento

Estudio socio-económico (costo-beneficio)

Gestión social

Lo que se busca con el estudio de factibilidad es estudiar y evaluar un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas no convencional que se adecúe al contexto de comunidades rurales y urbanas marginadas de difícil acceso, de manera específica en la colonia de Sacatierra, Cuernavaca, Morelos.

En general se siguió la siguiente estrategia:



Para alcances de este trabajo de tesis la obtención de financiamiento, la obtención de materiales, mano de obra y construcción del sistema y la capacitación de actores solo se plantean como la estrategia a seguir para la ejecución del proyecto.

8.2. Estudio a Gran Visión

8.2.1. Descripción General del Sitio de Estudio

Ya descrito a detalle en la parte inicial de este trabajo, la Tabla 25 y la Figura 82 buscan recordar las características generales del sitio de estudio.

Tabla 25 Características generales de la zona de estudio

ESTADO	MORELOS
MUNICIPIO	CUERNAVACA
BARRIO	BARRIO DE SAN ANTÓN
ZONA ESPECÍFICA	CANAL DE SACATIERRA
CUENCA	RÍO APATLACO
SUBCUENCA	RÍO APATLACO
MICROCUENCA	SAN ANTÓN

El sitio está compuesto por una serie de viviendas irregulares (aproximadamente 60 casas) a lo largo del canal con aproximadamente 40 descargas intermitentes y 10 descargas constantes de gran volumen.

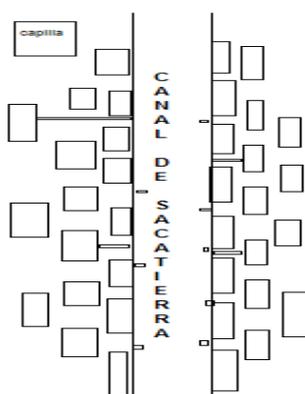


Figura 82 Canal de Sacatierra, esquema de la ubicación de viviendas

El canal mide aproximadamente 200 metros, de la calle principal a una capillita que es la referencia en donde termina dicha colonia (Figura 82 y 83).



Figura 83 Fotografía del canal de Sacatierra, Cuernavaca, Morelos

8.2.2. Identificación de la Problemática

El canal de Sacatierra es probablemente el lugar más contaminado de Cuernavaca; sus descargas explican casi el 80% del problema del Salto de San Antón y sus ecosistemas.

Como se comentó en la introducción de esta tesis, las barrancas muchas veces funcionan como **vertederos de aguas residuales domiciliarias y municipales**. Su tratamiento es deficiente en el mejor de los casos y con demasiada frecuencia existe una falta de cobertura del servicio de recolección de los residuos sólidos domiciliarios, por lo que la mayoría de las barrancas en Cuernavaca se han convertido también en amplios receptáculos de basura. La consecuencia actual es que dicho canal recibe directamente 9 descargas generales provenientes de otras colonias canal arriba, y más de 250 descargas domiciliarias.

En esta zona el crecimiento acelerado y desordenado de la metrópoli de Cuernavaca impone una enorme presión sobre los ecosistemas y los recursos hidrológicos. Este desarrollo sin planeación y en la mayor parte fuera de la Ley, ha impactado seriamente los recursos naturales de esta zona., aunado todo esto a la naturaleza escarpada y de difícil acceso de la zona, ha dado como resultado un deteriorado entramado social.; propenso a condiciones de marginalidad, inseguridad y pobreza extrema.

La gente vive “encima” del canal de aguas residuales. Han construido puentes de cemento encima de dicho canal, obteniendo así un poco más de espacio para su vivienda. Todo esto ha conllevado problemas de salud importantes, malos olores, infecciones gastrointestinales y otros problemas de salud; situaciones que a final de cuentas se traducen en condiciones insalubres que deterioran la calidad de vida de esta zona.



Figura 84. Fotografías de la barranca del canal de Sacatierra

8.2.3. *Justificación y Análisis de Propuestas*

Debido a lo expuesto anteriormente existe una gran necesidad en la zona de implementar sistemas de saneamiento de estas aguas residuales que sean adecuados para dicha comunidad., es decir:

Que sean sistemas de bajo costo de construcción, operación y mantenimiento.

Que requieran poco mantenimiento no especializado, esto es, que sean fáciles de operar y mantener.

Que no produzcan productos secundarios contaminantes.

Que tengan una larga vida útil.

Que no requieran terrenos extensos.

Que busque emplear materiales y recursos de la zona.

Que no requiera conexión con la red de alcantarillado.

Que sean sistemas dóciles y que soporten los constantes cambios de caudal(ya que el caudal cambia contantemente debido a las descargas intermitentes).

Que busquen un beneficio extra a la comunidad, es decir, que puedan obtener productos secundarios de dicho sistema que les sean de interés o que sea un sistema estético que mejore las condiciones del paisaje de la zona.

Que sea beneficioso para el ecosistema circundante.

8.2.4. Elección del Sistema

Mediante el sustento de esta tesis se ha comprobado que el sistema combinado de biofiltro sobre lecho orgánico y humedal construido tipo entramado de raíces cumple con los requisitos expuesto en el punto anterior se propone implementarlo en el contexto de la problemática en el canal de Sacatierra.

Dicho sistema demostró ser eficiente en la remoción de contaminantes, requerir poca inversión, ser amigable y de fácil operación y mantenimiento, brindar beneficios extras como son la utilización de plantas de ornato, la eliminación de olores, el aprovechamiento de desechos de podas de la región, la obtención de materia prima para artesanías, o enriquecedor de suelos en el caso de los papiros. Ser propicio para su implementación en zonas donde no llega el sistema de alcantarillado, aprovechar el espacio y no requerir de amplios terrenos, mejorar el paisaje, entre otros beneficios. Por lo que se considera una buena opción para la implementación en este contexto.

Para la determinación de la casa prototipo se realizaron varias visitas a la colonia de Sacatierra.



Figura 85. Sistema combinado de biofiltración y humedal, materiales aprovechables

8.3. Ingeniería Básica

8.3.1. Determinación de Zona de Ubicación del Sistema

Para la determinación de la casa prototipo se realizaron varias visitas a la colonia de Sacatierra:

Tabla 26. Visitas a Sacatierra, Cuernavaca, Morelos

Visitas	Descripción
1	En compañía de Rodrigo Morales, colaborador del Macro-proyecto “Ecosistemas y Desarrollo Humano” se realizó un recorrido en la zona. En el cual se identificaron los principales actores, la longitud y estado general del canal, las colonias canal arriba y canal abajo. Se identificaron sistemas de tratamiento anteriores en la zona (Fosa séptica abandonada, tubo colector).
2	Se recorrieron además zonas canal abajo (Salto Chico, Salto de San Antón), se tomaron fotografías de la zona e identificación de baño seco en el canal y ER en la zona del salto de San Antón
3	Se realizó recorrido del canal de Sacatierra para identificar descargas, realizar aforos y lograr un estimado del caudal. Identificar número de casas aproximado en Sacatierra, descargas intermitentes y constates y principales puntos de descarga.
4	Con el apoyo de una de las integrantes de los colonos de Sacatierra (Sra. Isabel) se concertó cita con vecinas de la colonia. En dicha plática se comentó sobre el proyecto, sobre el sistema y se identificó casa prototipo (Casa Sra. Jobita conectada con otras dos viviendas)
5	Se concertó cita con la Sra. Jobita para conocer su casa. En dicha plática se conoció además a los actores de las otras dos viviendas, se les explicó el sistema y sus beneficios. Dichos actores se mostraron muy interesados en remediar un poco la situación con el Canal. Se identificación dimensiones para prototipo, se concertó sitio para su localización dentro de la losa de las tres viviendas, encima del canal.
6	Visita a la casa prototipo para identificar y aforar descargas, tomar fotografías e identificar problemática particular. Se aplicaron encuestas para diagnóstico.
7	Recorrido para identificar talleres mecánicos con descargas hacia el canal u otro tipo de descargas que no fuesen domésticas. En dicho recorrido en la colonia de Sacatierra se identificó que solo existe descarga doméstica, pero que al canal llegan descargas de zonas aledañas donde se identificaron aproximadamente 15 talleres mecánicos.
8	Recorrido por la barranca, toma de fotografías. Identificación del recorrido.



Figura 86 Visita a Sacatierra, junta con colonos

8.3.2. Casa Prototipo

Tabla 27. Características de la casa prototipo

FAMILIAS	3
TOTAL DE PERSONAS	10
DESCRIPCIÓN	El terreno está conformado por tres viviendas con un puente de acceso común encima del canal y n corredor de escaleras con elevada pendiente. Una losa adicional encima del canal a un lado del puente de acceso en donde una de las familias tiene su cocina al aire libre, su tanque de almacenamiento, su lavadero y zona de macetas ornamentales.
PROBLEMÁTICA	Malos olores, constantes infecciones y problemas gastrointestinales, iniciativas anteriores inconclusas.
ANTECEDENTES	Los actores conocen el sistema de entramado de raíces y el trabajo del Arq. Cesar Añorve. Están dispuestos a colaborar con mano de obra, mantenimiento y operación del sistema. Se mostraron muy interesados aunque algo escépticos por iniciativas anteriores inconclusas. Participan de manera activa en el patronato de San Antón.

A continuación se muestran alguna fotografías de la ubicación de la casa de la Sra. Jobita en la colonia de Sacatierra, además, algunas fotografías de el canal de Sacatierra y de la casa de la Sra. Jobita (Figuras 87, 88 y 89).

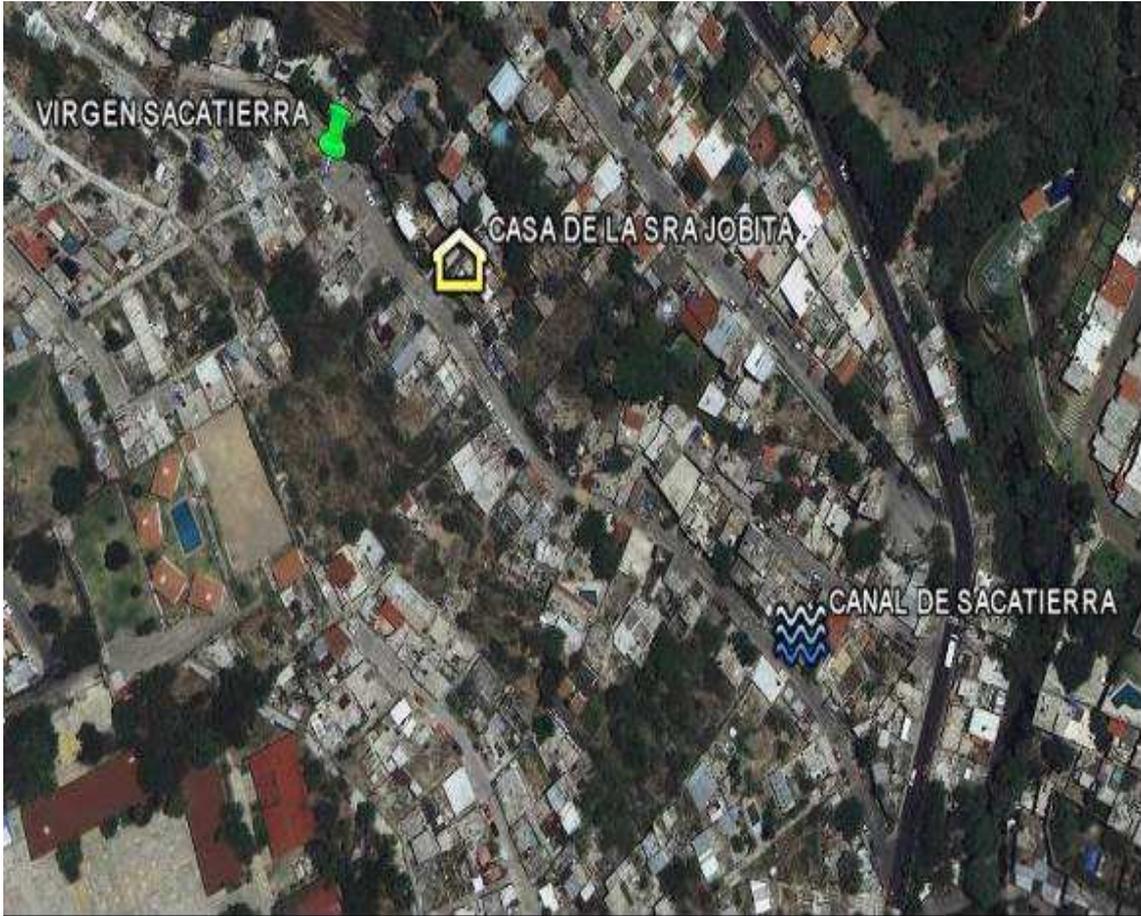


Figura 87 Mapa de la ubicación de la casa prototipo

Canal de Sacatierra



Figura 88. Fotografías del canal de Sacatierra

Casa señora Jobita



Figura 89. Casa Sra Jobita, colonia Sacatierra

SITUACIÓN ACTUAL

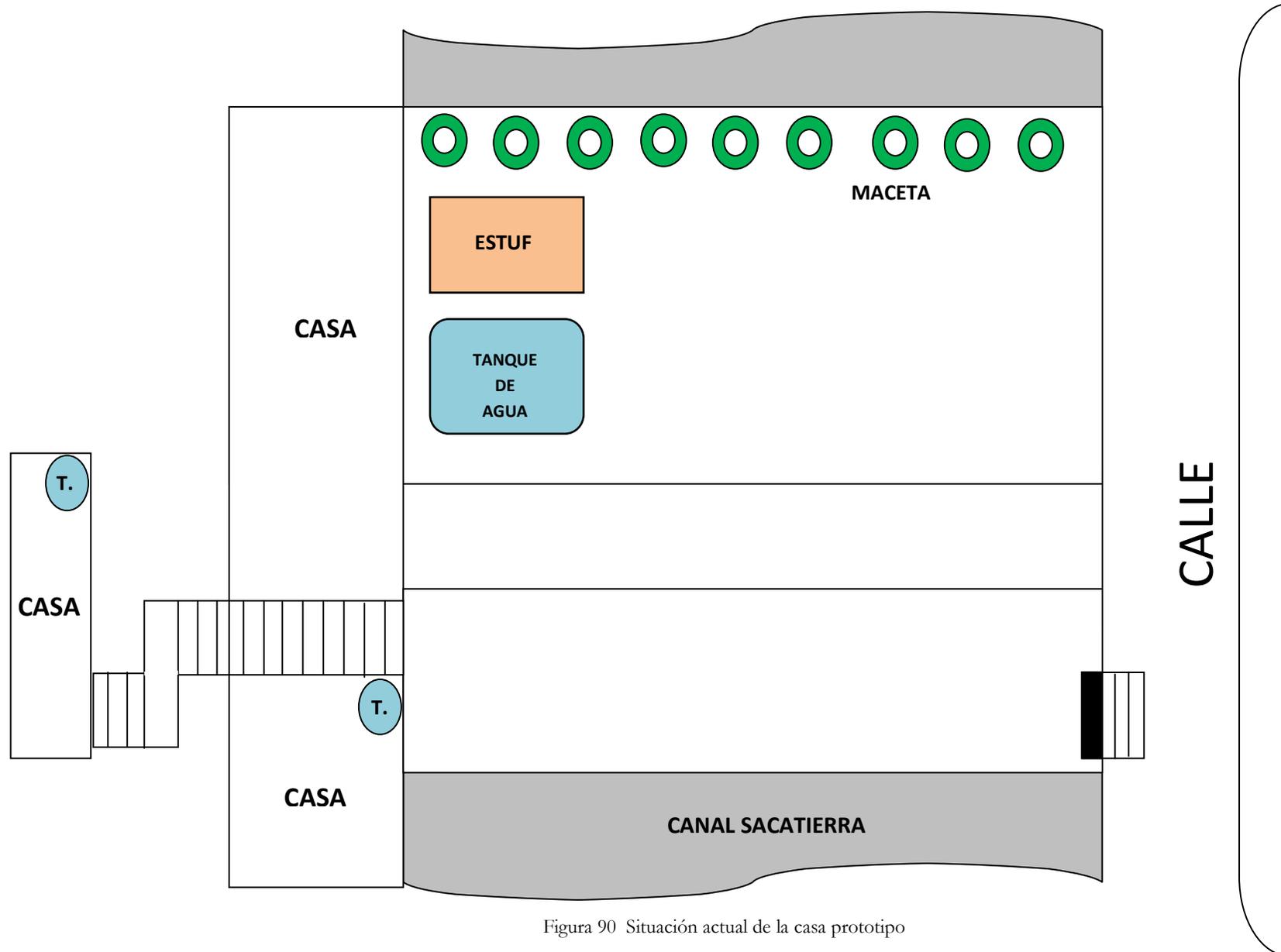


Figura 90 Situación actual de la casa prototipo

8.3.3. Selección de descargas

En la Figura 90 podemos observar una descripción de la situación actual de la casa prototipo. En la Tabla 28 se muestra una descripción de dichas características.

Tabla 28. Características de la casa prototipo

FAMILIAS	3
TOTAL DE PERSONAS	10
AGUA POTABLE CONSUMIDA / DÍA	60L/persona/día 600 L/día.
CANTIDAD DE AGUA RESIDUAL PRODUCIDA	El agua residual doméstica producida según la literatura es un 75% del agua potable consumida por persona, por lo tanto se tiene un volumen a tratar de : 450L/día
UBICACIÓN DE DESCARGAS	Las descargas de las dos viviendas de encuentran actualmente de la siguiente forma: La vivienda a la derecha (vista desde la calle) tiene un tubo de aguas negras(baños) y otro de aguas grises (regaderas) que pasa por debajo del puente del canal y va a descargar a un costado del canal. La vivienda de la izquierda tiene un solo tubo que hace el mismo recorrido. La tercera casita actualmente se encuentra conectada a otra descarga pero planea conectarse al mismo sitio que las otras dos viviendas (Figura 89)



Figura 91 Fotografía del canal de Sacatierra

8.3.4. Aforo de Descargas

En la Tabla 29 se muestran los valores de la determinación aproximada de caudales de aportes de aguas residuales al canal.

Tabla 29. Aforo de descargas en el canal de Sacatierra

Hora de inicio: 4:15 pm

Punto de Muestreo	Volumen (L)	Tiempo (seg)	Caudal (L/s)
1	1.9	3	2.64
2	0.108	4	0.027
3	0.110	4	0.0275
4	1.9	3	0.63
5	2.2	14	0.16
6	6	3	2
7	7	3	2.3
8	5	3	1.6
9	0.200	4	0.05
10	3	8	0.375
CAUDAL TOTAL APROXIMADO			9.8

En el canal de Sacatierra se tiene reportado según muestreo de SAPAC del día 23 de abril de 2009 un caudal promedio de 28.6 L/s, es decir, 2 470 867.2 L/día, viniendo una parte importante de las descargas de las unidades habitacionales aguas arriba. Toda esta agua residual se dirige al salto de San Antón contaminando así el ecosistema y provocando prejuicios a su paso.

8.3.5. Caracterización del agua residual

Se realizó una visita al Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Cuernavaca (SAPAC) donde se obtuvo la siguiente información:

PARÁMETRO	Agua Residual Cruda San Antón*	Límite de Descarga según NOM-001-SEMARNAT-1996		
		A Uso en Riego Agrícola	B Uso Público Urbano	C Protección a la Vida Acuática
Temperatura(°C)	19.7	N.A.	40	40
pH	7.70	N.A.	N.A.	N.A.
Conductividad (mS/m)	49.3			
G y A (mg/L)	14.32	15	15	15
Sol. Sedimentables (Ml/L)	0.5	1	1	1
SST (mg/L)	138	150	75	40
DB O ₃ (mg/L)	197.28	150	75	30
N-Amoniacal (mg/L)	17.61	N.A.	N.A.	N.A.
N_Total (mg/L)	30.96	40	40	15
P_Total (mg/L)	7	20	20	5
Coliform. Fecales (NMP/100Ml)	4.95 X 10 ⁶	1000	1000	1000
DQO _{Total} (mg/L)	390.62	-----	-----	-----

*Muestra tomada del Canal de Aguas Negras Ubicado en Privada Mango S/N, Colonia Sacatierra Fecha de Muestreo: 23/01/2009, Laboratorio: Mercury Lab. S.A. DE C.V. Fuente: SAPAC

En la Tabla se puede observar que existe una elevada contaminación en el canal de Sacatierra, tanto en parámetros físicoquímicos como microbiológicos.

8.3.6. Dimensionamiento y definición del sistema

A partir del prototipo construido en el IMTA se pudo observar que fue eficiente para caudales de 100 L/día, 200 L/día y 400 L/día por lo que se sugiere probar caudales mayores para evaluar su eficiencia.

Tabla 30. Dimensionamiento de la casa prototipo

CAUDAL	Descripción
COMPONENTES	<p>Fosa Séptica de 1000L</p> <p>Sistema de Bombeo (Bomba Sumergible) para la alimentación del Biofiltro.</p> <p>Línea de conducción desde la fosa séptica hacia la parte alta del Biofiltro, con sistema para distribución homogénea del agua al Biofiltro.</p> <p>Biofiltro Sobre Lecho Orgánico (cuadrado de 1m cada lado por 2 metros de alto).</p> <p>Entramado de Raíces de 7 m de Longitud</p> <p>2 Viguetas con bovedillas de 6 m para soportar el ER.</p> <p>Tubería de Desagüe al Canal</p>
DESCRIPCIÓN FOSA SÉPTICA	<p>Prefabricada para 1000 L. Se ubicará en el sótano de la vivienda de la derecha ya que es el único terreno disponible y se facilitan las conexiones con los tubos de drenaje de las tres viviendas. Tomando en cuenta las subidas del canal y la posible inundación se buscará que quede bien sellada. Es necesario que un especialista evalúe esta decisión.</p>
DESCRIPCIÓN SISTEMA DE BOMBEO	<p>Sistema de Bombeo para conducir el agua desde la fosa séptica hacia la parte alta del Biofiltro. ½ HP. Bomba sumergible en cuerpo de acero inoxidable en versión cárcamo seco con cabezal de succión</p>
DESCRIPCIÓN LINEA DE CONDUCCIÓN	<p>Tubería de PVC Hidráulico RD -26, 38 MM 1 ½ pulg</p>
DESCRIPCIÓN BIOFILTRO	<p>Columna rectangular de 1m en cada lado (4m²) por 2 m de alto. Construida en Tabicones. Volumen sin material = 8 m³</p>
DESCRIPCIÓN ENTRAMADO DE RAÍCES	<p>Entramado de Raíces de 7 m de Longitud (en forma de L), por 0.60 m de ancho y 0.60m de alto. Construido en cemento y tabicón. Pendiente de 10%</p> <p>Primera capa de 0.25 cm de piedra del tamaño de 10 pulg aprox. y la segunda capa de 0.35 cm de tezontle o grava de ¼</p> <p>Plantas: Papiros y plantas de Ornato (Alcatraces, Jengibre Mariposa, Hoja Elegante, Canas, Ave de Paraíso)</p>

PROPUESTA

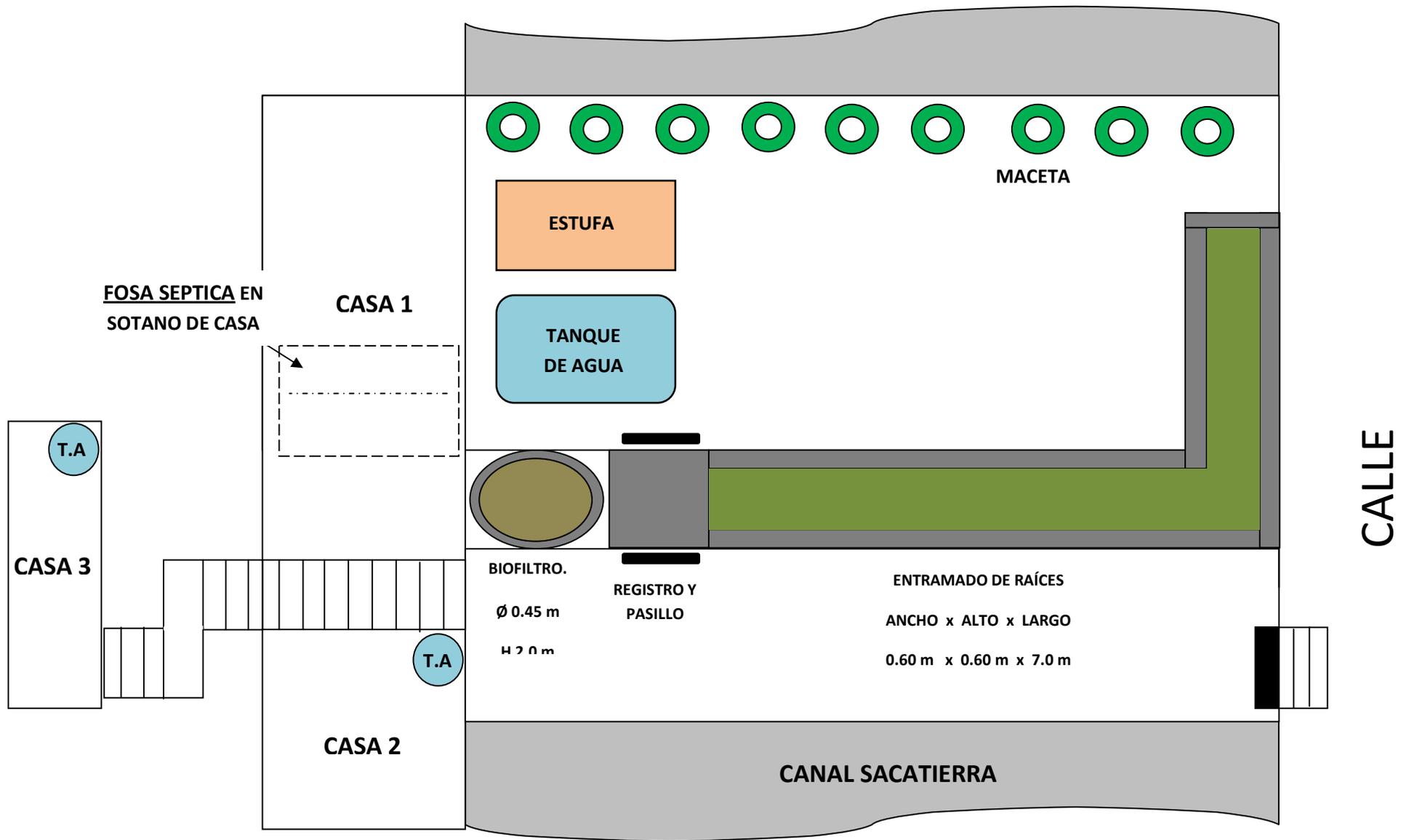


Figura 93. Diagrama del sistema propuesto en la casa seleccionada

Descripción del Proceso:

1. El agua residual bajará por los tubos de conducción desde las tres casitas hasta la fosa séptica donde se iniciará el tren de tratamiento. En esta etapa se eliminarán sólidos mayores por sedimentación y se disminuirá la cantidad de grasas y aceites, ya que estos compuestos pueden taponar el biofiltro.
2. Una vez que haya pasado por la fosa séptica el Agua Residual será bombeada hacia la parte alta del biofiltro donde será distribuida uniformemente y así ser procesada por la biopelícula del biofiltro para luego caer en un registro, se evitará que el biofiltro se inunde manteniendo el nivel del tubo de salida del biofiltro a cierta altura dentro para que, por el principio de vasos comunicantes, no se mantenga inundado el biofiltro.
3. A partir del registro el agua ingresará por gravedad al ER. Dicho entramado tendrá una pendiente de aproximadamente el 10% para propiciar el flujo del agua dentro del Entramado. Se mantendrá la salida a un nivel aproximado de 15 cm por encima del piso para lograr el Tiempo de Retención Hidráulico deseado.
4. Posteriormente el Agua Residual será conducida por tubería al Canal.

8.3.7. *Manual de Operación y Mantenimiento*

Biofiltro

1. Colecta de Material de desecho de podas de Tabachín.
2. Limpieza de dicho material dejando solo ramas no muy gruesas libres de hojas.
3. Triturar material.



4.- Poner a secar el material al sol, extendiendo y revolviendo constantemente para lograr un secado uniforme.



5.- Tamizar el material con tamiz de una pulgada para eliminar impurezas y homogenizar el material.



Por otro lado la grava a emplear en la capa de 10 cm del Biofiltro es lavada y tamizada con malla de 1 pulgada.



6.- Humedecer el material filtrante a un 60-70%, es decir, que al exprimirlo con el puño no escurra.

asegurarse que en el biofiltro exista un sello hidráulico para evitar inundaciones, con una curvatura en la línea de conducción de salida del biofiltro y que el tubo de salida

Asegurarse que el registro no supere la altura de la base del biofiltro para lograr con esto, basándose en el principio de vasos comunicantes, evitar inundaciones.



Es importante cerciorar que el tubo de salida del Biofiltro esté despejado para que el material filtrante no obstruya la salida del agua. Para esto se puede acondicionar una tarima no metálica.

Una vez que se cumple con los anteriores requerimientos, se procede con el empaquetamiento del Biofiltro. Primeramente se coloca una capa de 30 cm de la grava de ¼ preparada anteriormente y el resto del volumen se rellena con material filtrante humedecido evitando dejar espacios vacíos.

Es importante asegurarse de que el sistema de alimentación al Biofiltro esté acondicionado para que el caudal sea distribuido uniformemente. Evitando que se concentre el agua en algún punto. Para esto se puede emplear tubería de PVC perforada, en forma circular o cuadrada a la entrada del biofiltro, simulando una regadera.

7.-Realizar pruebas hidráulicas para detectar posibles fugas.

ER

1.- Asegurarse que el ER tenga una pendiente adecuada para dejar fluir el agua desde el registro hacia la salida.

2.- Elevar el tubo de salida del ER a unos 15 cm con respecto al suelo para lograr el Tiempo de Retención Hidráulico deseado.



3.- Colocar una capa de 25 cm de piedra o tezontle de 3 a 5 cm de diámetro.

4.- Colocar una segunda capa de 35 cm de grava o tezontle de $\frac{3}{4}$.

5.- Acondicionamiento de las plantas: en el momento, retirar la bolsa y sumergir las raíces en agua. Con la finalidad de limpiarlas completamente, se debe tener cuidado en esta operación para evitar dañarlas.



6.- Una vez determinada la distribución y densidad de las plantas, es necesario hacer el acondicionamiento necesario para poder realizar la siembra de las plantas, este acondicionamiento requiere cavar una perforación retirando todas las capas de material, hasta llegar al primer material filtrante para cada una de las plantas.

7.- Colocar y plantar cada planta con suma precaución evitando contacto entre las raíces y el aire para evitar obstruir las raíces con burbujas de aire. Esto se logra sumergiendo en agua todo el tiempo.

8.- Cubrir bien las plantas con grava hasta el nivel indicado (60 cm).

9.- Es importante cerciorarse de que el nivel de agua no rebase el nivel de la grava para evitar la propagación de mosquitos y los malos olores.

10.- Se recomienda plantar primero los Papiros de manera que puedan dar sombra a las plantas ornamentales. Los papiros son los que realizan la principal degradación de contaminantes y sus raíces largas les permiten penetrar hasta 60 cm. Dichas plantas en condiciones apropiadas se propagan rápidamente y sus follajes crecen y se desarrollan rápidamente, sobre todo en la primera parte del ER donde tienen mayor disponibilidad de nutrientes.



11.- Una vez que se tiene empacado el sistema se prosigue a arrancar el sistema.

8.3.8. Recomendaciones

Es necesario podar los papiros una vez al mes para mantener el sistema saludable y activo.

Evitar proliferación de plagas.

Mantener una alimentación constante.



Figura 94. Sistema Combinado de biofiltración y humedal ER

8.4. Estudio Socio-económico (Costo-Beneficio)

El concepto de evaluar, plantea la definición de los costos y los beneficios que los proyectos generan en la economía regional, para que al compararlos se tenga una calificación, la cual deberá ser positiva, es decir el monto de los beneficios socioeconómicos deberán superar al de los costos económicos del proyecto.

Costo beneficio

Los costos y beneficios resultantes se deberán convertir en unidades monetarias con la finalidad de apreciar la viabilidad del proyecto propuesto, el resultado se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$VPN = Bb + Be - Cd - Cp - Ce$$

Donde:

VPN Valor Presente Neto esperado

Bb Beneficios directos del proyecto

Be Beneficios externos y ambientales

Cd Costos directos del proyecto

Cp Costos de las medidas de control o mitigación

Ce Costos ambientales

Para reconocer que el proyecto es factible el resultado deberá ser mayor que cero

Costos

Tabla 31. Costos aproximado de la casa prototipo

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	DIMENSIONES	CANTIDAD REQUERIDA	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
<p>Plomería</p> <ul style="list-style-type: none"> - Línea de conducción desde cada una de las casas hasta el punto de unión - Interconexión de descargas de las 3 casas - Línea de conducción hacia la fosa séptica. - Tubería de bombeo de la fosa séptica hacia la parte alta del BF. - Tubería de desagüe hacia el canal. - Accesorios (válvulas, uniones, etc.) 	<p>Tubería de PVC Hidráulico RD - 26, 38 MM</p> <p>Accesorios</p>	<p>1 ½ plg.</p>	<p>Aproximadamente 60 m de tubería</p>		<p>15,000</p>
<p>Obra Civil</p> <ul style="list-style-type: none"> - Muros del Entramado de Raíces - Instalación y adecuaciones de tubería para Biofiltro. - 	<p>Muros del ER en tabacón y juntas arena-mortero-cemento y castillos de armex y</p>	<p>ER: 7 m de largo X 0.60 m de ancho X 0.60 m de altura</p>	<p>1</p>		<p>25,000</p>

	concreto. Tubería de concreto prefabricada de				
Bomba Sumergible	Bomba sumergible en cuerpo de acero inoxidable en versión cárcamo seco con cabezal de succión de	½ HP	1	3,000	3,000
Medio Filtrante	Tezontle y grava	compuesto por una capa de 25 cm de tezontle de 3 a 5 cm de diámetro y otra capa de 35 cm compuesta por grava de 1/4	2 m ³	3,000	3,000
Plantas	Papiros, Alcatraces, Aves de Paraíso, Platanillos, Cannas		30 papiros 20 plantas de ornato	30 / planta	1,500
Instalación eléctrica	Básica		1	1,200	1,200
Viguetas con Bovedilla			2	513.5	1,027
Fosa Séptica	Rotoplas	1000 L	1	1,974	1974
SUBTOTAL					51,701
IVA 15%					7,755
TOTAL					59,500
					Aprox. 60,000

Nota: Estos costos se obtuvieron basándose en costos a nivel piloto en el IMTA. Este monto puede reducirse de manera drástica a escala real.

Beneficios:

- Alta calidad fisicoquímica del Agua.
- Sistema Independiente, fácil de operar, de bajo costo, sin lodos ni residuos secundarios, ideal para comunidades rurales
- Mejoramiento en la calidad de vida
- Disminución de enfermedades gastrointestinales y muertes.
- Atrae el turismo “ Salto Chico” y “ Salto de San Antón”
- Uso de agua para viveros
- Efectos positivos en la salud.
- Efectos positivos aguas abajo

Valor social del agua.

La definición de costos y beneficios para este caso se expresan a partir del análisis del problema planteado mediante el siguiente diagrama de flujo. En el cual se considera esquemáticamente como el agua fluye libremente hasta que el ser humano la desvía para utilizarla, este uso generalmente implica un beneficio, pero también un costo pues el agua residual generalmente está degradada o contaminada. Al descargar el agua residual, altera la calidad de la corriente de la que previamente se extrajo, por lo que también implica un costo, mayor o menor en función de su impacto.

Desde el punto de vista de la teoría económica el agua es un *bien básico o base*. Lo cual significa que puede ser utilizada como insumo productivo de bienes o servicios de consumo final, o de consumo intermedio.

El ser humano requiere de agua para una gran gama de usos. El valor que la sociedad le da al consumo del agua, ya sea final o intermedio, depende de la calidad así como de la cantidad, abundancia o disponibilidad de agua. Cantidad, calidad y uso son tres parámetros que se reúnen para apreciar o depreciar el agua.

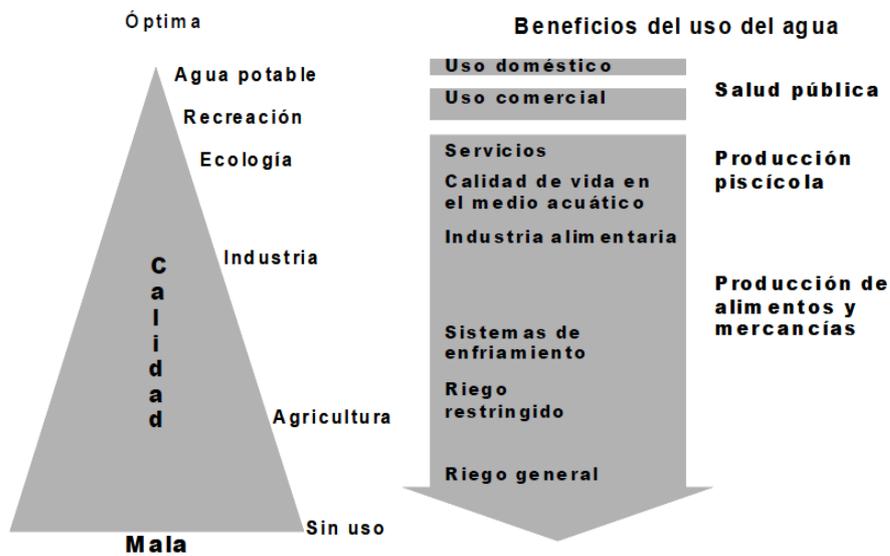
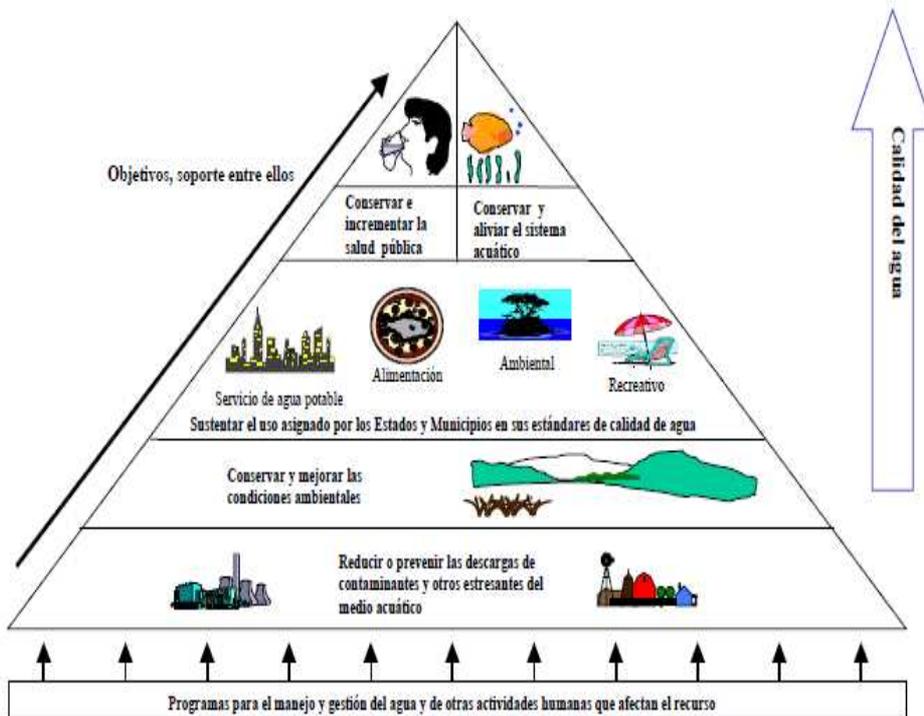


Figura 95. Pirámide usos por calidad del agua

Por lo tanto, los beneficios con respecto al agua son los resultados positivos del proyecto de depuración del agua residual, ya sea para regresarla al medio natural o para rehusarla. Otros beneficios tienen que ver con la resolución de conflictos de salud.

Con respecto a la mejora de la salud se refiere a la eliminación de la incidencia de enfermedades atribuibles a la falta de un sistema de tratamiento de agua residual. Para estimar este concepto se requiere tener en cuenta los siguientes rubros:

- Costo por tratamiento de enfermedades (hospitalización, análisis de laboratorio).
- Costo de los medicamentos utilizados
- Honorarios del médico
- Costo de análisis
- Tiempo no laborado por causa de estas enfermedades

Según la Organización Mundial de la Salud el 80% a nivel mundial de las enfermedades infecciosas y parasitarias gastrointestinales y una tercera parte de las defunciones causadas por éstas se deben al uso y consumo de agua insalubre, también reconoce este organismo internacional que solo un 41% de la población mundial consume agua tratada y desinfectada como para ser considerada “segura”.

8.5. Gestión Social

8.5.1. Participación Social



Figura 96 Representación manejo efectivo de microcuencas

Diagnóstico:

- **Instituciones:** IMTA - CRIM- UNAM
- **Tecnologías:** Sistema de tratamiento de aguas residuales no convencional (BF+ER).
- **Políticas:** Faltaría determinar que normas o incentivos implementar para hacer valer las leyes y evitar las consecuencias de la mala calidad del agua.
- **Financiamiento:** Aún inexistente para la construcción del sistema real en la zona de estudio, pero existente para la construcción del sistema piloto.
- **Información:** Falta información sobre las inquietudes de la población y sus soluciones.
- **Participación:** Existe cierto grado de organización y participación, pero faltaría motivar a los colonos para apropiarse de la tecnología.

Recomendaciones para la implementación del sistema:

Tabla 32. Recomendaciones para la gestión social del sistema

Num.	Actividades principales
1	Confirmar la participación ciudadana para la instalación del sistema mediante reuniones y presentación del funcionamiento de su funcionamiento, además de determinar el grado y tipo de participación de la localidad.
2	Realizar la gestión que requiera la instalación del sistema (permisos y obtención de financiamiento)
3	Capacitar a los operadores del sistema mediante visita al prototipo en el IMTA, videos, folletos, pláticas, talleres, etcétera.
4	Elaborar de un tríptico o cuadernillo de difusión
5	Motivar a la gente.

8.5.2. *Acuerdos y Compromisos*

Organización y planeación:

En caso de construirse el sistema los integrantes de las tres viviendas involucrados estarían dispuestos a colaborar con mano de obra y a realizar el mantenimiento requerido previa capacitación.

Perspectivas

Con la implementación de este sistema de tratamiento se esperaría disminuir un poco el agua residual del canal de Sacatierra y con esto mejorar en cierta medida la calidad del agua en dicha zona. El mayor impacto es a futuro, cuando mas casas involucren este tipo de sistemas de tratamiento. Por lo que se busca que esta iniciativa fuese un ejemplo a seguir para las viviendas vecinas, ya que una acción conjunta que se pudiese llevar a cabo lograrían hacer un cambio significativo en el canal de Sacatierra y aguas abajo, impactando positivamente el Salto Chico y el Salto de San Antón mediante sistemas de tratamiento no convencionales o de bajo impacto.

Establecer bases para buscar financiamiento dentro del Programa de Saneamiento del Río Apatlaco.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema combinado de biofiltración sobre lecho orgánico y humedad tipo entramado de raíces demostró ser un sistema eficiente para la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas, alcanzándose porcentajes de remoción de un **95% para DQO, 99.9% para nitrógeno amoniacal, 89.7% para ortofosfatos y 99.9% para coliformes fecales**. El efluente cumple bien con la Norma NOM-001- SEMARNAT-1996 de descarga de aguas residuales. El agua residual doméstica tratada mediante este sistema puede ser empleada para llenado de fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego, descargas de baños, entre otros usos.

En base a todo lo anterior, se concluye que se cumplió con el objetivo de estudiar el efecto sobre la eficiencia del tratamiento al combinar ambas tecnologías en un nuevo sistema de tratamiento. Además se logra estudiar y evaluar un sistema de tratamiento no convencional que presenta las siguientes características:

- Es menos costoso que otras opciones de tratamiento.
- Es de fácil construcción.
- Los gastos de operación y mantenimiento son bajos (energía y suministros).
- La operación y mantenimiento es mínima, la puede realizar el propio usuario.
- Una vez establecido, se mantiene prácticamente por sí solo (la supervisión puede ser mínima).
- Es un sistema versátil, es decir, soporta bien las variaciones de caudal y de cargas de contaminantes.
- Puede ser fuente de recursos para la comunidad, como el aprovechamiento de las plantas de ornato o de la fibra de papiro.
- No requiere de mucho terreno disponible.
- Ofrece un diseño flexible que se adecua a las necesidades de los usuarios y al entorno.
- Trata el influente *in situ*, sin requerir conexión al sistema de alcantarillado.
- El efluente tratado puede reincorporarse al ambiente sin necesidad de transportarse a otras áreas.
- No genera subproductos peligrosos.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

- Puede ser utilizado en comunidades rurales y urbanas marginadas.

Además:

- Proporcionan un hábitat para muchos organismos.
- Pueden construirse en armonía con el paisaje.

Debido a todo lo anterior, se concluye con bases que **el sistema combinado de biofiltración sobre lecho orgánico y humedal tipo entramado de raíces** es una alternativa viable y recomendable para el tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades rurales, urbanas marginadas, conjuntos habitacionales y/o unidades unifamiliares de difícil acceso.

Este sistema es por tanto una herramienta factible para la rehabilitación de la calidad del agua, con el consecuente mejoramiento de las condiciones del ecosistema.

Las mejores condiciones se obtuvieron en el segundo mes de operación (enero de 2009), con 100 L/día, que fue el caudal de diseño para dimensionar el sistema. Con 200 L/día mantuvo buenos porcentajes de remoción de contaminantes.

Los resultados obtenidos con respecto a la remoción de fósforo no demostraron ser tan efectivos como se esperaba ya que se saturó el medio filtrante (grava) y comenzó incluso a salir con concentraciones más elevadas que las de entrada. Conforme se fue elevando el caudal de aguas residuales, la capacidad de remoción del sistema para el fósforo fue disminuyendo, aunque siempre se obtuvo cierta capacidad de remoción, con un máximo de 9.5 mg/L en el efluente solo en una ocasión y un mínimo de 0.66 mg/L. El promedio de valores obtenidos en el efluente para ortofosfatos fue de 3.7 mg/L, cuando la Norma Oficial marca como límite máximo permisible 5 mg/L., por lo que, a pesar de todo, en la mayoría de los casos se cumple con la Norma Oficial de descargas. La razón de la baja remoción del fósforo pudiera estar en relación a la baja movilidad de este elemento en el suelo, -algo que todo buen agricultor conoce y toma en cuenta-, fenómeno que conlleva a la saturación del medio, es decir, la grava, la cual retiene el mayor porcentaje del fósforo. Esto pudiera ser objeto de una investigación posterior: como hacer mas disponible el fósforo para las plantas, mejorando así su captación, y por lo tanto, su remoción de las aguas efluentes.

Como se comentó en los resultados, para la remoción deseada de fósforo con un caudal de 200 L/día, en base a las ecuaciones de diseño, se requeriría un área mínima de 6.7 m² y para un caudal de 450 L/día se requeriría de un área mínima de 15 m², es decir, con una demanda, como fue el caso de la casa prototipo en Sacatierra, de 450 L/día de agua residual. En síntesis, se requeriría un área de aproximadamente 1.5 m²/habitante.

Para lograr mantener el sistema en óptimas condiciones, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Favorecer el contacto del agua con la comunidad microbiana, con la capa de residuos de vegetación, y con el sedimento.
- Favorecer también que el flujo alcance lo más posible todas las partes del entramado de raíces.
- Mantener un ambiente saludable para los microorganismos
- Impulsar un crecimiento vigoroso de vegetación mediante podas.

Además se comprobó la eficiencia tanto del material de empaque del Biofiltro como del sistema de Entramado de Raíces en su conjunto.

En relación con las especies de plantas probadas, es evidente que los Papiros fueron los más eficientes, y con una significativa intervención en la remoción, debido a lo profundo de sus raíces, su capacidad de propagación, su resistencia, su amplia estrategia fotosintética, su adaptabilidad, su robustez y su capacidad de beneficiar a otras plantas, por lo que se recomienda que el sistema se diseñe con una buena proporción de papiros, y como complemento, ornamentales como el Alcatraz (*Zantedechia Aethiopica*), la Hoja Elegante (*Alocasia*), el Jengibre Mariposa (*Hedychium coronarium*), el Ave del Paraíso (*Strelitzia reginae*), los Platanillos (*Heliconiaceae*) y la Cuna de Moisés (*Spathiphyllum wallisii*). El Lirio Persa resultó tener poca capacidad de adaptabilidad, por lo cual no se recomienda. Es recomendable además que los Papiros se planten antes para que puedan darle sombra a las plantas ornamentales.

Otro de los beneficios derivados de este sistema, y de vital importancia, es la disminución del terreno requerido. Para el caso de los humedales construidos, se tiene reportado que requieren

de un área aproximada de entre 1 y 2 m²/habitante. Con el sistema combinado probado en este estudio esta área se disminuye a 4.2 m² por 10 habitantes, es decir, se reduce a 0.42 m²/habitante.

Además de lo anterior, en este trabajo se pudo constatar la importancia de apreciar las tecnologías alternativas o de bajo impacto, apropiadas para las necesidades y el contexto de la zona de estudio, desde la premisa de que la tecnología no solo debe verse desde el punto de vista tecnológico y de una mayor eficiencia, sino que es necesario integrar, en todo proyecto de este tipo, y considerados en su justa dimensión, factores culturales, sociales, económicos, políticos, ambientales, etc., así como priorizar realidades y necesidades concretas.

La problemática de la subcuenca del Río Apatlaco comprende múltiples factores: económicos, sociales, ecológicos, hidráulicos, tecnológicos y regulatorios, entre otros. Por lo tanto, para realizar un programa de saneamiento efectivo, cada uno de los actores debe estar consciente de sus atribuciones y responsabilidades. Solamente con la participación de los involucrados y cuando se valore la importancia del entorno, será posible mantener y mejorar los niveles de calidad de vida de los habitantes.

Es por esto que es necesario considerar la zona de estudio como un sistema complejo, en el que se debe propiciar que los diversos actores converjan, desde sus intereses, en un punto común, en armonía con su entorno. Para ello es necesario generar una plataforma participativa con miras al desarrollo local incluyente, que involucre la correlación de diversas instituciones en procesos participativos novedosos; con alianzas entre sectores del estado y de la iniciativa privada, enmarcados en los principios del desarrollo sustentable.

La educación es un factor elemental, desde la lógica de guiar para que las comunidades mismas solucionen sus problemas y no dependan de otros, ya que, a menos que se cree la conciencia en la gente de que esa necesidad debe ser cubierta, no se producirá la demanda. Y es la demanda, la que generará los mecanismos que abrirán o no, las puertas de entrada a las nuevas tecnologías.

Es por todo lo anterior que, con el uso de tecnologías alternativas, como es el caso del **sistema combinado de biofiltración sobre lecho orgánico y humedal tipo entramado de raíces**, se debe fomentar una visión integradora, un diagnóstico realista, aumentar la confianza de los

actores involucrados basándose en mecanismos o herramientas que impulsen el uso adecuado y el saneamiento del agua en la zona, adecuarse a las realidades en que se vive, a los medios y a los recursos propios de la zona.

El aporte de esta tesis a la restauración ecológica consistiría en que el sistema combinado de biofiltración y humedal tipo entramado de raíces es una herramienta útil para mejorar la calidad del agua que reciben los cauces naturales y disminuir las descargas puntuales y directas a los ríos y arroyos.

Pero sobre todo, es necesario ir tomando responsabilidad y así partir de lo posible para lograr lo deseable.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar el estudio monitoreando caudales más grandes para así identificar la capacidad límite del sistema.

Emplear tezontle como medio de soporte en el ER ya que, debido a su elevada porosidad permite una mayor área para la formación de la película microbiana y la retención de fósforo.

Integrar tecnologías como las “bicybombas” para así no depender de un suministro eléctrico y lograr un manejo integral.

La hermana agua, que es utilísima, preciosa, casta y humilde,

nos da la vida

San Francisco de Asis

10. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, B. S. 1990. Dimensiones Ecológicas del Estado de Morelos. Informe CRIM-UNAM. Cuernavaca, Mor. México.
- Aguilar, B. S. 1998. Ecología del Estado de Morelos. Informe CRIM-UNAM. Cuernavaca, Mor. México.
- Alvarez-Castañeda, 1996. Los mamíferos del estado de Morelos. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Cuernavaca, Morelos. p.211.
- Arias, C. 1997. Alternative for phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. Aarhus University. Denmark
- Arias, C. 1998. Experiencias con Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Descentralizados y pequeñas comunidades en Dinamarca. Aarhus University. Denmark
- Arias, C. 2004. Phosphorus removal in constructed wetlandss: Can suitable alternatives media be identified). 9th International Conference on Wetland Sistema; Avignon, France.
- Baland, J.M. y J.P. Platteau.1996. *Halting Degradation of Natural Resources*, FAO. Bélgica.
- Batlloori Guerrero A. 1994. *Evaluación Ecológica y Social de las Barrancas de Cuernavaca, Morelos*: La biofiltración en lecho orgánico: Una novedosa alternativa para el tratamiento de efluentes industriales y pequeños municipios. II Congreso y exposición Internacional del Medio Ambiente. Programa Tecnología Intermedia. Universidad de Santiago de Chile Abril 13-15. México D.F., México. Bello Andrés..
- Berger, J. 2006. “Eso que no se pregunta” en *Con la esperanza entre los dientes*, México, La Jornada Ediciones-Editorial Ítaca. Las barrancas de Morelos, enfoque educativo para un cambio de comportamiento en los moradores. CRIM-UNAM. Cuernavaca, Morelos.
- Bonilla-Barbosa, J y A. Novelo. 1995. Manual de identificación de plantas acuáticas del parque nacional Lagunas de Zempoala, México. Serie Cuadernos No. 26. Instituto de Biología. UNAM, D.F.
- Bonilla-Barbosa, J. y J. L. Villaseñor, 2003. *Catálogo de la flora del estado de Morelos*. Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos, México, 2003, p 129.
- Brikké François. Director Regional de WSP para América Latina y el Caribe. “*Biofiltro: una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades*”. Wather and sanitation program (WSP). Informe regional sobre la Evaluación 2000 en la región de las Américas. Agua Potable y Saneamiento. Estado Actual y Perspectivas, Washington D.C. Abril 2006.
- Cervantes Quiroz A. L. 2007 *Sistemas Combinados para el Tratamiento de Aguas Residuales para Viviendas Unifamiliares*; Trabajo de investigación III, Postgrado en Ingeniería Ambiental, UNAM, D.F.
- Comisión Nacional del Agua, 2006. *El agua en el estado de Morelos*.Gerencia Regional Balsas, subgerencia Regional Técnica. Cuernavaca, Morelos.
- CONAGUA.2002. *Determinación de la Disponibilidad de agua en el Acuífero Cuernavaca, Morelos*. Subdirección General técnica; Gerencia de Aguas subterráneas; Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrológica; México, D.F.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

- CONAGUA.2005. Saneamiento, calidad del agua y aspectos de salud. En *Estadísticas del agua en México 2005 – Síntesis*. [en línea].México, D.F.
- CONAGUA. 2005. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento a Diciembre de 2004, [http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Organismos/Central/Estadisticas/Subsector 2004.htm](http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Organismos/Central/Estadisticas/Subsector%2004.htm).
- CONAGUA. 2008. Estadísticas del Agua. Edición impresa. México, D.F.
- CONAGUA. 2009. Catálogo General de Precios Unitarios para la Construcción de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado. México, D.F.
- CONABIO-UAEM 2006. Estudio de Estado: Diagnóstico de la Biodiversidad de Morelos. Contreras, T. Jaramillo, F. y Boyas, J.C. Editores. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad y Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Morelos, México. p 155.
- Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente.2007. Programa de Saneamiento Integral de la Cuenca del río Apatlaco. Consejo de Cuenca del río Balsas. Presentación Oaxaca.
- Crites, R.W. Gunther, D.C.; Kruzic, A.P.; (1991); Constructed Wetlands and aquatic plant system for municipal wastewater treatment.; EPA-625/1-88.022. u.s. Environment Protection Agency: Cincinnati, Ohio
- Curso IMTA-CEA.2008. Estudios de pre-factibilidad de proyectos de agua residual. México, D.F.
- Dahab M.F.; Surampalli, R.Y. 2001. Subsurface constructed wetlands treatment in the plains: five years of experience. Water Science and Technology. USA.
- Ministerio del Medio Ambiente. 2005. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas; Evolución del contenido de humedad y tasa de evaporación en humedales: Aplicación a la laguna de Gallocanta. Zaragoza, España.
- Guzmán. D. 2005. La participación social desde un enfoque comunitario en el caso de las microcuencas del estado de Morelos. UAEM. Cuernavaca, Morelos.
- Estrada, A. 1997. Cuernavaca y sus Barrancas. México. Ayuntamiento Constitucional de Cuernavaca.
- Estevez S.F. 2005. *Diseño y explotación de sistemas de depuración de aguas residuales en pequeños núcleos y comunidades*, Asociación nacional de químicos españoles, Agrupación territorial de Castilla la Mancha, Sección técnica de medio ambiente.
- Fernández J. 2005.. Catedrático de la UPM. Informe Layman. “Nuevos filtros verdes con macrofitas en flotación “*Macrophytes*”. Informe final 01/10/2002 – 30/09/2005 (LIFE02 ENV/E/182). Litoral Mediterráneo. Ayuntamiento de Lorca, Fundación Global Nature, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)..
- Figueroa Gallegos J.A.2006. “Evaluación de *Zantedeschia Aethiopica* para el tratamiento de aguas residuales porcícolas”; XVI Congreso Nacional de Hidráulica. México, D.F.
- Galindo Escamilla A. 2006. *Problemática para el establecimiento de seis especies nativas de selva baja caducifolia en la recuperación de un sitio perturbado en las Barrancas del río Tembembe*; Tesis de Maestría; Instituto de Ecología, UNAM.
- García Barrios R. 2005. *Proyecto de restauración de ecosistemas de la zona de Cuentepec, Morelos*. Gaceta Geográfica. Mayo de 2005. Órgano Informativo del Instituto de Geografía de la UNAM. Año 1. No. 2. México, D.F.
- García Barrios R. 2007.“ Rescatando el Salto de San Antón: Una historia reciente de construcción institucional”; Economía Mexicana; Nueva Epoca; vol. XVI, num 2. México, D.F.

- García Barrios, R. 2007. Las Barrancas de Cuernavaca. Informe CRIM-UNAM. Cuernavaca, Morelos.
- García-Barrios, R. 2007. Rescatando el Salto de San Antón: Una historia reciente de construcción institucional. Economía mexicana. Nueva Época; volumen XVI, numero 2, segundo semestre de 2007. México, D.F.
- García, L. 2006. Decoloración fúngica de efluentes industriales con colorantes azo en sistemas de biofiltración con diferentes empaques orgánicos. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, D.F.
- García J, Ruiz A, Junqueras X, 1997. *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales construidos*, en Tecnología del Agua No. 165, pg 58-65. México. D.F.
- García, J. R. (Coordinador) 2007. Informe del Macro-proyecto Manejo de ecosistemas y desarrollo humano, estudio de la cuenca de los ríos Apatlaco-Tembembe, Morelos.
- García, F. 2007. Estudio preliminar de la flora de las barrancas de Cuernavaca, en Informe del Macroproyecto Manejo de ecosistemas y desarrollo humano, estudio de la cuenca de los ríos Apatlaco-Tembembe, Morelos.
- Gaceta IMTA. Junio 2008. No. 14. Plan Estratégico del Río Apatlaco.
- Goin P. 1997. "Human nature's River", Geographical Review, Vol 87 No. 1 American Geographical Society.
- Garzón-Zúñiga, M. A..2001. Mécanismes d'enlèvement de l'azote du lisier de porc par biofiltration aérée sur tourbe. Thesis de Doctorado. Université Laval, Québec, Canadá.
- Garzón-Zúñiga, M.A. .2004.. La Biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de agua residual industrial. Memorias del XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). San Juan Puerto Rico.
- Garzón-Zúñiga, M. A. 2004.. La biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de agua residual industrial. En Memorias del XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), San Juan, Puerto Rico.
- Garzón Zúñiga. M.A.2008. Resumen Ejecutivo: Estudio de Tres Sistemas para Tratamiento de Agua Residual Doméstica en pequeña comunidades (1 Etapa). Jiutepec, Morelos.
- Garzón-Zúñiga-Lessard P. Buelna.2003. Determination of the hydraulic residence time in a trickling biofilter filled with organic matter. XII Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Guanajuato, México.
- Guzmán B.C. 1997. Flora y vegetación acuáticas vasculares del municipio de Coatlán del Río, Morelos. Tesis, Licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas. UAEM, Cuernavaca, Morelos.
- Hobbs R.J. .2001." Restoration Ecology: Repairing the Earth's Ecosystems in de New Milenium!; Society for Ecological Restoration.
- JIMÉNEZ Cisneros, B. L.2001 La contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada. LIMUSA, FEMISCA, p. 141 3 *Ibidem*, p. 137.138. México. D.F.
- Kadlec, R. Knight. 2000. Constructed Wetlands for Pollution Control Processes, Performance, Design and Operation ISBN: 9781900222051 Pages: 156 • Paperback.
- LANDA, Ávila J. J. 2001. Crónica Morelense Tomo IV memoria de ponencia: "Apuntes de Cuernavaca hasta 1999". Colegio de Cronistas del Estado de Morelos A.C. Cuernavaca, Mor. Instituto de Cultura de Morelos

Martínez M 1989. *Depuración de aguas con plantas emergentes*, en Hojas Divulgadoras, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Metcalf & Eddy. 1995. *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*, 3ª Ed, McGraw-Hill.

Paz M. F. 2005. ; *Cuentepec, Morelos, reporte técnico*; CRIM- UNAM. Cuernavaca, Morelos.

Pohle, O. 2006. Estudio Geohidrológico de la Microcuenca de San Antón. En García, J. R. (Coordinador) 2007. Informe del Macroproyecto Manejo de ecosistemas y desarrollo humano, estudio de la cuenca de los ríos Apatlaco-Tembembe, Mor.

PROMEXICO-Gobierno del Estado de Morelos. 2008 Ponencia: Saneamiento Integral de la Cuenca del río Apatlaco

Escalante C, A. 2003. Tecnologías y usos de las aguas residuales. Centro de Investigaciones de Posgrado. UASLP. San Luis Potosí.

Salsona, F. 2002.. Tecnología, Tecnología Apropriada y el Factor Social, CEPIS-OPS, Lima Perú.

Acevedo, S. 2003.. Tecnologías Apropriadas para el Desarrollo Sostenible. Estado de Arte en los países del convenio

Porras Luque, J.J. 1999. Consideraciones medioambientales en la corrección y estabilización de cursos fluviales de la cuenca del Ebro. *Revista Montes*, 56:85-93. Madrid.

Moeller G.E.; Garzón M.A. 2003. Desarrollo de tecnologías no convencionales para el tratamiento de efluentes de la fabricación de colorantes de tipo azo. Anuario IMTA. Jiutepec, Morelos.

NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.)

Rivas, H.A.. 2006. Experiencias exitosas del uso de humedales construidos para la protección de la calidad del agua del lago de Pátzcuaro. En memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Guadalajara, Jalisco.

Sánchez Romero R. 2007. *Propuesta para restaurar el ecosistema de un río de montaña; Tembembe, Morelos*; Tesis de Maestría; Instituto de Ecología, UNAM. México, D.F.

Seoanez C. M. 1995. *Aguas residuales urbanas: Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento*, Mundi Prensa. México, D.F.

Soares D, Salazar H. 2006. Mujeres y Tecnologías; Aproximaciones metodológicas desde Chiapas. SEMARNAT-IMTA-CONACYT; Primera Edición, IMTA. Jiutepec, Morelos,

Sterba O. J. Mekotova .1997. "Floodplain and River Restoration"; Floodplain Forests Special Issue. Global Ecology and Biogeography Letters, 6, pp. 331-337

Suarez, M.A. .2003. *Memoria de un pueblo. Proceso de restauración comunitaria en San Antón, Cuernavaca*, México, CRIM-UNAM. México. D.F.

Sworobuk, J.E.; Law C.B.; Bissonnette, G.K. 1987. *Assessment of the bacteriological quality of rural groundwater supplies in Northern West Virginia*. Water, Air, Soil Pollut., 36: 163-170.

Thalasso Frederic y Pineda Olmedo Raúl. Biofiltración: Tratamiento biológico de aire contaminado XXX Aniversario de Biotecnología y Bioingeniería. CINVESTAV.

U.S. Environmental Protection Agency, *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: A Technology assessment*, EPA, 1993.

Viana- Lases, J. 1999. Flora y vegetación acuática vascular de la sub-cuenca del Alto y Bajo Amacuzac, Morelos, México. Tesis, Licenciatura, Maestría en ciencias. Facultad de ciencias. UNAM, México, D.F.

Zurita Martínez Florentina; 2008. “Tratamiento de aguas residuales domesticas por humedales artificiales de tipo sub-superficial con plantas de ornato de interés comercial”, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño para el Estado de Jalisco, A.C.; Postgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología (PICYT).

http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Estadisticas/Central/Cap_6_EAM2005.pdf

http://www.semarnat.gob.mx/ssfna/acercaSSFNA/PW/CD_NOMS/noms_proy_nmx_semarnat/NOM_AGUA_ECOL/NOM-001-ECOL.pdf