

Mon
628.3
C955
2013

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DE UN BIOFILTRO UBICADO EN EL MUNICIPIO DE LA
LIBERTAD CHONTALES**

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

Br. ALDO DONALD CRUZ HERRERA

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

TUTOR:

ING. LARISA KORSAK

MANAGUA, NICARAGUA 2013

OPINION DEL CATEDRATICO GUIA

El trabajo de Diploma titulado "***Evaluación de un biofiltro ubicado en el municipio de La Libertad, Chontales***", realizado por el bachiller Aldo Donald Cruz Herrera, es un estudio aplicado en el campo ambiental, los resultados del cual contribuyen a la reducción de contaminación del agua, recurso natural que debemos proteger para nosotros y las generaciones venideras.

El trabajo consistió en evaluar el biofiltro que trata aguas grises de la comunidad, se encuentra funcionando, pero se desconocía su eficiencia, dado que durante la construcción fue redimensionado por las limitaciones económicas, pero sin justificación técnica alguna.

Para desarrollar el presente estudio, el bachiller Aldo Cruz trabajó en estrecha colaboración con la Alcaldía de La Libertad y el Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA) de la UNI, demostrando en todo momento la responsabilidad y dedicación al trabajo, logrando al final obtener resultados muy importantes que sin duda serán útiles a los que dirigen la alcaldía de La Libertad.

Ing. Larisa Korsak
Profesora Titular UNI
Tutora del estudio

AGRADECIMIENTO

A Dios. El director de mi vida, quien me ha dirigido en cada paso que doy, quien me acompañó desde el principio en este sueño, mi ayuda, mi fuerza y mi valor para cada día levantarme y hacer lo que debo hacer. Él el perfecto Padre, amigo y consejero.

A Mi familia. En especial a mi mamá Dominga Herrera y a mi papá Donald Cruz por su confianza en mí, por cada sacrificio y lucha durante todo este tiempo, que hoy dan fruto. Quienes con sus consejos, humildad y valores formaron en mi un hombre de bien.

A mi tutora Ing. Larisa Korsak por ayudarme en el desarrollo de este estudio monográfico, así mismo al equipo del laboratorio de aguas residuales del PIENSA- UNI, por su apoyo y colaboración.

A cada persona que de una u otra manera me ayudaron a seguir, aun cuando mis esperanzas se desvanecían, a todos GRACIAS.

DEDICATORIA

A DIOS por ser mi amigo, mi fuerza, mi fe y confianza en todo, brindándome su sabiduría, inteligencia y haciéndome perseverante hasta concluir cada proyecto emprendido durante esta historia de 22 años.

A mis padres, a quienes debo ser quien hoy soy, pues con sus consejos e instrucciones y amor han hecho de mí un ser humano agradecido, dispuesto a servir a esta nación, la cual amo y doy gracias a Dios por el privilegio de haber nacido en ella.

A cada persona que con su ejemplo y motivación han influido en mi desarrollo como amigo, estudiante, profesional y en general como ser humano.

RESUMEN

Este estudio fue realizado con el objetivo de evaluar el funcionamiento del biofiltro ubicado en La Libertad, Chontales, específicamente en el barrio Nueva Esperanza, el cual brinda tratamiento de las aguas grises y pluviales de esta comunidad. Desde su puesta en marcha en 2011, el filtro no ha sido evaluado, sobretodo tomando en cuenta que debido a las limitantes económicas, éste fue reducido de tamaño durante la etapa de construcción, o sea fue redimensionado alterando el diseño original.

Dicha evaluación incluyó la realización de muestreos para la caracterización de las aguas, así como valoración de los parámetros de diseño y operación del redimensionado biofiltro. Los resultados demostraron moderados niveles de contaminación de aguas grises, una alta eficiencia de remoción (90%) de sustancias orgánicas en el biofiltro, los valores obtenidos superan los porcentajes citados en otros estudios similares en Nicaragua. Consecuentemente, el efluente cumple con los parámetros establecidos en el Arto. 23 del Decreto 33-95. Se encontró que el filtro recibe un caudal por debajo del estimado por lo que los tiempos de retención son muy largos. Se confirmó una relación proporcional entre la eficiencia del proceso y largo tiempo de retención en el sistema.

A partir de las dimensiones del biofiltro existente se calculó su área, el caudal que puede recibir según las dimensiones actuales y el tiempo de retención; los valores se compararon con los recomendados en la literatura. Se valoró el estado de mantenimiento de la unidad. Con base en los hallazgos, se realizaron recomendaciones de mejoras para el mantenimiento del biofiltro; además de la necesidad de integrar al sistema un pre tratamiento (desarenador), para evitar problemas de obstrucción que podrían presentarse en época lluviosa.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN	iii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivo General	2
2.2 Objetivos Específicos.....	2
III. MARCO TEÓRICO.....	3
3.1 Aguas grises y pluviales.....	3
3.2 Caracterización de las aguas residuales.....	3
3.2.1 Características fisicoquímicas de las aguas residuales.....	4
3.3 Tratamiento de aguas residuales	6
3.3.1 Pretratamiento	7
3.4 Características del biofiltro.....	7
3.4.1 Generalidades	7
3.4.2 Biofiltro de flujo subsuperficial	8
3.4.3 Componentes principales de un biofiltro.....	9
3.5 Mecanismos de remoción en un biofiltro.....	11
3.6 Impacto ambiental al utilizar un biofiltro para aguas residuales	14
3.7 Criterios de diseño de biofiltros de flujo horizontal.....	14
3.8 Descripción del biofiltro de La Libertad, Chontales	18
IV. DISEÑO METODOLÓGICO.....	20
4.1 Ubicación del biofiltro	20
4.2 Tipo de investigación	20
4.3 Puntos de muestreo	20
4.4 Periodo y frecuencia de muestreo	21
4.5 Caracterización de los parámetros de aguas residuales y determinación del caudal de entrada	21
4.6 Determinación de la eficiencia de remoción del biofiltro	22
4.7 Determinación de la calidad del efluente con base en el Decreto 33-95 .	22
4.8 Evaluación de los criterios de diseño y operación del biofiltro	22
4.9 Proponer alternativas para mejorar el mantenimiento del biofiltro	22

V.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	23
5.1	Caracterización de los parámetros de aguas residuales y determinación del caudal de entrada	23
5.2	Determinación de la eficiencia de remoción del biofiltro	25
5.3	Determinación de calidad del efluente con base al Decreto 33-95	26
5.4	Evaluación de los criterios de diseño y operación del biofiltro	26
5.5	Proponer alternativas para mejorar el mantenimiento del biofiltro	28
VI.	CONCLUSIONES.....	29
VII.	RECOMENDACIONES	30
VIII.	NOMENCLATURA	31
IX.	BIBLIOGRAFÍA	32
X.	ANEXO	34
	ANEXO A Métodos usados en la caracterización del Agua residual.....	34
	ANEXO B Otras Tablas y Figuras	40
	ANEXO C Cálculos	45
	ANEXO D Arto. 23, Decreto 33-95.....	47
	ANEXO E Imágenes	49
	ANEXO F Planos del Biofiltro La Libertad.....	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Valores para disposición de aguas residuales domésticas	3
Tabla 3.2	Variación del fósforo contenido en aguas residuales según pH	5
Tabla 3.3	Remociones obtenidas en biofiltro de Masaya	14
Tabla 3.4	Materiales usados como sustratos	16
Tabla 3.5	Resumen de parámetros de diseño Biofiltro de flujo horizontal.....	17
Tabla 4.1	Descripción de puntos de Muestreo	20
Tabla 4.2	Parámetros fisicoquímicos analizados del biofiltro	21
Tabla 4.3	Criterios a evaluar en el biofiltro	22
Tabla 5.1	Valores de la media de los parámetros	23
Tabla 5.2	Remociones obtenidas en el biofiltro	25
Tabla 5.3	Calidad del efluente con base al Decreto 33-95	26
Tabla B.1	Caracterización de los muestreos y el Decreto 33-95	40
Tabla B.2	Media de los tres muestreos realizados para afluente	41
Tabla B.3	Media de los tres muestreos realizados para efluente	41
Tabla B.4	Porcentajes de remoción alcanzados	41
Tabla D.1	Arto. 23 Disposición de Aguas Domésticas	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Sección longitudinal de un biofiltro de flujo horizontal	9
Figura 3.2	Funcionamiento del lecho filtrante	10
Figura 3.3	Metabolismo del nitrógeno	12
Figura 3.4	Tren de tratamiento	19
Figura 4.1	Ubicación del Biofiltro	20
Figura 5.1	Comportamiento del Caudal de entrada muestreo 1	24
Figura A.1	Equipos usados en el método	36
Figura A.2	Prueba de Fosforo total.....	38
Figura A.3	Determinación sólidos sedimentables.....	38
Figura A.4	Determinación de SST	39
Figura B.1	Comportamiento de la DQO durante los muestreos	43
Figura B.2	Comportamiento de la DBO durante los muestreos.....	43
Figura B.3	Comportamiento del N total durante los muestreos	44
Figura B.4	Comportamiento del F total durante los muestreos.....	44
Figura E.1	Toma de muestras de efluente.....	49
Figura E.2	Medición de solidos Sedimentables. (1) Agua de afluyente.....	49
Figura E.3	Winkler para DBO	50
Figura E.4	Campana de digestión	50
Figura E.5	Equipos usados en solidos suspendidos.....	50
Figura E.6	Cristalería usada en los análisis.....	51
Figura E.7	Titulación para pruebas de laboratorio	51
Figura E.8	Tubería de entrada al Biofiltro	51
Figura E.9	Vista 3D de un biofiltro	52
Figura E.10	Biofiltro y su vegetación	52

I. INTRODUCCIÓN

El agua es el líquido esencial para la vida, gracias a ésta se pueden realizar actividades de gran importancia en la vida cotidiana, sin embargo, al ser utilizada se mezcla con diferentes tipos de sustancias y microorganismos, que deben ser removidos antes de su disposición al ambiente natural, ya que la presencia de éstos constituye el peligro de contaminación de fuentes receptoras (ríos, lagunas, lagos, mares). Las aguas grises generadas en las poblaciones rurales de los países en vías de desarrollo muchas veces no reciben un tratamiento para evitar la contaminación del medio circundante. Muchas veces esto se debe a motivos económicos ya que los sistemas usados para tal fin suelen ser muy costosos.

En 1996 Nicaragua inicio la implementación de la tecnología de biofiltros, en busca de tecnologías que brinden alternativas viables tanto técnica como económicamente para el tratamiento de aguas residuales, sobre todo en poblaciones medianas y pequeñas. Este tipo de sistemas son conocidos por altas remociones de contaminantes y bajo costos de operación y mantenimiento. También, suelen ser muy estéticos y generan un ambiente sano, ya que evitan la proliferación de mosquitos y el contacto del humano o animales con las aguas en tratamiento.

El propósito de este estudio fue evaluar el biofiltro del barrio Nueva Esperanza en La Libertad, Chontales, el cual fue diseñado y financiado para su construcción por el gobierno de Holanda a través de Lettinga Associates Foundation (LeAF), for environmental protection and resource conservation. Dicho biofiltro fue implementado con el objetivo de dar tratamiento a las aguas grises y pluviales del barrio y evitar de esta manera las enfermedades provocadas por las charcas generadas por lluvias, aguas grises estancadas y además, reducir la contaminación del río Mico.

Por motivos económicos el biofiltro fue redimensionado durante la etapa de construcción, provocando cambio de algunos criterios que se consideraron en el diseño de la LeAF; debido a esto la alcaldía de La Libertad solicitó a la Universidad Nacional de Ingeniería la evaluación del biofiltro. La evaluación consistió en determinar las características del agua a la entrada y salida de la unidad, así como la eficiencia en la remoción de contaminantes a través de la reducción de parámetros como la DBO, DQO, SST, N total y F total. También, se incluyó la determinación de parámetros de diseño y operación con las dimensiones tomadas durante la construcción. Se han diagnosticado algunos problemas de mantenimiento y se hicieron propuestas de mejoras.

Este es el primer estudio realizado con el biofiltro del barrio Nueva Esperanza después que entró en operación hace dos años. La alcaldía no cuenta con un informe que describa características técnicas del filtro redimensionado, por lo que se espera que este estudio les sea de utilidad.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- Evaluar el funcionamiento del biofiltro redimensionado del barrio Nueva Esperanza en municipio de La Libertad, Chontales.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicoquímicamente las aguas residuales del afluente y efluente del biofiltro y determinar el caudal de entrada.
- Determinar la eficiencia de remoción de los contaminantes orgánicos en el biofiltro.
- Determinar el cumplimiento de la calidad del efluente tratado con base en el Arto. 23 del Decreto 33-95.
- Evaluar los principales criterios de diseños y operación del biofiltro redimensionado.
- Realizar propuestas para mejorar el mantenimiento en el biofiltro.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Aguas grises y pluviales

Las aguas grises son las aguas que salen de fregaderos, de los baños, o de lavaderos; no incluyen aguas negras, que contiene muchos más patógenos y bacterias. Típicamente las aguas grises contienen nitratos, fosfatos, jabones, sal, bacterias, espumas, partículas de alimento, materia orgánica, sólidos suspendidos, perfumes y colorantes. La adición de las agua grises a los cuerpos de agua en la superficie puede causar desequilibrios de pH, la demanda biológica de oxígeno (DBO) e incremento en la turbidez.

Las aguas pluviales son generadas por las lluvias y estas se mezclan en las alcantarillas y causes con las aguas grises formando así una mezcla, la cual debe ser tratada para luego ser dispuesta en las fuentes receptoras.

Según el Decreto 33-95 en su Arto. 23 las aguas residuales domésticas deben de cumplir con los valores mostrados en la Tabla 3.1 que sigue a continuación.

Tabla 3.1 Valores para disposición de aguas residuales domésticas

Parámetros	Rangos y Límites máximos permisibles < 75 000 habitantes
DBO	110
DQO	220
Sólidos suspendidos Totales	100
Grasas y Aceites	20
Sólidos sedimentables	1.0
pH	6-9

Fuente: Disposición de Aguas residuales, Decreto 33-95 Arto.23

3.2 Caracterización de las aguas residuales

El agua es caracterizada a través del muestreo y análisis de las mismas en el laboratorio, para ello se suelen tomar parámetros físico-químicos y biológicos. A continuación se presentan algunos de los cuales corresponden a la evaluación realizada.

3.2.1 Características fisicoquímicas de las aguas residuales

Demanda biológica de oxígeno (DBO):

Es uno de los parámetros de mayor importancia en el estudio y caracterización de las aguas no potables. La determinación de DBO además de indicar la presencia y biodegradabilidad del material orgánico presente, es una forma de estimar la cantidad de oxígeno que se requiere para estabilizar el carbono orgánico y de saber con qué rapidez este material va a ser metabolizado por las bacterias que normalmente se encuentran presentes en las aguas residuales. La importancia de este parámetro requiere de ciertos cuidados y atención en la técnica analítica, ya que por ser un proceso biológico el manejo y tratamiento de la muestra es delicado. El método estándar consiste en tomar un pequeño volumen de la muestra a analizar, este pequeño volumen debe ser representativo del total de la muestra, por lo que ésta deberá estar completamente homogenizada.

Demanda química de oxígeno (DQO):

Es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico. La demanda química de oxígeno se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales, empleando un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. Bajo condiciones de temperaturas elevadas; para facilitar la oxidación de determinados tipos de compuestos orgánicos es preciso emplear un catalizador.

La DQO de un agua residual suele ser mayor que su correspondiente DBO, siendo esto debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química frente a los que se oxidan por acción biológica.

Sólidos suspendidos totales (SST):

Los sólidos en suspensión son aquellos que se encuentran en el agua sin estar disueltos en ellas, pueden ser sedimentables o no y para determinar su cantidad en forma directa es complicado, para ello se calcula matemáticamente conociendo la cantidad de sólidos no sedimentables y de sólidos en suspensión y realizando una diferencia de estas dos medidas

Sólidos Sedimentables:

Los sólidos sedimentables se determinan como el volumen de sólidos en un litro de desechos que sedimentan después de una hora en un cono IMHOFF, los resultados se expresan en ml/L hora.

pH:

El pH (potencial de hidrógeno) es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. La acidez del agua corresponde a la presencia de anhídrido carbónico libre, ácidos minerales y sales de ácidos fuertes y bases débiles.

Temperatura:

Es un parámetro muy importante por su efecto en la vida acuática, en las reacciones, velocidades de reacción y en la aplicabilidad del agua a usos útiles. El oxígeno es menos soluble en el agua caliente que en la fría. Un cambio repentino en las temperaturas puede dar como resultado un alto porcentaje de mortalidad en la vida acuática. Las temperaturas elevadas pueden dar lugar al crecimiento indeseable de plantas acuáticas y hongos.

Fósforo:

Según Karl-Slevogt-Straße (citado en Delgadillo, Camacho, F.Pérez, & Andrade, 2010) en las aguas naturales el fósforo aparece en tres formas: ortofosfato inorgánico disuelto, compuestos orgánicos de fósforo disuelto y fósforo en partículas (ligado a la biomasa o depositado en partículas). La suma de los tres tipos de fósforo es considerada como el contenido total de fósforo (P total), que es un parámetro importante a considerar en las operaciones de las plantas de tratamiento de aguas.

La distribución de las especies de fosfatos es una función estricta del pH, como se puede ver en la Figura 5.1.

Tabla 3.2 Variación del fósforo contenido en aguas residuales según pH

Tipos de fosforo	pH			
	0-2.15	2.15-7.2	7.2-12.4	12.4-14
Fosfatos presentes	H ₃ PO ₄	(H ₂ PO ₄) ⁻	(HPO ₄) ⁻²	(PO ₄) ⁻³
Nombre común	Ácido fosfórico	Fosfato primario	Fosfato secundario	Fosfato terciario

Fuente: Crites & Tchobanoglous en Delgadillo et al. 2010

Estas formas de fosfatos proviene de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza (detergentes usados en lavadoras, vajilla, etc.) y fertilizantes y una pequeña cantidad se originan en forma natural.

El fósforo es esencial como nutriente para el desarrollo de diversos organismos por lo que la descarga de fosfatos en cuerpo de aguas pueden estimular el crecimiento, especialmente de organismos fotosintéticos en grandes cantidades, causando eutrofización de las aguas.

Karl-Slevogt-Straße (citado en Delgadillo et al. 2010) indica que el fósforo se determina por medio de dos procesos:

- Método con azul de molibdeno.
- Método con vanadato-molibdato (método amarillo).

En ambos casos, la captación de la muestra debe realizarse sin filtración previa para incluir todos los sólidos en el proceso de digestión. Los dos procesos se basan en la medición del ortofosfato mediante fotometría.

Nitrógeno:

En las aguas residuales urbanas el nitrógeno puede encontrarse principalmente en forma orgánica y en forma amoniacal, y en mucha menor cantidad como nitritos o nitratos. Mediante procesos de amonificación, por vía enzimática, las fracciones de nitrógeno en forma orgánica se transforman en formas amoniacaes, parte de las cuales son asimiladas por los propios microorganismos, que la incorporan a su masa celular.

En los humedales artificiales subsuperficiales (biofiltros) la eliminación del nitrógeno en forma amoniacal transcurre básicamente por dos vías principales.

- ✓ Asimilación por las propias plantas del humedal, con un 15-20% del nitrógeno amoniacal presente en las aguas a tratar.
- ✓ Procesos de nitrificación-desnitrificación.

Las formas amoniacaes se adsorben temporalmente sobre las partículas del sustrato filtrante de los humedales artificiales. Para liberar este amonio adsorbido, se precisa de la nitrificación de las formas amoniacaes, proceso que requiere el consumo de oxígeno. La nitrificación es un proceso autotrófico (la energía necesaria para el crecimiento bacteriano se obtiene de la oxidación de compuestos inorgánicos), por el que el nitrógeno amoniacal es transformado en nitrógeno nítrico. Para la eliminación biológica del nitrógeno se precisa que los procesos de nitrificación vayan seguidos de una etapa de desnitrificación, sin la presencia de oxígeno.

3.3 Tratamiento de aguas residuales

Un humedal construido para el tratamiento de las aguas grises por biofiltración es un humedal construido que elimina una cantidad significativa de contaminantes de las aguas grises antes de que desemboquen al agua subterránea, el río, o humedal natural. La adición de patógenos, de las bacterias, y de toxinas no-biodegradables al agua de la superficie puede ser evitada con este tratamiento biológico, y así promover un ecosistema más sano y condiciones más sanitarias. El sistema puede ser construido para una sola casa o un grupo de casas, típicamente con un costo bajo.

3.3.1 Pretratamiento

El objetivo del pretratamiento es la remoción de la mayor parte de los sólidos y materiales flotantes que se encuentran en el agua residual cruda y que pueden ocasionar problemas o disminuir la eficiencia en las siguientes etapas del tratamiento. Generalmente está conformado por una rejilla de retención de sólidos gruesos y un desarenador de limpieza manual, el cual podría también cumplir la función de trampa de grasa mediante la instalación de un bafle al final de la unidad. Normalmente se construyen dos desarenadores en paralelo para permitir el mantenimiento. (Cáceres & Fong, 2006)

3.4 Características del biofiltro

3.4.1 Generalidades

Definición: Según Cáceres & Fong (2006) el biofiltro es un sistema que imita a los humedales naturales (pantanos), donde las aguas residuales se depuran por procesos naturales. Los biofiltros son humedales artificiales de flujo subterráneo, diseñados para maximizar la remoción de los contaminantes que se encuentran en las aguas residuales. Los biofiltros son pilas de poca profundidad rellenas con un material que sirve como lecho filtrante, en cuya superficie se siembran plantas de pantano, y en las que las aguas residuales pretratadas fluyen en sentido horizontal o vertical.

Esta tecnología se comenzó a investigar a nivel experimental en Alemania en la década de 1960, aunque no fue hasta en las dos últimas décadas del siglo pasado que comenzaron a utilizarse para el tratamiento de aguas residuales generadas por pequeños núcleos poblacionales en países de todos los continentes del mundo. En la región centroamericana, los biofiltros comenzaron a ser utilizados en el año 1996, con la construcción de una planta piloto en la ciudad de Masaya, Nicaragua.

En función de que el agua a tratar circule a través de los humedales superficialmente (por encima del sustrato) o de forma subterránea (a través del sustrato), los Humedales Artificiales se clasifican en:

- Humedales Artificiales de Flujo Superficial.
- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

Para este estudio se basará en conocer más sobre los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.

3.4.2 Biofiltro de flujo subsuperficial

En estos humedales el agua a tratar circula exclusivamente a través de un material granular (arena, gravilla, grava), de permeabilidad suficiente, confinado en un recinto impermeabilizado, y que sirve de soporte para el enraizamiento de la vegetación, que habitualmente suele ser carrizo.

Los humedales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSS) son generalmente instalaciones de menor tamaño que los de Flujo Superficial, y que en la mayoría de los casos se emplean para el tratamiento de las aguas residuales generadas en núcleos de población de menos de 2 000 habitantes, es más común en comunidades rurales. Este tipo de humedales presenta ciertas ventajas con respecto a los de Flujo Superficial, al necesitar menos superficie de terreno para su ubicación y al evitar los problemas de aparición de olores y de mosquitos, al circular el agua subsuperficialmente. Igualmente presentan una menor respuesta ante los descensos de la temperatura ambiente. Como desventaja cabe citar su mayor coste constructivo, motivado principalmente por el coste de adquisición y colocación del sustrato filtrante, y de los mayores riesgos de colmatación de dicho sustrato. Según la dirección en la que circulan las aguas a través del sustrato, los HAFSS se clasifican en Horizontales y Verticales.

Un biofiltro de flujo horizontal: consta de pilas rectangulares con profundidades que oscilan entre 60 y 100 cm, con un relleno de material grueso (5 a 10 cm de diámetro) en las zonas de distribución (entrada) y recolección (salida). La fracción principal del lecho filtrante, ubicada entre las zonas de material grueso, es homogénea y más fina, normalmente de 0.5 a 15 mm de diámetro.

En este tipo de biofiltro, las aguas residuales pretratadas fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, con una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta llegar a la zona de recolección del efluente. Durante este recorrido, que dura de tres a cinco días, el agua residual entra en contacto con zonas aeróbicas (con presencia de oxígeno) y anaeróbicas (sin presencia de oxígeno), ubicadas las primeras alrededor de las raíces de las plantas, y las segundas en las áreas lejanas a las raíces.

Durante su paso a través de las diferentes zonas del lecho filtrante, el agua residual es depurada por la acción de microorganismos que se adhieren a la superficie del lecho y por otros procesos físicos tales como la filtración y la sedimentación.

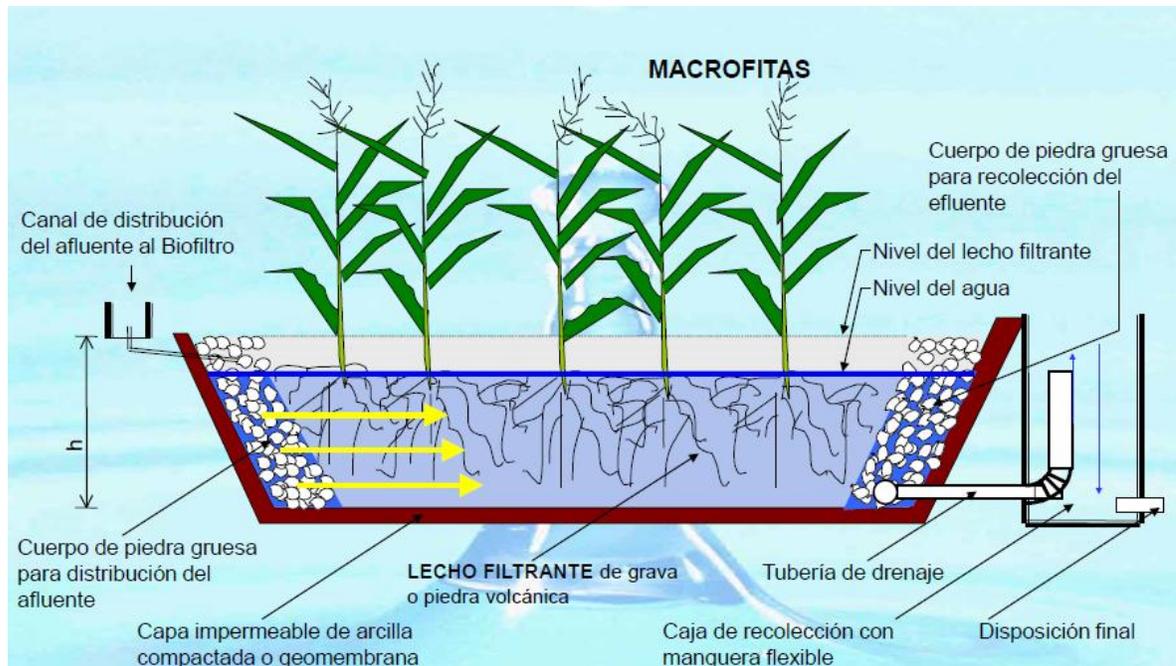


Figura 3.1 Sección longitudinal de un biofiltro de flujo horizontal
Fuente: CIEMA – UNI, Biofiltro Masaya 1996

3.4.3 Componentes principales de un biofiltro

a) El lecho filtrante

Sus funciones principales son eliminar los sólidos que contienen las aguas pretratadas y proporcionar la superficie donde se desarrollarán los microorganismos que se encargarán de degradar aeróbica y anaeróbicamente la materia contaminante, además de constituir el medio utilizado por las raíces de las plantas macrófitas para su fijación y desarrollo.

Los criterios para seleccionar el lecho filtrante son la granulometría, la porosidad, la permeabilidad y la resistencia física contra el desgaste provocado por las aguas residuales. Los materiales utilizados son grava, piedra triturada o piedra volcánica. La acumulación de sólidos mineralizados provocará la disminución del volumen de los poros en el lecho filtrante y eventualmente será necesario remover la parte inicial del material después de dos a tres años de operación. (Cáceres & Fong, 2006)

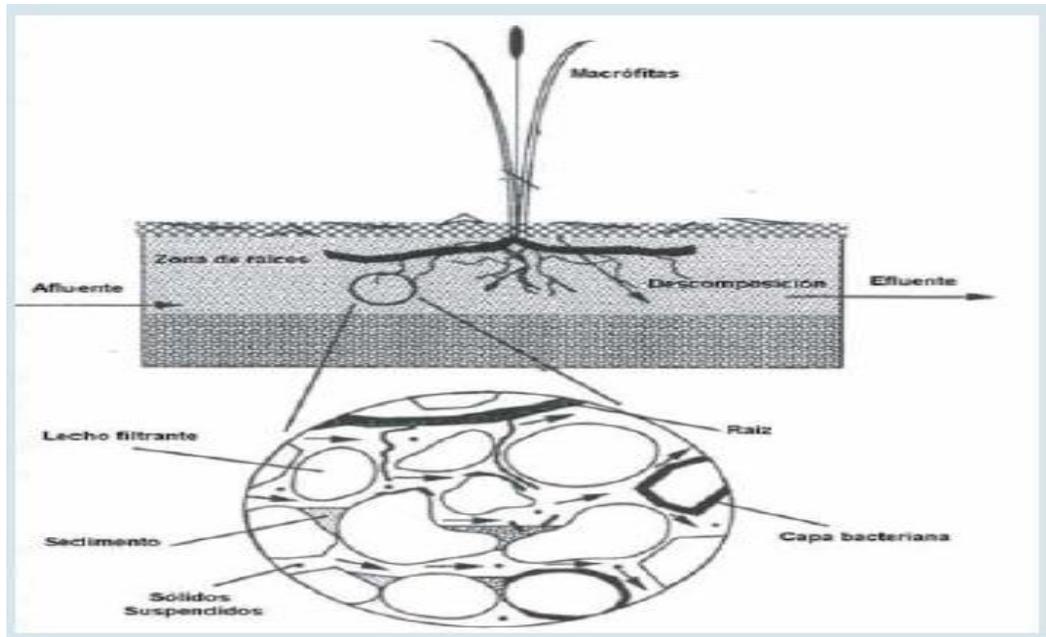


Figura 3.2 Funcionamiento del lecho filtrante
Fuente: (Cáceres & Fong, 2006)

b) Plantas de pantano

Las funciones que cumplen las plantas en los procesos de tratamiento de aguas residuales las convierten en componente esencial del biofiltro, así las raíces de las plantas ayudan a incrementar los efectos físicos tales como la filtración y el desarrollo de los microorganismos en su área superficial. La introducción de oxígeno en el lecho filtrante permite la formación de una población microbiana aeróbica en zonas cercanas a las raíces de las plantas. Las macrófitas cumplen otras funciones dentro del sitio específico, tales como proveer un hábitat conveniente para la vida silvestre y proporcionar al sistema una apariencia estética. (Caceres I. V., 2005)

La planta más utilizada a nivel mundial es la *Phragmites australis*, conocida comúnmente en la región como carrizo, por su capacidad de proveer de oxígeno al lecho filtrante. Otras plantas utilizadas son la *Pennisetum purpureum* (zacate Taiwán), que puede ser utilizada como alimento animal; y las de la familia de las *Heliconias* (platanillo), porque proporcionan un aspecto colorido y estético. En general, es recomendable que las plantas de pantano crezcan en la zona de construcción del biofiltro. (Caceres & Fong, 2006)

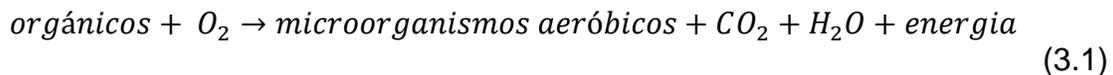
c) Microorganismos

La función principal de los microorganismos es degradar aeróbicamente (en presencia de oxígeno) y anaeróbicamente (en ausencia de oxígeno) la materia orgánica contaminante contenida en las aguas residuales, con lo cual la putrescibilidad en el biofiltro se reduce significativamente.

3.5 Mecanismos de remoción en un biofiltro

Remoción de sólidos suspendidos:

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en el tratamiento previo, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, complementando esta remoción. En efecto, las raíces de las macrófitas y el sustrato reducen la velocidad del agua, favoreciendo ambos procesos. El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal. (Delgadillo et al. 2010)



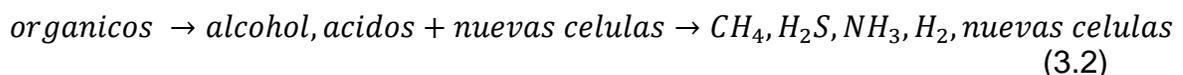
Remoción de materia orgánica:

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos.

Según Brix (citado en Delgadillo et al. 2010) La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos. Todos los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza. De acuerdo a su fuente de nutrientes, están clasificados como heterótrofos o autótrofos. Los heterótrofos requieren material orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevos microorganismos, en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono.

En la degradación aeróbica, dos grupos de microorganismos participan en este proceso de degradación: aeróbicos quimioheterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio; y aeróbicos quimioautótrofos, los cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato.

El último proceso es llamado nitrificación. Sin embargo, debido a la tasa de metabolismo más alta, los heterótrofos son principalmente responsables para la remoción del material orgánico; por lo tanto, la presencia de oxígeno disuelto es un factor limitante. La degradación anaeróbica puede ser resumida como sigue:



Éste es un proceso de cuatro pasos, realizado por heterótrofos anaeróbicos. Es menos eficiente comparado a la degradación aeróbica, pero predominará si el oxígeno no está disponible. (Cooper citado en Delgadillo et al. 2010).

Remoción de nitrógeno:

Al momento que ingresa agua residual al humedal, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio. Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la desnitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato. Todo el proceso puede ser dividido en pasos, iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y desnitrificación.

La amonificación ocurre en las zonas aeróbicas, como también en zonas anaeróbicas, por la mineralización del nitrógeno contenido en los orgánicos (ver Figura 3.3).

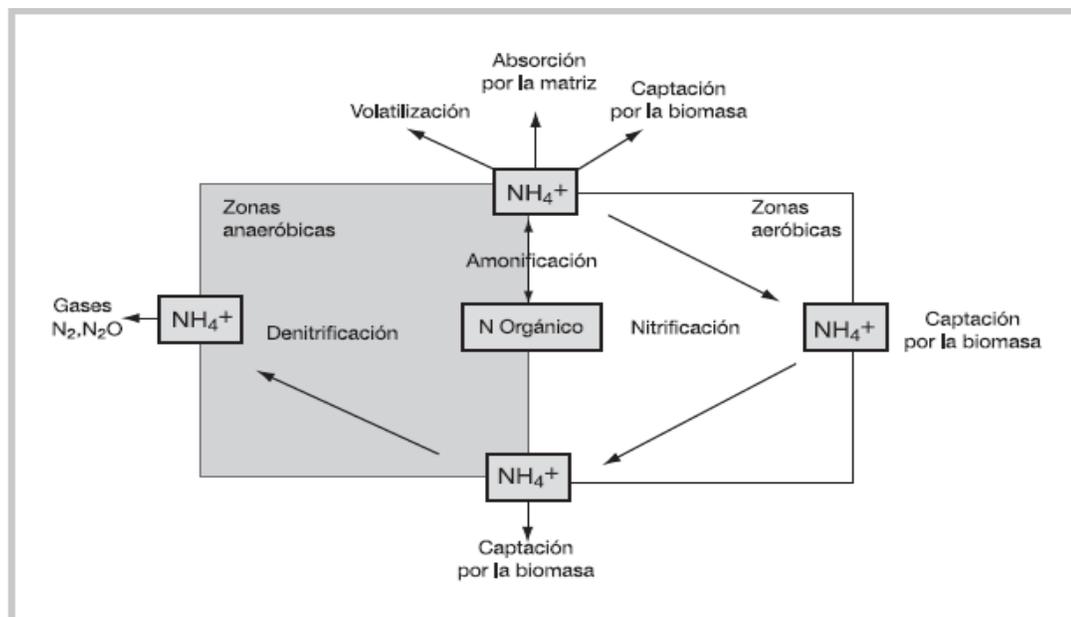
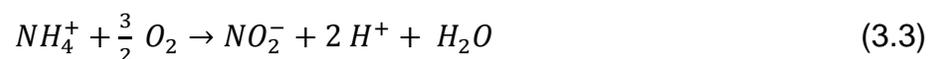


Figura 3.3 Metabolismo del nitrógeno

Fuente: (Cooper et al. 1996)

La nitrificación requiere la presencia de oxígeno disuelto (condiciones aeróbicas), amonio o nitrito como fuente de energía y dióxido de carbono como fuente de carbono. La oxidación en sí ocurre en dos estadios, cada uno involucra diferentes especies de bacterias nitrificantes quimioautótrofas. El primer paso es la oxidación de iones amonio a nitrito (nitrificación).

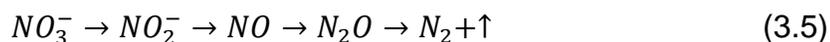


En este paso, la liberación de iones de hidrógeno baja el pH, por lo que es necesario un medio fuertemente alcalino para mantener un pH en el rango de 7.5 a 8.6. El género bacteriano que es considerado para catalizar esta reacción es Nitrosomas, en cambio el género Nitrobacter es responsable para la transformación de nitrito a nitrato.



Toda la reacción necesita un alto ingreso de oxígeno: alrededor de 4.5 kg por cada kg de amonio-nitrógeno ($NH_4^+ - N$) oxidado. Las bacterias son sensibles a un amplio rango de inhibidores; así, altas concentraciones de nitrógeno amoniacal son inhibitorias. También concentraciones de oxígeno disuelto por más de 1 mg O_2/L son requeridos y temperaturas por debajo de 100 °C reducen el desempeño significativamente.

La desnitrificación es el paso final en la remoción de nitrógeno. Ocurre bajo condiciones anóxicas, esto significa, que no hay oxígeno disuelto presente (o con una concentración < a 2% de saturación) pero donde el oxígeno está disponible en fuentes tales como el nitrato, nitrito o incluso sulfato.



Remoción de fósforo:

Según Boerner (citado en Delgadillo et al. 2010) la remoción de ortofosfato ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, complejización y reacciones de precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en la matriz del sustrato. El consumo de fósforo por la planta puede ser considerado como insignificante comparado con los efectos de adsorción, valores de alrededor del 3% de la carga anual han sido reportados.

Dependiendo del valor de pH dentro del sustrato, el fósforo está presente en la forma de sal soluble o minerales insolubles, lo cual significa que el fósforo puede ser transferido dentro de un humedal construido. Debido al contenido de óxidos metálicos en el sustrato, la fijación de fósforo como fosfatos por medio de la adsorción varía.

En la Tabla 3.3 se presentan las remociones obtenidas a través de análisis de laboratorio en la evaluación del biofiltro de Masaya.

Tabla 3.3 Remociones obtenidas en biofiltro de Masaya

Parámetro evaluado	% de Remoción
Demanda química de oxígeno	80-90%
Demanda bioquímica de oxígeno	90-95%
Sólidos suspendidos Totales	80-90%
Fósforo Total	35%
Nitrógeno Total	10-20%

Fuente: (Caceres I. V., 2005)

3.6 Impacto ambiental al utilizar un biofiltro para aguas residuales

Como se ha citado ya en este documento, los problemas que causan las aguas residuales sean doméstica o industriales son perjudiciales al medio ambiente y la población, algunas de las alternativas que permiten disminuir el impacto ambiental generado por las aguas, también trae consigo otros problemas, pero en el caso del biofiltro subsuperficial de flujo horizontal, el impacto en el medio ambiente es menor a medida que el sistema de tratamiento sea más eficiente en la remoción de contaminantes, ya que este sistema proporciona un efluente que puede ser dispuesto a una fuente receptora sin causar un impacto negativo apreciable, dado a que disminuye la concentración de los contaminantes según estudios realizados en Nicaragua por el proyecto Biomasa en décadas pasadas.

3.7 Criterios de diseño de biofiltros de flujo horizontal

Criterios de selección para uso de un Biofiltro (Humedal artificial)

Las consideraciones para elegir un biofiltro como sistema de tratamiento de aguas grises se presentan a continuación:

- El agua debe estar disponible durante todo el año para mantener las plantas y las bacterias vivas.
- Los flujos grandes (causado por la lluvia torrencial) puede agobiar el sistema, y debe ser desaguado en el caso de una tormenta grande hasta que el agua esté debajo de la superficie de tierra.
- Las aguas grises deben fluir naturalmente vía gravedad en el humedal o plantas domésticas.
- El agua debe quedarse en el sistema por un promedio de 2-10 días para permitir el tratamiento por plantas (Crites & Tchobanoglous 1998).
- Las aguas grises no deben estancarse (para evitar el crecimiento de mosquitos).
- Las plantas de un humedal natural local pueden ser trasplantadas para el uso en el humedal construido (recomendados), o pueden ser comprado en un vivero local.

- Una pared o capa impermeable debe rodear el humedal entero para prevenir que las aguas grises salgan antes de ser tratadas completamente. El desagüe apropiado permitirá que el agua salga del sistema después del tratamiento.

Localización de un humedal artificial subsuperficial (Biofiltro).

Para decidir sobre la ubicación de un biofiltro se deben considerar los siguientes aspectos presentados en la siguiente lista:

1. Un sistema de filtración biológica de aguas grises debe ser ubicado para que reciba directamente el flujo efluente
2. La exposición total al sol es ideal para un humedal construido
3. Se recomienda una pendiente de aproximadamente 0.5% para humedales construidos donde el flujo pasa Subterráneamente.

Según Delgadillo et al. (2010) para el diseño de humedales subsuperficiales de flujo horizontal se deben seguir los siguientes pasos:

- Cálculo del área necesaria.
- Profundidad del humedal.
- Pendiente.
- Sustrato.
- Relación largo – ancho

Cálculos del área superficial: Se realiza en función al parámetro contaminante que se desea disminuir o remover, generalmente los diseños se realizan para disminución de la DBO (Rodríguez Perez, 2003). A continuación se presenta la ecuación de cálculo.

$$A_s = \frac{Q \left(\ln \frac{C_o}{C} \right)}{Kr * n} \quad (3.6)$$

Donde A_s : área superficial

Q: caudal medio diario para el humedal (m^3 / d).

n: es la porosidad

C_o y C : concentraciones esperadas a la entrada y salida (mg/L).

Tiempo de detención (t , días) se calcula con la Ecuación 3.7.

$$t = \frac{AxHxn}{q} \quad (3.7)$$

Kr es la constante de reacción de primer orden y se calcula mediante la Ecuación 3.8

$$Kr = 1.104 * 1.06^{(T-20)} \quad (3.8)$$

Donde T es la temperatura del agua ($^{\circ}C$).

La profundidad del humedal: generalmente varia de 0,3 a 1 m (valor usual 0,6m), con una pendiente de 0,1 a 1%, siendo el valor usual de 0,5%. Entre más profundo se encuentre el sustrato mayor será la carga que el sistema puede procesar, pero si el sustrato es demasiado profundo, las condiciones en el fondo llegan a ser anaeróbicas y pueden resultar en la eliminación reducida de DBO y nutrientes.

Sustrato: Es el medio donde crecen las plantas, los microorganismos y se realizan los principales procesos de depuración. Para el diseño se recomienda utilizar grava con menos de 30 mm (3/4”) de diámetro que parece ser la que funciona mejor. Si se utiliza grava con diámetros muy grandes de sustrato, origina que se incremente la velocidad del paso del agua, resultando en un flujo turbulento y que no se cumpla la ley de Darcy para el diseño.

Caso contrario ocurre con grava de tamaño demasiado pequeño, esta reduce la velocidad del paso de agua originando zonas con presencia de agua en la superficie y flujos preferenciales, pero tienen la ventaja de proporcionar una mayor área superficial para la actividad microbiana y la adsorción.

Antes del inicio del diseño se recomienda realizar pruebas de conductividad y porosidad del sustrato (grava), esto para definir exactamente el tipo de material a emplearse. Asimismo, se recomienda multiplicar el valor de la conductividad por 1/3 o bien por 0.1 (10%) para evitar problemas de atascamiento por acumulación de lodos, raíces y otros. Con relación a la uniformidad del material este debe tener un coeficiente de uniformidad entre 1 y 6.

La Tabla 3.3 presenta materiales usados como sustratos en el diseño y construcción de biofiltros veamos a continuación.

Tabla 3.4 Materiales usados como sustratos

Tipo de material	Tamaño efectivo D10(mm)	Conductividad hidráulica, ks (m3/m2/d)	Porosidad, n %
Arena gruesa	2	100-1000	28-32
Arena gravosa	8	500-5000	30-35
Grava fina	16	1000-10000	35-38
Grava media	32	10000-50000	36-40
Roca gruesa	128	50000-250000	38-45

Fuente: (Delgadillo, Camacho, F.Pérez, & Andrade, 2010)

Relación largo ancho

Para calcular el ancho del humedal consideramos la ley de Darcy (Ecuación 3.9), para flujo en medio poroso.

$$Ac = \frac{q}{ks * S} \quad (3.9)$$

Donde A_c es área vertical (m^2)
 Q es caudal medio (m^3/s)
 K_s es conductividad hidráulica (m/s)
 S es pendiente (m/m).

El ancho del humedal se determina en función al área vertical y la profundidad del nivel de agua a tratar.

$$w = \frac{A_c}{H} \quad (3.10)$$

El largo del humedal se determina en función al ancho y al área superficial como se muestra a continuación.

$$L = \frac{A_s}{w} \quad (3.11)$$

Posteriormente calculamos la relación largo-ancho (L/A). Mientras mayor es la relación largo-ancho se tiene mejor depuración de las aguas, pero se tiene problemas de cortocircuitos, flujos preferenciales, presencia de agua sobre el lecho de grava y otros. Por ello se recomienda relación largo – ancho de: 2 a 1, 3 a 1 y 4 a 1

A continuación se presenta la Tabla 3.5 con un resumen de los parámetros de diseño.

Tabla 3.5 Resumen de parámetros de diseño Biofiltro de flujo horizontal

Criterios	Unidad	Intervalo	Valor usual
Tiempo de retención hidráulico	días	4-15	7
Profundidad agua	m	0.1-0.85	0.5
Área superficial (PE)	M_2	1.5-3	
Carga orgánica	$gDBO_5/m_3$ día	3-7.5	<11
Carga hidráulica	M_3/m_2 día	0.1-0.2	
Características constructivas			
Grava(ingreso – salida)	mm	50-100	50
Grava media	mm	3-6, 5-10, 6-12	19
Coeficiente de uniformidad		3-5	<5
Profundidad medio	m	0.7-1.5	0.7
Pendiente	%	0-1	0.5
Relación largo- ancho		2:1,7:1	3:1
Drenaje			
Tubería perforada – tamaño	mm	76-101	101
Distribución del agua			
Tubería perforada - canal	mm	51-76	76

Fuente: (Delgadillo, Camacho, F.Pérez, & Andrade, 2010)

3.8 Descripción del biofiltro de La Libertad, Chontales

El biofiltro, objeto de este estudio, es una versión modificada de lo que fue diseñado por la LeAF (Lettinga Associates Foundation), para tratar aguas residuales grises y un porcentaje de las aguas pluviales recolectadas en las cunetas del barrio. El diseño se hizo para una población de 884 habitantes, número proyectado a cinco años, estimando generación de aguas grises con base en una cantidad fija de 75 L/hab·d, para un caudal de 66 m³/d, que estaría entrando al biofiltro en el último año proyectado. El caudal estimado de aguas pluviales se determinó con base en los datos de INETER sobre la precipitación que tuvo lugar en esta zona los últimos 10 años. Resultó que el caudal de agua pluvial estimado superaba más de 25 veces el caudal de aguas grises, por lo que los diseñadores tomaron la decisión de dimensionar el filtro basándose en la capacidad del terreno disponible, ya que el caudal pluvial potencial era muy grande. Las dimensiones del biofiltro resultaron de 84 por 42 metros de ancho y largo respectivamente. Debido a ajustes en el presupuesto por limitantes económicas, el humedal se construyó de 70 m por 35 m con una profundidad a la entrada de 0.6 m y con una pendiente de 1% sobre toda su longitud¹. Según el responsable de biofiltro por parte de la alcaldía, no se cuenta con un documento formal que describa los cambios de redimensionamiento y características técnicas del filtro construido.

Para la distribución del agua a la entrada del biofiltro se encuentra un tubo PVC en la parte superior, con diámetro de 6 pulgadas, perforado para permitir la entrada del afluente. En la salida hay otro tubo perforado de 2 pulgadas de diámetro colocado en la parte inferior, el filtro está relleno con piedras bolón de un tamaño entre 50 y 200 mm, tanto a la entrada como salida. La parte principal del lecho de filtración está rellena con grava de un tamaño de 5 a 20 mm; debe evitarse la infiltración al subsuelo por lo que se utilizó plástico negro calibre 1000, y luego una pequeña capa de arena de 10 cm de altura para evitar que el plástico se rompa.

El sistema de pre tratamiento de biofiltro estudiado incluye únicamente dos canales con sus rejillas, a través de los cuales se transporta el agua de las cunetas hacia el biofiltro, la Figura 3.4 muestra un esquema.

En el barrio no existe cobertura de alcantarillado sanitario, tanto aguas pluviales como aguas grises se conducen al sistema de tratamiento a través de las cunetas, por lo que la presencia de arenas siempre debe ser prevista.

El biofiltro tiene plantación de *Pennisetum purpureum*, popularmente llamado como zacate Taiwán, y *Phragmites australis*, conocido como carrizo.

¹ Dato levantado en el campo durante los muestreos y en la entrevista con el responsable de la planta por parte de la Alcaldía.

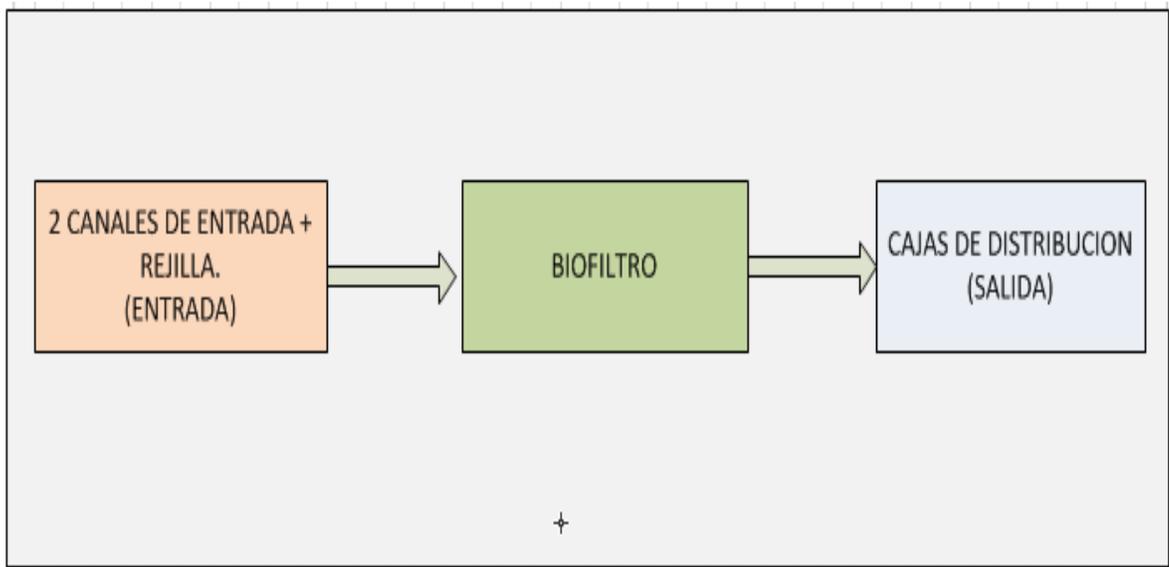


Figura 3.4 Tren de tratamiento

Después que el agua llega a las cajas de distribución es transportada unos 700 m hasta el río Mico favorecido por la pendiente del terreno.

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 Ubicación del biofiltro

El sistema de tratamiento está ubicado en el municipio de La Libertad Chontales, específicamente en el barrio Nueva Esperanza, este municipio se encuentra a 32 km de la ciudad de Juigalpa, cabecera del departamento de Chontales y a 175 km de la ciudad capital Managua. En la Figura 4.1 se muestra la ubicación exacta del biofiltro en estudio.



Figura 4.1 Ubicación del Biofiltro

Fuente: Google/mapas

4.2 Tipo de investigación

Este estudio consistió en la búsqueda de alternativas de mejora en el funcionamiento de un biofiltro específico, que comprendió la aplicación teórica práctica, por lo que se clasifica como una investigación aplicada.

4.3 Puntos de muestreo

En el estudio se consideraron dos puntos de muestreo descritos en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Descripción de puntos de Muestreo

Punto de Muestreo	Ubicación	Objetivo
Punto 1	A la entrada del sistema.	Conocer las características de las aguas a la entrada (afluente).
Punto 2	Cajas de distribución, a la salida del sistema.	Conocer las características del efluente para poder determinar la eficiencia de remoción de biofiltro.

4.4 Periodo y frecuencia de muestreo

Los muestreos se planificaron de tal forma que se pudieran abarcar el periodo seco y el lluvioso, se realizaron articulados con la Alcaldía de La Libertad en un periodo de 3 meses: febrero, abril y mayo; cada mes se efectuó un muestreo con duración de ocho horas, ya que este es el tiempo de mayor uso diario que la planta recibe el caudal del agua. La muestra es compuesta, se tomó proporcional al tiempo, una porción de muestra cada hora. Este estudio no presenta un análisis estadístico ya que solo se realizaron tres muestreos, por lo cual los datos obtenidos se compararon con datos obtenidos en otros estudios similares en Nicaragua, dado a las características típicas que se presentan y además de la limitante económica que no permitió la realización de más muestreos.

4.5 Caracterización de los parámetros de aguas residuales y determinación del caudal de entrada

Las muestras recolectadas en cada punto del muestreo se caracterizaron fisicoquímicamente en el laboratorio de aguas residuales del PIENSA-UNI. Los parámetros a analizar se seleccionaron de tal forma que pudieran dar respuesta a la determinación de la eficiencia de remoción del biofiltro y cumplimiento del Decreto 33-95, así como la evaluación de algunos parámetros de diseño del redimensionado filtro.

Tabla 4.2 Parámetros fisicoquímicos analizados del biofiltro

Parámetro	Método
DBO	Método Winkler
DQO	Reflujo cerrado para DQO
SST	Método gravimétrico
Nitrógeno total	Método macro-kjeldahl
Fósforo total	Método digestión con ácido sulfúrico-ácido nítrico y determinación colorimétrica del ácido vanadomolibdofosforico
pH	Método electrométrico
Temperatura	Método electrométrico
Solidos sedimentables	Cono Imhoff

El caudal se determinó por el método volumétrico, utilizando un recipiente milimetrado y un cronometro; a través de la Ecuación 4.1 se calculó el caudal.

$$Q = \frac{V}{t}, \left[\frac{l}{s} \right] \quad (4.1)$$

Donde Q: Caudal

V: volumen alcanzado, litros

t: tiempo que se tardó en alcanzar el volumen, segundos

4.6 Determinación de la eficiencia de remoción del biofiltro

Con base en los resultados obtenidos en los análisis de aguas residuales en los diferentes puntos de muestreo y para cada periodo, se calculó la eficiencia del biofiltro con el uso de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción} = [(C_i - C_f) / C_i] * 100 \quad (4.2)$$

Dónde:

C_i: concentración inicial, mg/L

C_f: concentración final, mg/L

4.7 Determinación de la calidad del efluente con base en el Decreto 33-95

Los resultados obtenidos en la caracterización de las muestras fueron comparados con los parámetros establecidos en el Decreto 33-95 Arto. 23 para concluir sobre su cumplimiento.

4.8 Evaluación de los criterios de diseño y operación del biofiltro

Se determinaron las dimensiones del sistema existente, se recalcularon los parámetros de diseño y operación y se compararon con los recomendados en la bibliografía, correspondiente a lo indicado en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Criterios a evaluar en el biofiltro

Criterio	Ecuación de calculo
Tiempo de retención	Ecuación 3.7
Áreas superficial	Ecuación 3.6
Ancho	Ecuación 3.11
Largo	Ecuación 3.12

4.9 Proponer alternativas para mejorar el mantenimiento del biofiltro

Basándose en los resultados obtenidos en los análisis y los cálculos que se realizarán en este estudio, además de las observaciones in situ, se presentó propuesta de alternativas para mejorar el mantenimiento del biofiltro.

V. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El muestreo fue realizado en el periodo planificado de tres meses, sin embargo en el mes de época lluviosa (mayo) no hubo precipitaciones, por lo que no se logró muestrear el biofiltro cuando éste recibe agua pluvial. No se aceptaron cambios de fechas de muestreo, dado que la planificación fue establecida en coordinación con PIENSA y la alcaldía de La Libertad; por motivos económicos no se pudo realizar un muestreo extra plan.

Las tablas presentadas en este capítulo muestran los valores promedios para cada parámetro, para ver los valores puntuales obtenidos durante los tres muestreos ver Anexo B. Los valores obtenidos en cada muestreo así como la media de estos se encuentran en el rango de valores obtenidos en otros estudios realizados en biofiltros en Nicaragua (Caceres & Fong, 2006).

5.1 Caracterización de los parámetros de aguas residuales y determinación del caudal de entrada

Las muestras recolectadas en cada punto del muestreo se caracterizaron fisicoquímicamente en el laboratorio de aguas residuales del PIENSA – UNI.

Tabla 5.1 Valores de la media de los parámetros

Parámetro evaluado	Afluente	Efluente
Demanda química de oxígeno (mg O ₂ /L)	593.34	44.83
Demanda bioquímica de oxígeno ((mg O ₂ /L)	416.67	13.73
Potencial de Hidrógeno	7.33	8.20
Sólidos suspendidos Totales (mg/L)	608.01	43.83
Fósforo Total (mg/L)	11.44	0.66
Nitrógeno Total (mg/L)	38.45	1.89
Sólidos Sedimentables (mL/L)	10.00	<0.5
Temperatura °C	28	26

Haciendo análisis general de los resultados se puede determinar que el agua a la entrada del biofiltro presenta características típicas de agua domésticas generada en una población rural. Los valores de la DQO y DBO indican que éstas se encuentran moderadamente contaminadas. Los valores de fósforo y nitrógeno están dentro de los rangos documentados para aguas residuales domésticas. Dado que el pH se ubica por debajo de 9, se puede predecir que nitrógeno presente en el agua se encuentra en forma de ion amonio (Crites & Tchobanoglous citado en Delgadillo et al. 2010).

La temperatura del agua a la entrada fue de 28 °C, lo cual es favorable para un crecimiento de microorganismos lo que garantiza la actividad bacteriana en biofiltro, formándose un film que degrada la materia orgánica. Únicamente llama la atención el alto contenido de sólidos suspendidos totales, lo que puede resultar en riesgo de atascamiento de tuberías y posterior estancamiento de agua en la entrada, actualmente no se observó este escenario, pero de presentarse lluvias torrenciales esto podría ocurrir. Estas altas concentraciones de SST pueden presentarse por la falta de un pre tratamiento para lograr eliminar las arenas y sólidos suspendidos en el agua, producto de que las aguas corren libres por las cunetas.

El caudal promedio de entrada de los tres muestreos fue de 15 m³/d. Este caudal es pequeño ya que según pobladores no se cuenta con un buen servicio de agua potable y algunas veces el uso del agua en la casa es para lavar trastos y bañar a los niños por la mañana, mientras que el lavado de ropa se hace en el río Mico. Tampoco existe una conexión de las aguas grises de los hogares al biofiltro, agua simplemente se saca a la cuneta. La situación de poco caudal puede tener consecuencias negativas para el biofiltro, provocando que las plantas se sequen y funcionamiento no sea adecuado.

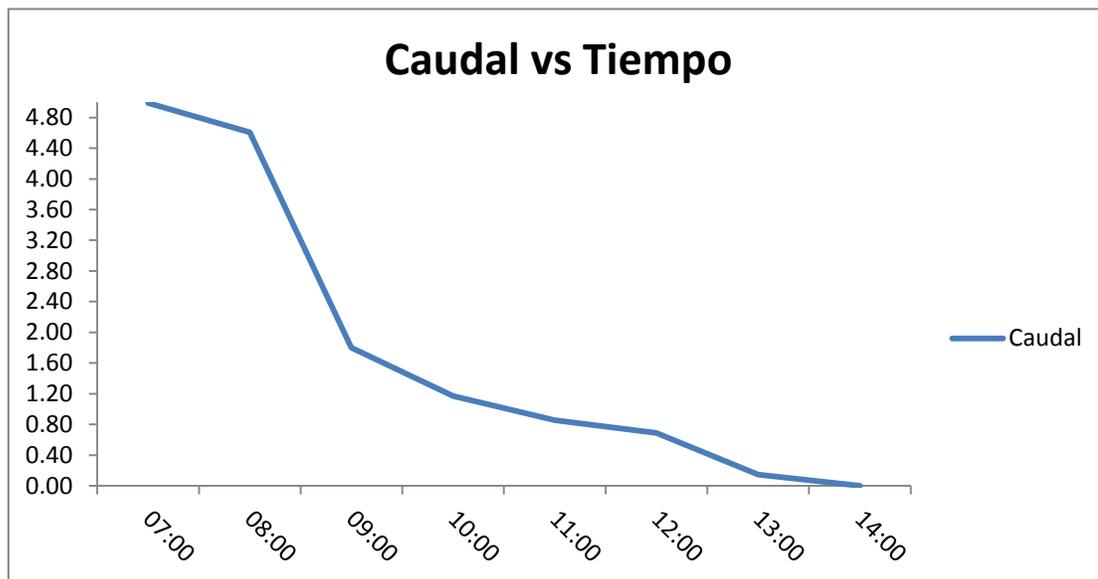


Figura 5.1 Comportamiento del Caudal de entrada muestreo 1

Según el comportamiento presentado en la figura 5.1, el caudal máximo se presenta a las 7 de la mañana y va disminuyendo a medida que se acerca a las 2 p.m.; la mayor actividad en la comunidad es en horas de la mañana, mientras avanza el día estas actividades van disminuyendo. La determinación del caudal se realizó durante un periodo de ocho horas, tomando en cuenta las horas cuando la población hace mayor uso de agua y hay generación de caudal a tratar. Se observó que después de las 2 p.m. prácticamente no se reanuda el flujo de agua.

5.2 Determinación de la eficiencia de remoción del biofiltro

Los porcentajes de remoción se obtuvieron según la Ecuación 4.1 y se presentan a continuación en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Remociones obtenidas en el biofiltro

Parámetro evaluado	Afluente	Efluente	% de Remoción
Demanda química de oxígeno	593.34	44.83	92
Demanda bioquímica de oxígeno	416.67	13.73	97
Sólidos suspendidos Totales	608.01	43.83	93
Fósforo Total	11.44	0.66	94
Nitrógeno Total	38.45	1.89	95

Las remociones obtenidas en el biofiltro son altas, lográndose una reducción por encima del 90% en la mayoría de los parámetros evaluados. En el caso de la remoción de la DQO es del 92% lo cual está en el rango de remociones obtenidas en otros estudios similares (Caceres I. V., 2005). La DBO presenta un porcentaje de remoción mayor al documentado en estudios sobre tecnologías similares a esta.

En el caso de los nutrientes, la reducción del 95 % de nitrógeno en el biofiltro se debe al consumo que realizan las plantas, la adsorción en el lecho filtrante y especialmente al proceso químico de la nitrificación y desnitrificación (Caceres I. V., 2005). El fósforo fue removido en un 94%, lo cual puede ser atribuido al consumo de las plantas del biofiltro, la fijación en el lecho filtrante y al ancho del biofiltro (Tapia & Villavicencio, 2007).

La remoción de sólidos suspendidos totales fue de 93%, esto se debe a que los biofiltros son capaces de sedimentar los sólidos suspendidos, ya que el sustrato permite la disminución de la velocidad del agua favoreciendo este proceso. El pH y la temperatura, tanto a la entrada (28 °C) como a la salida (26 °C), son óptimos para la buena operación de la planta.

Tan alta remoción de los contaminantes está directamente relacionada con tiempo de retención, dado que el caudal está muy bajo, el biofiltro trabaja sobredimensionado y por ende con tiempos de retención largos (Hoffmann, Platzer, Winker, & Von Muench, 2011).

5.3 Determinación de calidad del efluente con base al Decreto 33-95

Los datos promedios obtenidos para efluente, se compararon con los valores permisibles del Decreto 33-95 en su Arto.23, para la disposición de aguas residuales en fuentes receptoras.

Tabla 5.3 Calidad del efluente con base al Decreto 33-95

Parámetro evaluado	Efluente	Decreto 33-95
Demanda química de oxígeno	44.83	220.00
Demanda bioquímica de oxígeno	13.73	110.00
Sólidos suspendidos Totales	43.83	100.00
Fósforo Total	0.66	NE
Nitrógeno Total	1.89	NE
Potencial de Hidrógeno	8.2	6-9
Sólidos Sedimentables	<0.5	1.00

Como se observa en la Tabla 5.3 los valores de cada uno de los parámetros evaluados están por debajo de los estipulados en el Decreto, por lo que se concluye que cumplen las normas y no presentan ningún riesgo de contaminación para las aguas del río Mico, ni otra fuente receptora.

5.4 Evaluación de los criterios de diseño y operación del biofiltro

Según las observaciones y mediciones realizadas in situ, así como basándose en la información proporcionada por el responsable de la Alcaldía sobre el biofiltro existente en La Libertad Chontales, se realizaron cálculos de principales criterios de diseño. Los cálculos se presentan en el Anexo C, los valores resumidos se encuentran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Criterios de diseño y operación del biofiltro redimensionado

Criterios	Unidad	Valor recomendables (Delgadillo et al. 2010)	Valor real
Tiempo de retención	días	4 -15	39
Área superficial específica	m ² / PE	2.5 - 5	12
Carga orgánica	g DBO ₅ / m ² d	3-7.5	2.5
carga hidráulica	m ³ / m ² d	0.1 - 0.2	0.006
Ancho	m		70
Largo	m		35
Área superficial total	m ²		2450
Profundidad sustrato	m	0.1-0.85	0.6

Tomando en cuenta el caudal de efluente determinado en este estudio, $15\text{m}^3/\text{día}$, y haciendo uso de la Ecuación 3.7, el tiempo de retención con el cual opera actualmente el humedal es de 39 días. El área superficial específica ($\text{m}^2/\text{Equivalente Poblacional}$) es 12, dado que en este momento al sistema están conectados aproximadamente 200 usuarios. La alcaldía no conoce el número exacto de los pobladores conectados, pero en este estudio se hicieron estimaciones para el caso.

Según las proyecciones de la LeAF, se espera que en 5 años la población que hará uso del biofiltro sea de 884, para aquel entonces la relación de Área/PE disminuirá a $3\text{ m}^2/\text{PE}$, lo que permitirá un mayor aprovechamiento del biofiltro y además cumplir con lo recomendado en Delgado et al. (2010).

Se puede observar que la carga orgánica y la carga hidráulica que llega al filtro está por debajo, mientras el tiempo de retención está muy superior, de lo recomendado en la literatura. En sí, esta situación no perjudica la calidad del tratamiento, todo lo contrario, funcionar con baja carga y alto tiempo de retención garantiza eficiente remoción de los contaminantes, el hecho que fue presenciado en este estudio.

En la práctica el biofiltro de La Libertad fue evaluado en el periodo sin precipitaciones, a pesar que se planificó un muestreo en mayo, lamentablemente no llovió. Esto tuvo efecto en que el caudal fue solamente de aguas grises. En caso contrario, diluido por la lluvia, el caudal hubiera sido mayor y seguramente la carga hidráulica se hubiera visto en el rango recomendado; no tanto la carga orgánica, ya que la dilución de los contaminantes no permitiría que este parámetro aumente.

Basándose en el área del biofiltro actual, a través del cálculo, se puede afirmar que éste puede recibir un caudal de 395 metros cúbicos de agua al día. Tomando en cuenta 884 usuarios conectados y la generación de agua a tratar estimada en $75\text{ L}/\text{día}\cdot\text{hab}$, se determinó que el filtro puede recibir $329\text{ m}^3/\text{d}$ de agua pluvial sin ningún problema. A medida que la población este conectándose al biofiltro esta proporción se ira desplazando al lado de aguas grises y la disponibilidad para agua pluvial estará reduciéndose, necesitando una solución en el futuro.

El área superficial del filtro diseñado por LeAF fue de 3528 m^2 y se redujo en la construcción a 2450 m^2 , o sea casi en un 30%, lo que afectará en un futuro su funcionamiento si no se toman medidas con aguas pluviales, tomando en cuenta que estas superan 25 veces el volumen proyectado de aguas grises (Informe de diseño LeAF, 2010). Según el Decreto 33-95 aguas pluviales no se deben mezclar con aguas residuales, para cumplir con esta disposición el alcantarillado debería construirse separado, no mixto como en décadas pasadas. Esto facilitaría muchísimo el uso y el control sobre el funcionamiento del biofiltro o cualquier otra unidad de tratamiento.

Durante el estudio se observó un deficiente mantenimiento del biofiltro: canales de acceso atascados de arena y basuras en la rejillas, las plantas, algunas ya secas y animales (vacas, caballos) comiendo la vegetación antes que esta logre su ciclo de crecimiento, según los resultados de remoción obtenidos esto no ha afectado al biofiltro, pero de no prestarle atención sería riesgoso. Por lo cual se realizan alternativas de mejora y mantenimiento en el próximo acápite.

5.5 Proponer alternativas para mejorar el mantenimiento del biofiltro

Las recomendaciones de mejora que a continuación se presentan se hacen con base en los resultados alcanzados en este estudio y observaciones in situ del biofiltro del barrio Nueva Esperanza.

1. El afluente del biofiltro presenta un alto valor de Sólidos Suspendidos Totales, lo que podría provocar atascamiento en la entrada del mismo. Se recomienda instalar un desarenador en la entrada después del canal, para lograr de esta forma sedimentar partículas como arena y sólidos que viene en el agua, debido a que la recolección del agua gris es a través de canaletas abiertas.
2. Basado en las observaciones in situ, se sugiere realizar operaciones de mantenimiento en el biofiltro:
 - Limpiar los canales de ingreso al biofiltro por lo menos una vez al mes.
 - Controlar la entrada al biofiltro, cuando está presente flujo superficial de agua es recomendable remover uno o dos metros del material del lecho filtrante principal (después del material grueso en la entrada) sustituyéndolo por material con las mismas características, durante este periodo el biofiltro estará fuera de servicio.
 - Se deben remover los sólidos y basura retenidos en las rejillas para evitar obstrucciones de flujo y que haya paso de estos al humedal.
 - Cortar la vegetación en función de su ciclo, en caso del carrizo cada diez meses y el zacate Taiwán cada tres meses, además de la limpieza del lecho filtrante después del corte.
 - Mantener el área superficial del biofiltro limpias, libre de materiales plásticos, piedras grandes, llantas, animales o cualquier otro material que impida el desarrollo de la vegetación. Las plantas secas dentro del biofiltro, deben ser remplazadas.

VI. CONCLUSIONES

La evaluación del biofiltro en el barrio Nueva Esperanza del municipio de La Libertad, Chontales permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- El agua a la entrada del biofiltro presentó las características fisicoquímicas dentro de los rangos de aguas grises en zonas rurales, posee índices moderados de carga orgánica, además cumple a cabalidad con el Arto. 23 del Decreto 33-95 sobre la disposición de aguas de origen doméstico, evitando así la contaminación del río Mico y la proliferación de mosquitos causantes de muchas enfermedades.
- El filtro, como unidad de tratamiento de agua residual, presentó altos porcentajes de remoción de contaminantes orgánicos carbonaceos (DQO, DBO), así como nutrientes, lo cual permite concluir que el biofiltro trabaja de manera eficiente, sin descartar la posibilidad que muy bajo caudal contribuye a esta asombrosa eficiencia, ya que los tiempos de retención son casi tres veces más altos de lo recomendado en la literatura. Sin embargo, el poco caudal que recibe el biofiltro, puede tener consecuencias muy negativas para él, dado que las plantas pueden secarse por falta de humedad.
- Basado en las dimensiones del redimensionado biofiltro (70 m de ancho por 35 m de largo), se concluye que este puede recibir $359 \text{ m}^3 / \text{d}$ de aguas, cuando se hayan conectado 884 usuarios haciendo uso cada uno de 75 L/día hab, el biofiltro podrá percibir 329 metros cúbicos de aguas pluviales, aunque actualmente el biofiltro recibe en época de seca $15 \text{ m}^3 / \text{d}$ es decir únicamente
- A pesar que la eficiencia del biofiltro es alta, en las visitas in situ fue observado un deficiente proceso de mantenimiento, debido al desconocimiento de la población de las bondades del sistema a la comunidad.

En general se puede afirmar que el biofiltro a pesar que fue redimensionado, en actualidad funciona de manera óptima, pero se deben tomar muy en serio las recomendaciones realizadas en este estudio.

VII. RECOMENDACIONES

Al concluir esta evaluación sobre el biofiltro redimensionado en La Libertad Chontales se recomiendan las actividades siguientes, sumadas a las propuestas de mejoras expuestas en el acápite anterior:

- Realizar una evaluación adicional que contemple época de verano e invierno, aumentando el número de muestreos (10 mínimos) que permita hacer un análisis estadístico, este se puede iniciar cuando el caudal de agua sea mayor, para determinar si los porcentajes de eficiencia varían o se mantienen.
- Se recomienda urgentemente conectar a todos los pobladores del barrio al biofiltro de manera que el caudal de agua gris aumente y además se logren mayores beneficios en cuanto al uso del biofiltro.
- Se debe mejorar el servicio de agua potable del barrio Nueva Esperanza, aumentando así el caudal actual, esto evitará que las plantas de pantano se sequen en esta época y el biofiltro deje de funcionar.
- Informar a la población de las bondades que ofrece el uso del biofiltro a la comunidad y al medioambiente, motivándoles de esta manera al cuidado y mantenimiento del mismo. La alcaldía debería destinar un pequeño porcentaje del presupuesto para tal fin y para el mantenimiento del sistema.

VIII. NOMENCLATURA

As:	Área superficial
C:	Concentración de contaminantes
CO ₂ :	Dióxido de carbono
CH ₄ :	Metano
DBO:	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO:	Demanda Química de Oxígeno
F total:	Fósforo total
HAFSS:	Humedal de Flujo Subsuperficial Horizontal
H:	Profundidad del agua en humedal
Kr:	Constante de primer orden
Ks:	Conductividad hidráulica
L:	Largo del biofiltro
N total:	Nitrógeno total
η :	Porosidad
PE:	Población Equivalente
pH:	Potencial de Hidrógeno
Q:	Caudal de diseño
SST:	Sólidos Suspendidos Totales
t:	Tiempo de retención
W:	Ancho del biofiltro

IX. BIBLIOGRAFÍA

Cáceres, I. V. (2005). *Uso de tecnologías de Biofiltro en aguas residuales*. Perú.

Cáceres, V., & Fong, N. (2006). Biofiltro: una opción sostenible para tratamiento de aguas residuales pequeñas localidades.

Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Bogotá: McGraw Hill.

Decreto 33-95. (s.f.). INAA. Recuperado el lunes de mayo de 2013, de www.inaa.gob.ni/documentos/.../Decreto%2033-95%20...pdf/at.../file

Delgadillo, O., Camacho, A., F. Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de Aguas Residuales por medio de humedales artificiales*. Proyecto Humedal. Cochabamba, Bolivia: Centro AGUA.

Delgado, H., & Pérez, W. (2010). Biofiltros Domiciliares. *Ideas Nicaragua*.

ENACAL. (s.f.). *ENACAL, UNA INSTITUCIÓN AL SERVICIO DEL PUEBLO. GESTIÓN 2009*. Managua: ENACAL.

Estabilización, L. d. (s.f.). <http://tesis.uson.mx>. Recuperado el 10 de mayo de 2013, de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/capitulo4.pdf>

Estrada G., I. (2010). *Monografía sobre HFSs*. Pereira: Universidad de Pereira.

HEALTHASSOCIATION, A. P. (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington DC: APHA, AWWA, WWCF.

Hoffmann, D., Platzer, D., Winker, D., & Von Muench, D. (2011). *Revisión técnica humedales artificiales de flujo subsuperficial para tratar aguas grises*. Eschborn, Alemania: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ.

INIFOM. (s.f.). Recuperado el 13 de mayo de 2013, de http://www.inifom.gob.ni/municipios/documentos/CHONTALES/la_libertad.pdf

Manual, U.D. (1988). *Constructed Wetlands and Aquatic Plants Systems for municipal wastewater treatment*. EPA 624/1-88/022.

Lettinga Associates Foundation LeAF. (2010). *Humedal artificial para el tratamiento de aguas grises y pluviales en el barrio la Nueva Esperanza en la Libertad, Chontales*. Netherlands: LeAF.

Rodríguez Pérez, C. (2003). Humedales Construidos. Estado del arte (II). Ingeniería Hidráulica y ambiental, 1-7.

Red de agua y saneamiento de Nicaragua. (11 de noviembre de 2010). www.ecosanres.org. Recuperado el 9 de julio de 2013, de http://www.ecosanres.org/pdf_files/Version%20final%20Saneamiento%2029%20Nov%202010Fotos.pdf

Tapia, F., & Villavicencio, P. (2007). *Evaluación de biofiltros para reducir la contaminación difusa de aguas de riego de las regiones VI y VII*. Santiago de Chile: Boletín INIA N°170.

X. ANEXO

ANEXO A Métodos usados en la caracterización del Agua residual

DBO – METODO WINKLER

La prueba de la DBO es un procedimiento experimental, tipo bioensayo que mide el oxígeno requerido por los organismos en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en las aguas residuales o naturales. Las condiciones estándar del ensayo incluyen incubación en la oscuridad a 20 °C por un tiempo determinado, generalmente cinco días. Las muestras deben diluirse para garantizar suficiente oxígeno para los microorganismos en los cinco días a las condiciones del bioensayo. El método consiste en llenar con muestra al menos cuatro winkler de 300 ml, incubar a 20°C durante cinco días. Medir el oxígeno disuelto inicial en frascos y el oxígeno disuelto final después del periodo de incubación. La disminución de la concentración de oxígeno disuelto (OD), medida por el método winkler o una modificación del mismo, durante el periodo de incubación, produce una medida de la DBO.

Procedimiento:

Preparación del agua de dilución. Colocar en un recipiente un volumen conocido de agua de abastecimiento y airearla, hasta que se sature de oxígeno (aproximadamente dos horas), con bombas aireadora o con un compresor. Adicionar 1 mL/L de la semilla, la cual ha sido preparada en el laboratorio con aguas residuales y agregar igualmente 1mL/L de los nutrientes, los cuales son macronutrientes (Buffer de fosfato) y 1 mL/L de micronutriente (sulfato de magnesio, Cloruro de calcio, cloruro férrico y cloruro de amonio).

Incubación de la muestra. El porcentaje de muestra a ser incubada se calcula correlacionando la demanda química de oxígeno con la demanda bioquímica de oxígeno por lo tanto es necesario determinar primero la demanda química de oxígeno y así calcular la cantidad de muestra de acuerdo con la siguiente ecuación

$$\%DM = \left(\frac{OD_i - OD_s}{\%DQO_{biodegradable}} \right) * 100 \quad (A.1)$$

Dónde:

OD_i: oxígeno disuelto de saturación.

OD_s: oxígeno disuelto después de los 5 días.

%DM: porcentaje de dilución de la muestra.

Tomar un volumen de muestra de acuerdo al procedimiento anterior, completar a 500 mL en balón volumétrico con el agua de dilución, llenar winkler y tapar verificando que no queden burbujas en su interior, preparar por lo menos dos diluciones.

Preparar igualmente un blanco solo con el agua de dilución, también por duplicado. Determinar el oxígeno disuelto inicial del blanco y de la muestra. Guardar los duplicados de la muestra y el blanco en una incubadora durante 5 días a 20 °C y en la oscuridad.

Determinar el oxígeno disuelto final de las muestras y el blanco al quinto día, directamente del equipo previamente calibrado.

$$DBO_5 = ((D1 - D2) - (B1 - B2)f) / P \quad (A.2)$$

Donde

D1: oxígeno disuelto inicial de la muestra.

D2: oxígeno disuelto de la muestra después de cinco días de incubación a 20°C

B1: Oxígeno disuelto inicial del agua de ebullición.

B2: Oxígeno disuelto del agua de dilución después de la incubación a 20°C.

P: Fracción decimal volumétrica de muestras usadas.

F: Proporción de semilla en la muestra diluida a la en el control de semilla.

DQO – REFLUJO CERRADO

Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo cerrado en solución fuertemente acida (H_2SO_4) con un exceso conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en presencia de sulfato de plata que actúa como agente catalizador y de sulfato de mercurio adicionado para remover la interferencia de los cloruros. Después de la digestión, el oxígeno consumido se determina mediante lectura espectrofotométrica a una longitud de onda de 600 nm contra estándares.

El método de reflujo cerrado es más económico en el uso de reactivos de sales metálicas, pero para obtener resultados reproducibles requiere la homogenización de muestras que contengan sólidos suspendidos.



Figura A.1 Equipos usados en el método
Fuente: <http://www.slideshare.net/maferortiz19/DQO>

NITRÓGENO TOTAL

DIGESTIÓN

Encender el digestor y scrubber 15min antes de iniciar el ensayo y limpiarlos. En el tubo agregar: 25ml de la muestra, 15ml de ácido sulfúrico 3,0g de Sulfato de Potasio, 1,0g de Sulfato de cobre.2.

Colocar el digestor en 60°C-80°C (temperatura). Colocar la “Flauta” (tapa del digestor para desviar los gases) y conectar la manguera de la “flauta” al scrubber.

Dejar en digestión aproximadamente 2 horas o hasta que las muestras tengan un color azul claro.4. Al alcanzar ese color se apaga el digestor y se deja enfriar 30min con el scrubber prendido.

DESTILACIÓN1.

Encender la unidad de destilación hasta que caliente (aproximadamente 15min). Transferir las muestras frías de los tubos de digestión a los tubos de destilación con mucho cuidado.

Agregar a los tubos poco a poco 30ml de agua destilada y agregar Hidróxido de Sodio 6N (NaOH) con la válvula dosificadora hasta obtener un colar café. En los frascos erlenmeyers que recibirán el destilado adicionar 100ml de ácido bórico al 2% y de 3 a 4 gotas de indicador mixto. Destilar entre 150-250mL en los Erlenmeyer.

TITULACIÓN

Tomar los Erlenmeyer y titular entre 150-250mL de destilación con ácido sulfúrico 0.02N hasta llegar al color rosado

FOSFORO TOTAL

Determinación de Fósforo Total por el Método del Ácido Fosfovanadomolibdico

La digestión con persulfato amónico de la muestra convierte la mayoría de compuestos orgánicos de P, polifosfatos, hexametfosfatos y fosfitos inorgánicos en ortofosfatos susceptibles en las determinaciones colorimétricas explicadas en los puntos anteriores.

Las soluciones de reactivos para determinar fósforo total son las siguientes:

Solución de Ácido Sulfúrico 0.5 M: Adicione sobre 100 mL de agua destilada, 31 mL de ácido sulfúrico concentrado comercial.

Solución de NaOH 1 M: Disuelve 40 g de sólido en agua destilada, enrasando a 1000 mL.

Procedimiento:

Toma 50 mL de muestra en un recipiente termo resistente y añade 1 mL de ácido sulfúrico concentrado y 0.4 g de persulfato de amonio sólido. Llévelo a ebullición en la plancha de calentamiento, reduciendo su volumen hasta unos 10 mL.

Alcaliniza la muestra después de enfriar a temperatura ambiente, con NaOH 1M hasta pH 7.5-8.0. Ajusta el pH, si es necesario, con ácido sulfúrico 0.5M.

Enrasa la muestra a un total de 50 mL con agua destilada.

Una vez realizada la digestión puedes analizar la muestra usando el método del ácido Fosfovanadomolibdico.

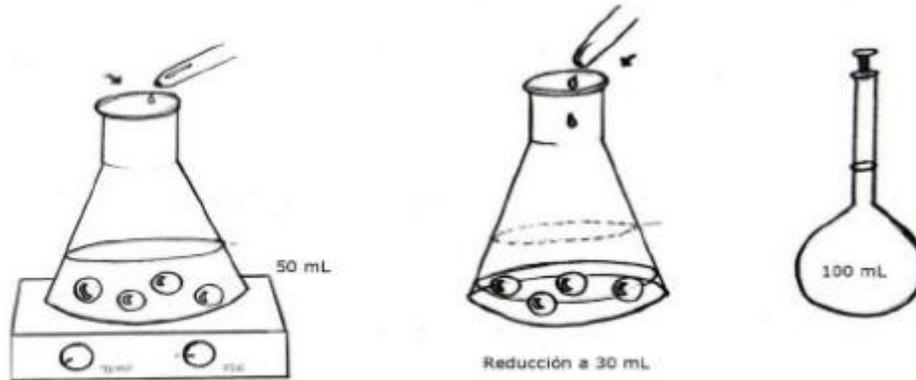


Figura A.2 Prueba de Fosforo total.

SOLIDOS Sedimentable

DETERMINACION DE SOLIDOS SEDIMENTABLES

Método Volumétrico

1. OBJETIVO

Esta norma técnica se utiliza para la determinación de sólidos sedimentables en efluentes industriales y domésticos.

2. DEFINICION

Los sólidos sedimentables son los materiales que sedimentan de una suspensión en un periodo de tiempo definido en un cono Imhoff.

3. MUESTREO Y PRESERVACION DE LA MUESTRA

Recolectar la muestra en envases de vidrio o de plástico de 1L de capacidad. Refrigerar a 4°C. Analizar lo antes posible.

4. MATERIALES

4.1 Cono Imhoff graduado de 1000 mL de capacidad.

5. PROCEDIMIENTO

a) Verter en el cono Imhoff 1000 mL de muestra perfectamente mezclada. Dejar sedimentar y leer el volumen del sedimento a los 10 minutos en la escala.

b) A los 45 minutos, raspar las paredes del cono con varilla de vidrio para desprender las partículas adheridas. Dejar sedimentar 15 minutos más y leer el volumen del sedimento en la escala a los 60 minutos de iniciado el ensayo.

Figura A.3 Determinación sólidos sedimentables
Fuente: Google/imágenes

SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES**5. PROCEDIMIENTO**

5.1 Preparación del papel de filtro:

Colocar el filtro en el embudo de filtración. Aplicar vacío y enjuagar con tres porciones de 20 mL de agua destilada. Continuar la succión hasta eliminar totalmente el agua. Secar en estufa 103-105°C por 1 hora en un soporte de porcelana o similar. Si se va a determinar volátiles muflar por 15 min. a 550 °C, enfriar en desecador y pesar. Repetir el ciclo de muflado, enfriado y pesado hasta peso constante.

5.2 Determinación:

a) Una vez que se obtuvo el peso constante del filtro, pesarlo inmediatamente antes de usarlo.

b) Colocar el filtro en el embudo de filtración, mojar el filtro con una pequeña cantidad de agua destilada.

c) Tomar un volumen de muestra homogeneizada que de un residuo seco entre 2.5 y 200 mg. Verter el volumen medido en el embudo de filtración. Comenzar la succión. Lavar 3 veces sucesivas con 10 mL de agua destilada cada vez, permitiendo un completo drenaje en los lavados. Continuar la succión por 3 minutos hasta que la filtración sea completa.

d) Remover el filtro y colocarlo sobre un soporte de porcelana. Secar por 1 hora a 103-105°C en estufa, enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y pesar. Repetir el ciclo de secado, enfriado, y pesado hasta peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor que el 4% del peso previo o 0.5 mg.

e) Colocar el filtro anterior en la mufla a 550 ± 50°C durante 1 hora. Enfriar en desecador y pesar. Repetir la secuencia hasta obtener peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor que el 4% del peso previo o 0.5 mg.

6. CALCULOS Y EXPRESION DE RESULTADOS

$$SST, \text{ mg/L} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V}$$

Figura A.4 Determinación de SST

Fuente: http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/docs/pdfs/manual_dinama.pdf

ANEXO B Otras Tablas y Figuras

Tabla B.1 Caracterización de los muestreos y el Decreto 33-95

Parámetro	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		DECRETO33-95 ARTO.23
		AFLUENTE	EFLUENTE	
Muestreo 1 19/02/2013				
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	300.74	27.94	220.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	165.00	16.00	110.00
Potencial de Hidrógeno	pH	7.44	7.74	6-9
Sólidos suspendidos Totales	mg/L	271.25	12.00	100.00
Fósforo Total	mg/L	23.56	1.46	NE
Nitrógeno Total	mg/L	7.19	0.98	NE
Sólidos Sedimentables	mL/L	<0.5-1.5	<0.5	1.00
Muestreo 2 04/04/2013				
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	764.84	50.00	220.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	405.00	16.40	110.00
Potencial de Hidrógeno	pH	6.63	8.85	6-9
Sólidos suspendidos Totales	mg/L	802.79	69.00	100.00
Fósforo Total	mg/L	4.24	0.49	NE
Nitrógeno Total	mg/L	54.16	2.53	NE
Sólidos Sedimentables	mL/L	>0.5	<0.5	1.00
Muestreo 3 17/05/2013				
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	714.43	56.55	220.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	680.00	8.80	110.00
Potencial de Hidrógeno	pH	7.91	8.00	6-9
Sólidos suspendidos Totales	mg/L	750.00	50.50	100.00
Fósforo Total	mg/L	6.51	0.03	NE
Nitrógeno Total	mg/L	54.00	2.15	NE
Sólidos Sedimentables	mL/L	10.00	<0.5	1.00

Tabla B.2 Media de los tres muestreos realizados para afluente

Parámetro evaluado	Afluente			Media
	Muestreo I	Muestreo II	Muestreo III	
Demanda Química de Oxígeno	300.74	764.84	714.43	593.34
Demanda Bioquímica de Oxígeno	165.00	405.00	680.00	416.67
Potencial de Hidrógeno	7.44	6.63	7.91	7.33
Sólidos suspendidos Totales	271.25	802.79	750.00	608.01
Fósforo Total	23.56	4.24	6.51	11.44
Nitrógeno Total	7.19	54.16	54.00	38.45
Sólidos Sedimentables	<0.5	>0.5	10.00	10.00

Tabla B.3 Media de los tres muestreos realizados para efluente

Parámetro evaluado	Efluente			Media
	Muestreo I	Muestreo II	Muestreo III	
Demanda Química de Oxígeno	27.94	50.00	56.55	44.83
Demanda Bioquímica de Oxígeno	16.00	16.40	8.80	13.73
Potencial de Hidrógeno	7.74	8.85	8.00	8.20
Sólidos suspendidos Totales	12.00	69.00	50.50	43.83
Fósforo Total	1.46	0.49	0.03	0.66
Nitrógeno Total	0.98	2.53	2.15	1.89
Sólidos Sedimentables	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

Tabla B.4 Porcentajes de remoción alcanzados

Parámetro evaluado	Afluente	Efluente	% de Remoción
Demanda Química de Oxígeno	593.34	44.83	92
Demanda Bioquímica de Oxígeno	416.67	13.73	97
Sólidos suspendidos Totales	608.01	43.83	93
Fósforo Total	11.44	0.66	94
Nitrógeno Total	38.45	1.89	95
Potencial de Hidrógeno	7.33	8.2	
Sólidos Sedimentables	10	<0.5	
Temperatura	28	26	

Tabla B.5 Medición de caudal muestreo 1

Hora	Q (L/s)	Q (m ³ /d)
07:00	0.058	4.988
08:00	0.053	4.607
09:00	0.021	1.801
10:00	0.014	1.170
11:00	0.010	0.855
12:00	0.008	0.690
13:00	0.002	0.147
14:00	0.000	0.000
Q Total	0.165	14.259

Tabla B.6 Medición de caudal muestreo 2

Hora	Q (L/s)	Q (m ³ /d)
07:00	0.058	4.988
08:00	0.053	4.607
09:00	0.021	1.801
10:00	0.014	1.170
11:00	0.019	1.641
12:00	0.008	0.690
13:00	0.002	0.202
14:00	0.000	0.000
Q Total	0.175	15.100

Tabla B.7 Medición de caudal muestreo 3

Hora	Q (L/s)	Q (m ³ /d)
07:00	0.087	7.547
08:00	0.043	3.732
09:00	0.021	1.801
10:00	0.014	1.170
11:00	0.019	1.641
12:00	0.008	0.690
13:00	0.002	0.202
14:00	0.000	0.000
Q Total	0.194	16.785

El valor de 15 m³/d del caudal fue usado para determinar el tiempo de retención del biofiltro en la actualidad.

GRÁFICAS

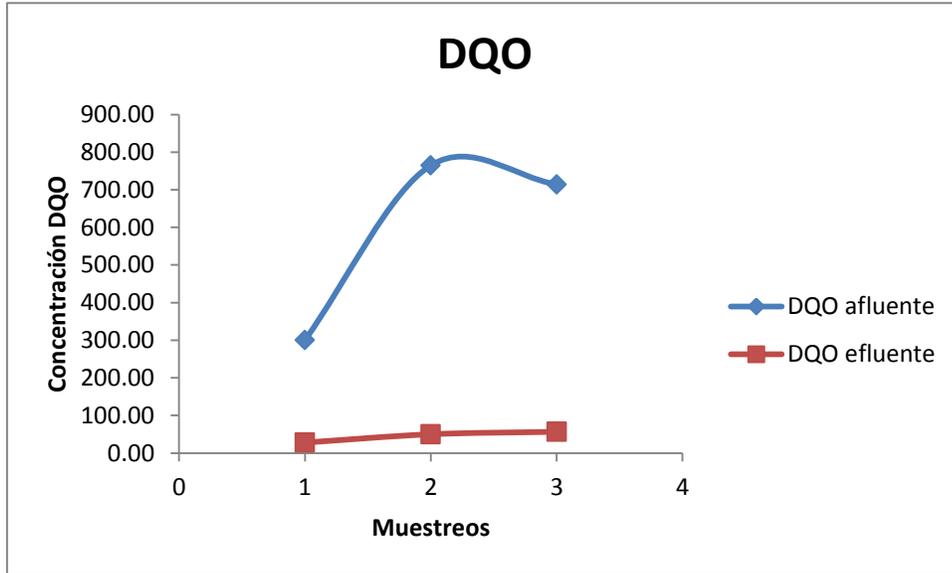


Figura B.1 Comportamiento de la DQO durante los muestreos

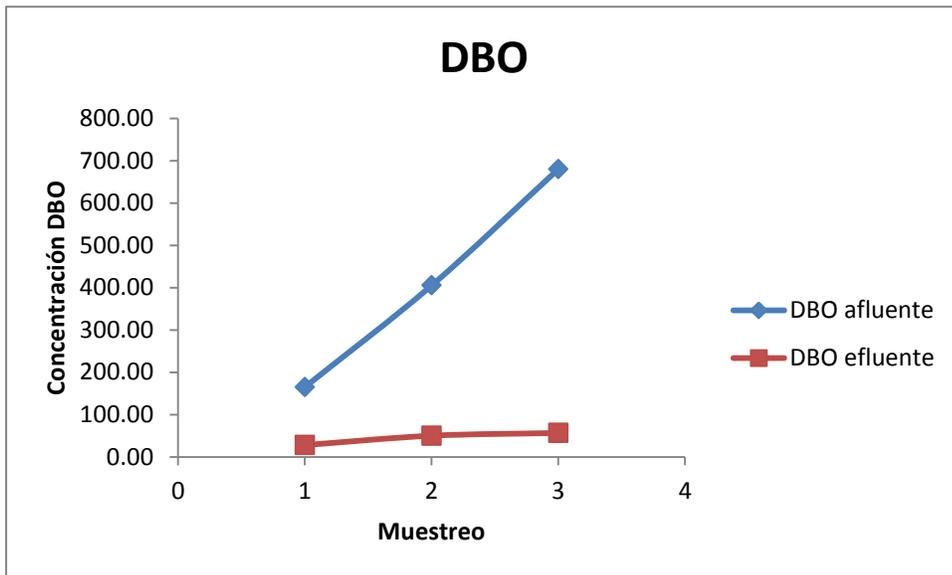


Figura B.2 Comportamiento de la DBO durante los muestreos

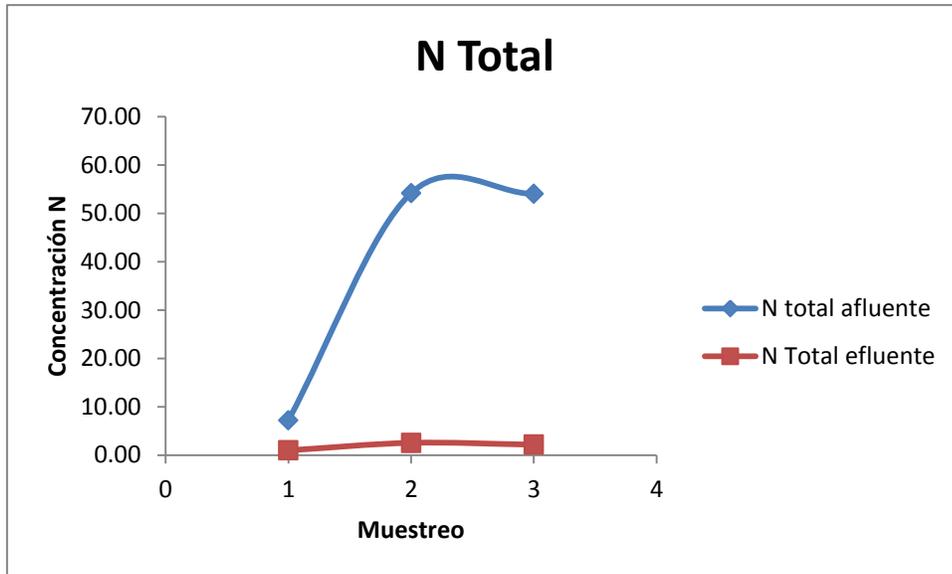


Figura B.3 Comportamiento del N total durante los muestreos

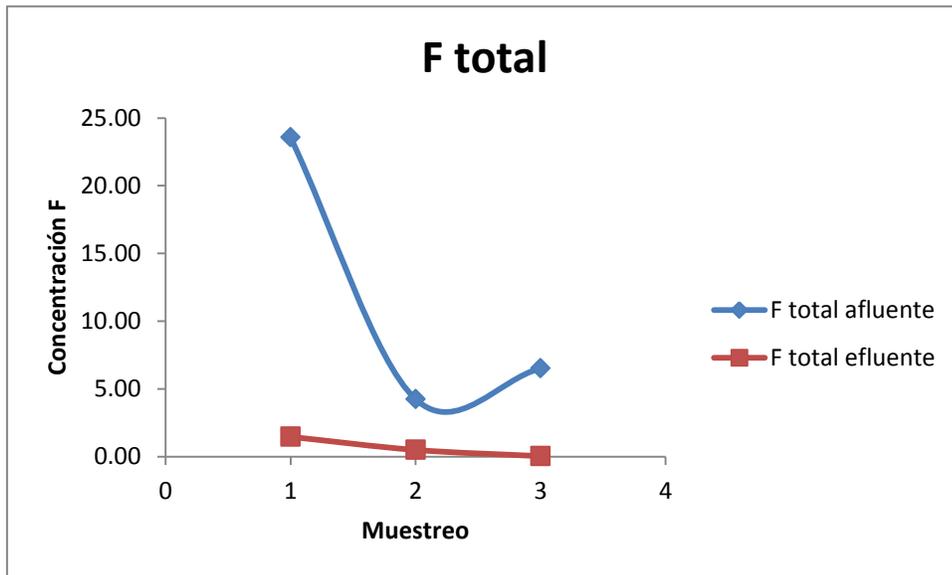


Figura B.4 Comportamiento del F total durante los muestreos

ANEXO C Cálculos

Cálculo de las remociones

Remoción de DQO

$$\% \text{ Remoción} = [(C_i - C_f) / C_i] * 100 \quad (4.1)$$

$$\% DQO_{rem.} = \left(\frac{593.34 - 44.83}{593.34} \right) * 100 = 92\%$$

Remoción de DBO

$$\% DBO_{rem.} = \left(\frac{416.67 - 13.73}{416.67} \right) * 100 = 97\%$$

Remoción de SST

$$\% SST_{rem.} = \left(\frac{608.01 - 43.83}{608.01} \right) * 100 = 93\%$$

Remoción de F total

$$\% F_{Totalrem.} = \left(\frac{11.44 - 0.66}{11.44} \right) * 100 = 94\%$$

Remoción de N total

$$\% N_{Totalrem.} = \left(\frac{38.45 - 1.89}{38.45} \right) * 100 = 95\%$$

Cálculo de dimensiones

Cálculo del caudal que puede recibir el biofiltro según sus dimensiones
Basado en 70m x 35m. Usando la Ecuación 3.6

$$A_s = \frac{Q(\ln \frac{C_0}{C})}{Kr * n} \quad \text{Despejando el Q seria}$$

$$Q = \frac{Kr * n * A_s}{\left(\ln \frac{C_0}{C}\right)} = \left(\frac{1.75 * 0.4 * 0.6 * 2450}{\ln \left(\frac{593}{44}\right)}\right) = 395 m^3/d$$

Tiempo de retención de diseño

Usando la Ecuación 3.7

Tiempo de retención calculado con el caudal de aguas grises y pluviales.

$$t = \left(\frac{2450 m^2 * 0.6 m * 0.4}{\frac{395 m^3}{d}}\right) = 1.5 \text{ dias} \quad (3.7)$$

Tiempo de retención calculado con el caudal actual de 15 m³/d.

$$t = \left(\frac{2450 m^2 * 0.6 m * 0.4}{15 \left(\frac{m^3}{d}\right)}\right) = 39.2 \text{ dias} \quad (3.7)$$

Área superficial, usado Ecuación 3.6

$$A_s = 70 m * 35 m = 2450 m^2 \quad (3.6)$$

Área superficial específica

$$A_{esp} = \frac{A}{\text{habitantes}} = \left(\frac{2450 m^2}{200 \text{ hab}}\right) = 12 m^2/PE \quad (C.1)$$

Carga orgánica

$$C.O = \frac{Q_i C_i}{A} = \left(\frac{15 \frac{m^3}{d} * 593 \frac{g}{m^3}}{2450 m^2}\right) = 3.6 g DBO/m^2 d \quad (C.2)$$

Carga Hidráulica

$$C.H = \left(\frac{Q}{A}\right) = \left(\frac{15 \frac{m^3}{d}}{2450 m^2}\right) = 0.006 m^3/m^2 d \quad (C.3)$$

ANEXO D Arto. 23, Decreto 33-95

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA DE NICARAGUA

CONSIDERANDO

I

Que los artículos 59, 60 y 102 de la Constitución Política de Nicaragua establecen como un derecho social el garantizar un medio ambiente sano para todos; la obligación del Estado de proteger, conservar y utilizar racionalmente los recursos naturales.

II

Que es prioritario armonizar el desarrollo económico del país con el aprovechamiento racional y la protección de los recursos hídricos para el uso de las generaciones presentes y futuras lo que hace necesario la aplicación de regulaciones destinadas a la protección de la calidad del agua por medio de normativas de carácter reglamentario para el control de la contaminación proveniente de las aguas residuales.

III

Que se hace necesario ajustar los valores máximos permisibles de los diferentes parámetros vinculados al vertido de aguas residuales en concordancia con el desarrollo tecnológico, institucional y con el nuevo marco legal.

IV

Que el Convenio de Cartagena suscrito por Nicaragua en su Protocolo denominado Fuentes Terrestres de Contaminación Marina promueve la elaboración y establecimiento de programas y medidas apropiadas para prevenir, reducir y controlar la contaminación proveniente de fuentes terrestres, sobre la base del cumplimiento de límites de descarga de efluentes dentro de un periodo de tiempo dado el cual puede extenderse como prórroga si el país demuestra su accionar y reducción de carga contaminante

V

Que el deficiente manejo de las aguas residuales en el país, está impactando de manera negativa los ecosistemas acuáticos con los consiguientes efectos sobre la salud humana y la biodiversidad, por lo que es imperioso desarrollar un instrumento que regule los vertidos y armonice las disposiciones institucionales y legales de la nueva legislación de aguas.

VI

Que la ley General de Aguas Nacionales en su Arto. 102 establece que las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas requieren de permiso para verter en forma permanente, intermitente u ocasional aguas residuales en cuerpos receptores que sean aguas nacionales o bienes del dominio público, de conformidad a las normas y lineamientos establecidos por MARENA, incluyendo

las aguas marítimas, igualmente para infiltrar o inyectar en terrenos públicos o privados, cuando puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos.

Por Tanto

En uso de las facultades que le confiere la Constitución Política,

HA DICTADO

El siguiente:

“REGLAMENTO PARA LOS VERTIDOS DE AGUAS RESIDUALES A CUERPOS RECEPTORES Y ALCANTARILLADOS SANITARIOS”

Tabla D.1 Arto. 23 Disposición de Aguas Domesticas

Parámetros	Rangos y Límites máximos permisibles < 75 000 habitantes
DBO	110
DQO	220
Sólidos suspendidos Totales	100
Grasas y Aceites	20
Sólidos sedimentables	1.0
pH	6-9

Fuente: Decreto 33-95

ANEXO E Imágenes



Figura E.1 Toma de muestras de efluente



Figura E.2 Medición de solidos Sedimentables. (1) Agua de afluente.



Figura E.3 Winkler para DBO



Figura E.4 Campana de digestión



Figura E.5 Equipos usados en solidos suspendidos



Figura E.6 Cristalería usada en los análisis



Figura E.7 Titulación para pruebas de laboratorio

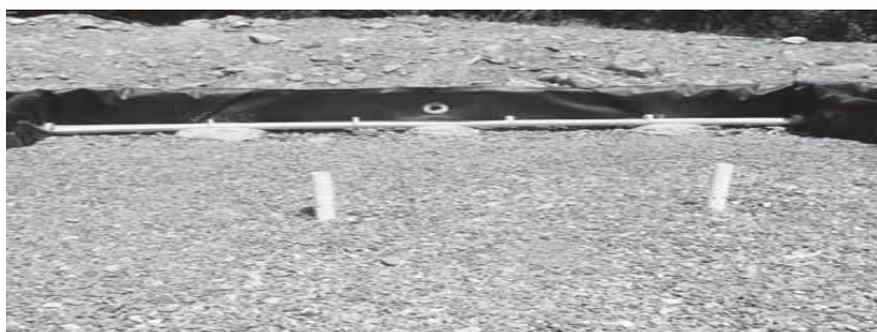


Figura E.8 Tubería de entrada al Biofiltro

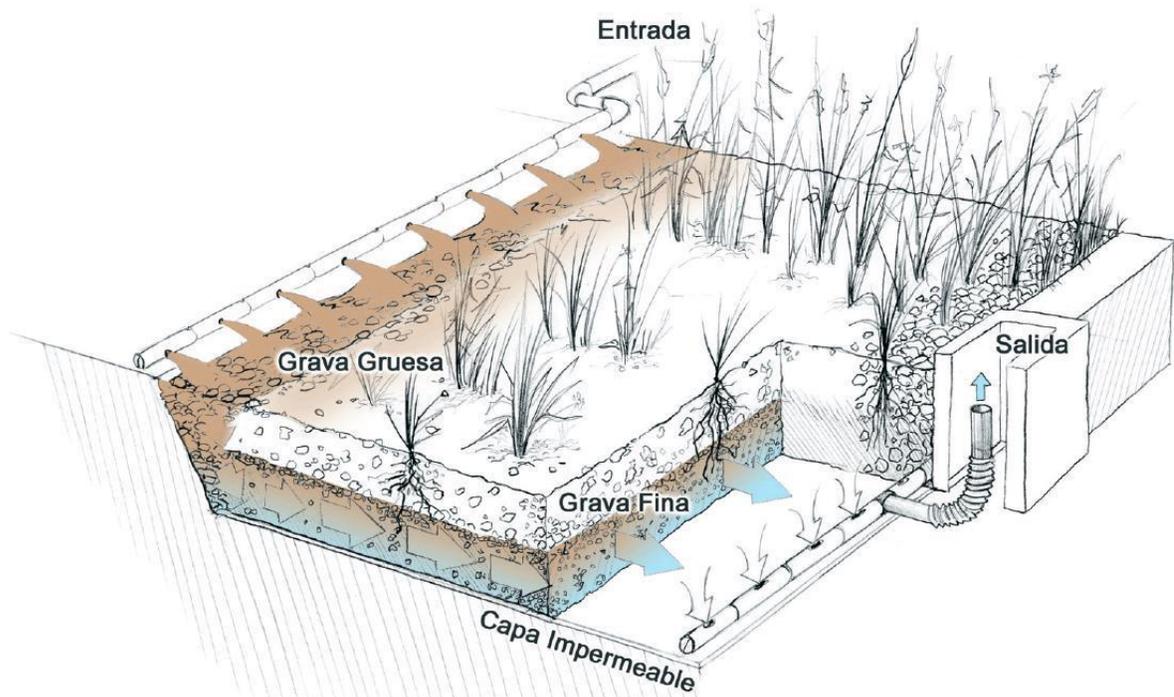


Figura E.9 Vista 3D de un biofiltro
Fuente: www.google.com.ni / imágenes



Figura E.10 Biofiltro y su vegetación
Fuente: www.google.com/imágenes

ANEXO F Planos del Biofiltro La Libertad

Planos del Biofiltro La Libertad, Chontales