



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos  
Hidráulicos (ERIS)

**Diseño y construcción de un filtro intermitente de grava sin  
recirculación y comparación con eficiencias teóricas de filtros  
con recirculación para el tratamiento de agua residual doméstica**

**Ing. Norman Leonel Siguí Gil**

Asesorado por Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos

Guatemala, septiembre de 2013

Universidad de San Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería

**Diseño y construcción de un filtro intermitente de grava sin recirculación y comparación con eficiencias teóricas de filtros con recirculación para el tratamiento de agua residual doméstica**

Estudio especial  
(Tesis)

Presentado a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos  
Hidráulicos –ERIS-  
Por el ingeniero civil

**Norman Leonel Siguí Gil**

Asesorado por el Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos

Como requisito previo para optar al grado académico de

**Maestro (*Masgister Scientifcae*) en Ciencias de Ingeniería Sanitaria**

Guatemala, septiembre de 2013

Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería



**Nómina de Junta Directiva**

Decano	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Vocal I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Vocal II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
Secretario	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos  
Hidráulicos**

Msc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

**Tribunal que practicó el examen general privado**

Examinador	Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Examinador	Msc. Ing. Joram Gil Larroj
Examinador	Msc. Ing. Zenón Much Santos

## **Honorable tribunal examinador**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**Diseño y construcción de un filtro intermitente de grava sin recirculación y comparación con eficiencias teóricas de filtros con recirculación para el tratamiento de agua residual doméstica**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, de la Facultad de Ingeniería con fecha julio 2013.



**Ing. Norman Leonel Siguí Gil**

normanlsg@gmail.com

Guatemala 23 de septiembre de 2013

Señores  
Comisión de Admisión y Otorgamiento de grado  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos  
Hidráulicos

UNIVERSIDAD DE  
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería  
Escuela Regional de Ingeniería  
Sanitaria y Recursos Hidráulicos  
ERIS

Edificio de ERIS  
Área de prefabricados Facultad de  
Ingeniería  
Ciudad Universitaria zona 12  
Ciudad de Guatemala 01012  
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,  
Ext. 86213 y 86212  
(502) 2418 9138

[www.ingenieria-usac.edu.gt](http://www.ingenieria-usac.edu.gt)

Respetuosamente les comunico que he revisado, en mi calidad de Asesor y Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el documento de Estudio Especial titulado:

**Diseño y construcción de un filtro intermitente de grava sin recirculación y comparación con eficiencias teóricas de filtros con recirculación para el tratamiento de agua residual doméstica.**

Presentado por el estudiante de la maestría antes mencionada,

**Ingeniero Civil Norman Leonel Siguí Gil**

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos – ERIS- y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio.

Agradeciendo la atención a la presente, se suscribe de  
ustedes,

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos  
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria



Guatemala, 20 de septiembre de 2013

Ingeniero Pedro Saravia  
Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Saravía:

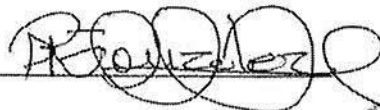
Por este medio extiendo constancia a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, de la Facultad de Ingeniería, que se ha realizado satisfactoriamente la revisión y corrección de estilo del trabajo de graduación de Maestría en Ingeniería Sanitaria: **Diseño y construcción de un filtro intermitente de grava sin recirculación y comparación con eficiencias teóricas de filtros con recirculación para el tratamiento de agua residual doméstica**, del estudiante ingeniero **Norman Leonel Siguí Gil**, número de carné: **100022695**

Para los requerimientos que su despacho necesite.

Atentamente,

*Rosa Amelia González Domínguez*  
LICENCIADA EN LETRAS  
Colegiado No. 5284

(f) y sello



Licda. Rosa Amelia González Domínguez  
Unidad de Lingüística  
Facultad de Ingeniería



## **Acto que dedico a:**

### **Mi familia**

Tanto mis padres como mis hermanos, porque me han acompañado a lo largo de toda mi vida personal y profesional.

### **Mi novia**

Inés Godínez, porque te has convertido en parte de mi corazón y mi vida.

### **Mis amigos**

A los viejos de siempre y a los nuevos, que han llegado a ocupar un lugar muy especial y esencial en mí existir.

### **Mis familiares**

A mis demás familiares, que directa o indirectamente me han apoyado y siempre confiaron que verme triunfar.



## **Agradecimientos a:**

### **Mis padres**

Porque siguieron apoyándome y me animaron a estudiar más. Porque son mi principal fuente de enseñanzas y consejos.

### **Mi novia**

Por alentarme siempre a esforzarme y sobre todo por ser centro de inspiración y felicidad.

### **Mis amigos**

A todos los amigos que me ayudaron a lo largo de mi carrera, con su amistad y compartiendo su conocimiento.

### **Mi asesor**

Ing. Adán Pocasangre, por ser guía en toda la maestría, brindando consejo y conocimiento técnico para poder realizar un buen trabajo.

### **Mis profesores**

Por su dedicación y esfuerzo en la enseñanza que me formó.

## Índice general

Índice de ilustraciones .....	V
Listado de símbolos .....	VII
Glosario .....	IX
Resumen .....	XI
Objetivos .....	XIII
Planteamiento del problema .....	XV
Hipótesis .....	XVI
Alcances de la investigación .....	XVII
Justificación .....	XIX
Antecedentes .....	XXI
1. Marco teórico .....	1
1.1. Filtración en medio granular .....	1
1.1.1. Mecanismos de remoción .....	1
1.2. Tratamiento biológico del agua residual .....	3
1.2.1. Procesos del tratamiento biológico .....	6
1.3. Filtros con recirculación .....	6
1.3.1. Esquema general.....	6
1.3.2. Funcionamiento .....	7
1.3.3. Parámetros de diseño.....	9
1.3.4. Ventajas y desventajas de filtros con recirculación.	11
1.4. Biodigestor clarificador PTAR Arturo Pazos .....	12
1.4.1. Esquema general.....	13
1.4.2. Descripción general del proceso de tratamiento.....	14
1.4.3. Aforo del biodigestor clarificador.....	16

1.5.	Filtros intermitentes de arena.....	16
2.	Metodología .....	17
2.1.	Selección de parámetros de control.....	18
2.1.1.	Demanda bioquímica de oxígeno.....	18
2.1.2.	Demanda química de oxígeno.....	19
2.1.3.	Sólidos suspendidos totales .....	20
2.2.	Toma de muestras .....	21
2.3.	Número de muestras.....	22
2.4.	Descripción del proceso de tratamiento .....	24
2.5.	Diseño del sistema de tratamiento .....	24
2.5.1.	Tasa de carga hidráulica de diseño.....	25
2.5.2.	Proceso constructivo .....	28
2.5.3.	Carga orgánica de diseño .....	31
2.5.4.	Dosificación de caudal .....	32
2.6.	Esquema final del sistema de tratamiento.....	34
3.	Resultados.....	37
3.1.	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días .....	37
3.2.	Demanda química de oxígeno .....	39
3.3.	Sólidos suspendidos totales.....	40
3.4.	Oxígeno disuelto .....	42
3.5.	Turbiedad .....	43
3.6.	Color aparente .....	44
3.7.	Potencial de hidrógeno.....	46
4.	Discusión de resultados.....	49

5.	Manual de operación y mantenimiento.....	51
5.1.	Componentes del sistema .....	51
5.1.1.	Unidad derivadora de caudal.....	51
5.1.2.	Dispositivo para dosificación de caudal .....	52
5.1.3.	Sistema de distribución de caudal .....	52
5.1.4.	Medio filtrante .....	53
5.1.5.	Fondo falso.....	53
5.2.	Labores de operación y mantenimiento.....	53
5.2.1.	Operación .....	54
5.2.2.	Mantenimiento .....	54
5.2.2.1.	Ajustes de rutina.....	56
5.3.	Medidas de seguridad y salud.....	57
5.3.1.	Materiales .....	57
5.3.2.	Equipo y herramientas.....	57
5.3.3.	Otras medidas de seguridad.....	58
	Conclusiones .....	59
	Recomendaciones .....	63
	Bibliografía.....	65
	Anexos .....	67



## Índice de ilustraciones

### Figuras

1.	Mecanismos de remoción en un filtro de medio granular.....	3
2.	Esquema general de un filtro con recirculación. ....	7
3.	Efecto de la dosificación y tasa de aplicación.....	8
4.	Esquema general biodigestor anaerobio .....	13
5.	Esquema general biodigestor anaerobio .....	17
6.	División de los sólidos totales .....	20
7.	Puntos para toma de muestras.....	22
8.	Curvas de niveles de confianza .....	23
9.	Derivador de caudal.....	26
10.	Dimensiones del filtro en planta.....	29
11.	Elevación del filtro.....	30
12.	Vista isométrica del filtro .....	30
13.	Filtro intermitente construido.....	31
14.	Esquema del dosificador.....	34
15.	Esquema del sistema, vista en planta .....	35
16.	Perfil de hidráulico del sistema de tratamiento .....	35
17.	Sistema construido .....	36
18.	Gráfica de resultados de DBO <sub>5</sub> .....	38
19.	Gráfica de resultados de DQO.....	40
20.	Gráfica de resultados de SST.....	41
21.	Gráfica de resultados de OD .....	43
22.	Gráfica de resultados de turbiedad.....	44
23.	Gráfica de resultados de color aparente.....	45

24.	Gráfica de resultados de pH.....	47
-----	----------------------------------	----

### **Tablas**

I.	Mecanismos de remoción en un filtro de medio granular. ....	2
II.	Clasificación de organismos según fuentes de energía y carbono .....	5
III.	Criterios de diseño de filtros con recirculación.....	10
IV.	Remoción de DBO y SST en filtros con recirculación en USA.....	11
V.	Rendimiento promedio de filtros con recirculación .....	11
VI.	Rendimiento promedio del filtro con recirculación en PTAR de Puerto Barrios.....	12
VII.	Características del biodigestor clarificador .....	14
VIII.	Rangos de índice de biodegradabilidad.....	19
IX.	Resumen de resultados de DBO <sub>5</sub> .....	38
X.	Resumen de resultados de DQO.....	39
XI.	Resumen de resultados de SST .....	41
XII.	Resumen de resultados de OD.....	42
XIII.	Resumen de resultados de turbiedad .....	43
XIV.	Resumen de resultados de color aparente .....	45
XV.	Resumen de resultados de pH .....	46
XVI.	Labores de mantenimiento .....	55
XVII.	Ajustes de rutina .....	56

## Listado de símbolos

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Área
<b>S</b>	Azufre
<b>Ca</b>	Calcio
<b>C.O</b>	Carga orgánica
<b>Qm</b>	Caudal medio
<b>cm</b>	Centímetro
<b>PVC</b>	Cloruro de polivinilo
<b>DBO</b>	Demanda bioquímica de oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno
<b>d</b>	Día
<b>CO2</b>	Dióxido de carbono
<b>P</b>	Fósforo
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>l</b>	Litro
<b>Mg</b>	Magnesio
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>min</b>	Minuto
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>OD</b>	Oxígeno disuelto
<b>PTAR</b>	Planta de tratamiento de agua residual
<b>PET</b>	Polietileno Tereftalato



<b>K</b>	Potasio
<b>SST</b>	Sólidos suspendidos totales
<b>THA</b>	Tasa hidráulica de aplicación

## **Glosario**

<b>Aforo</b>	Medida del caudal de una corriente de líquido.
<b>Carga hidráulica</b>	Cantidad de caudal que ingresa a la unidad de tratamiento por unidades de área y tiempo.
<b>Carga orgánica</b>	Cantidad de materia orgánica que ingresa a la unidad de tratamiento por unidades de área y tiempo.
<b>Demanda bioquímica de oxígeno</b>	Parámetro que mide la cantidad de materia orgánica que puede ser oxidada por medios biológicos.
<b>Demanda química de oxígeno</b>	Parámetro que mide la cantidad de materia orgánica que puede ser oxidada por medios químicos.
<b>Dosificación de Caudal</b>	Es permitir el ingreso del agua residual en intervalos de tiempo al sistema de tratamiento.
<b>Línea piezométrica</b>	Es la línea que representa las cotas del nivel del líquido a lo largo de un trayecto.

<b>Proceso aerobio</b>	Proceso biológico que se da en presencia de oxígeno.
<b>Proceso anaerobio</b>	Proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno.
<b>Recirculación del agua residual</b>	Es retornar una porción del agua que se está tratando, a la entrada del sistema de tratamiento.
<b>Sólidos suspendidos totales</b>	Cantidad de sólidos que se encuentran en el agua y que son retenidos por una membrana filtrable con tamaño nominal de poro de 1,2 micrómetros.
<b>Tratamiento de agua residual</b>	Conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos destinados a limpiar el agua residual para convertirla en agua apta para ser descargada a un cuerpo receptor o para poder reutilizarla en distintas actividades.
<b>USEPA</b>	Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés).

## Resumen

El presente estudio se basa en la construcción y evaluación de un filtro de grava de diámetro de 6 milímetros. En este filtro la entrada del caudal a la unidad es de forma intermitente y no tiene recirculación del mismo. La eficiencia del filtro se comparó con eficiencias teóricas de filtros con recirculación, obtenidas de la bibliografía, siendo estas mucho mejores a las alcanzadas por el filtro estudiado.

El filtro trabaja como tratamiento secundario a la salida de un biodigestor anaerobio, sin utilizar energía mecánica o eléctrica para funcionar, requiriendo pocas labores de operación y mantenimiento. El filtro presenta una remoción media de DBO<sub>5</sub> igual a 63 %, de DQO igual a 66 % y de SST igual a 45 %. La calidad del efluente cumple con los valores máximos permisibles por el Reglamento de Descarga de Aguas Residuales de Guatemala, pero es más baja a la que se obtendría con un filtro con recirculación.

Por otra parte, se describe brevemente el proceso de filtración en medio granular, el mecanismo de operación de filtros con recirculación y para finalizar el análisis y discusión de los resultados obtenidos.



## Objetivos

### General

Construir un filtro intermitente de grava pequeña sin recirculación y comparar su eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$ , DQO y SST con la eficiencia teórica de filtros con recirculación, en el tratamiento de agua residual doméstica.

### Específicos

1. Diseñar y construir un filtro intermitente de grava pequeña para tratamiento secundario de agua residual doméstica.
2. Construir un accesorio para dividir un caudal en partes iguales y un dispositivo para dosificación de caudal, eficientes y de bajo costo.
3. Realizar la medición de parámetros de  $\text{DBO}_5$ , DQO y SST, en el afluente y efluente del filtro y determinar la eficiencia de remoción de estos parámetros.
4. Comparar las eficiencias obtenidas con las eficiencias teóricas de filtros con recirculación.
5. Desarrollar un manual de operación y mantenimiento para el sistema de tratamiento propuesto.



## Planteamiento del problema

El uso de filtros con recirculación para el tratamiento de aguas residuales, ha demostrado ser bastante efectivo en la reducción de demanda bioquímica de oxígeno y la cantidad de sólidos suspendidos totales, utilizándolos como tratamiento secundario. A pesar de tener una gran eficiencia de remoción de los parámetros mencionados, crean un problema para países en desarrollo debido al costo que representa la recirculación del agua, lo que conlleva al abandono parcial o total de las plantas de tratamiento que utilizan esta tecnología.

Por lo mencionado, surge la idea de evaluar el uso de un filtro intermitente con un lecho filtrante de grava de un cuarto de pulgada de diámetro, y comparar la eficiencia de reducción de  $DBO_5$  y SST con las eficiencias teóricas de filtros con recirculación, obtenidas de la bibliografía. De esta forma se determinaría qué tan indispensable o importante es la recirculación en el tratamiento de agua residual con este tipo de filtros.

Por otra parte, es común el tratamiento de aguas residuales domésticas solamente con fosas sépticas. Esto no es suficiente ya que el efluente de una unidad de este tipo no llega a tener la calidad adecuada para poder ser descargada a cuerpos de agua. Si el filtro propuesto obtiene eficiencias aceptables, será una alternativa para tratamiento de efluentes de fosas sépticas.



## **Hipótesis**

La eficiencia en la reducción de  $\text{DBO}_5$  y SST del filtro intermitente sin recirculación construido, es aceptable y comparable a la eficiencia teórica de filtros con recirculación, siendo de hasta 95 % de remoción de los parámetros mencionados. Por lo tanto, el filtro construido es eficiente y funcional.

## **Alcances de la investigación**

El alcance de la investigación es llegar a determinar, si es adecuado eliminar la recirculación en un filtro de grava, y que este sea eficazmente aceptable. Para esto se realizará el muestreo de entrada y salida del filtro propuesto para determinar DBO<sub>5</sub>, DQO y SST. Las conclusiones se obtendrán evaluando los resultados, con eficiencias de filtros con recirculación obtenidos en la bibliografía.

Se realizará también la medición de potencial de hidrógeno, turbiedad, oxígeno disuelto y color aparente. Esto para tener un valor de referencia de estos parámetros tan importantes en la calidad del agua.

También se mencionará brevemente el proceso de muestreo y análisis de laboratorio. Se realizará el análisis de los resultados, concluyendo en las ventajas y desventajas que presenta el sistema. Además se realizará una breve descripción de la operación y el mantenimiento que requerirá el sistema propuesto, así como el proceso de diseño y dimensionamiento.



## **Justificación**

La investigación es de importancia por la escasez de estudios similares en el país. A través de la misma, se podrá comprobar el valor de la recirculación en el tratamiento del agua residual, además ejemplificará el proceso de construcción de filtros a pequeña escala. El mayor aporte es la propuesta de un sistema de tratamiento sin recirculación, convirtiéndolo en una tecnología de bajo costo de operación y mantenimiento.

Como valor agregado el estudio propone un sistema de dosificación de caudal eficaz y económico. Siendo un dispositivo que nunca ha sido utilizado en Guatemala para el tratamiento de agua residual, será algo innovador que a su vez podrá ser evaluado y mejorado posteriormente. No de menor importancia, es el aporte de la idea y diseño de un accesorio para dividir caudales de forma equitativa.



## **Antecedentes**

Por parte de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, existen varias investigaciones relacionadas al proceso de filtración en agua residual. Muchos de estos estudios son evaluaciones y construcciones de filtros percoladores con diferentes medios filtrantes, para estudiar la remoción de diversos parámetros tanto físicos como químicos.

La filtración ha sido investigada en varias ocasiones, pero no existe ningún estudio donde se realice un análisis a la filtración con entrada de caudal intermitente. Además, no hay estudio alguno que compare resultados obtenidos con las eficiencias teóricas de los filtros con recirculación.

Existe un estudio relacionado, titulado: “Evaluación de parámetros físicos y químicos de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales del barrio El Cangrejal, municipio de Puerto Barrios, departamento de Izabal”, por el ingeniero Mario Leonel Ramírez Toledo. Esta es una PTAR con sistema de recirculación.

El estudio especial realizado por el Ing. Ramírez, evalúa la eficiencia de la PTAR en la remoción de diversos parámetros, demostrando muy buenos resultados. Siendo la remoción promedio de  $DBO_5$  igual a 91,39 %, y de 89,2 % en lo que se refiere a SST. Este estudio se presentó en el 2003, año durante el cual la planta de tratamiento funcionaba adecuadamente, lastimosamente la misma se encuentra abandonada en la actualidad por falta de mantenimiento e interés por las autoridades, por lo tanto su rendimiento ya no debe ser el mismo.

Por otro lado, existe un estudio llamado: “Tratamiento de aguas residuales domésticas en Centroamérica. Un manual de experiencias, diseño, operación y sostenibilidad”. Este documento es un compendio de los conocimientos y experiencias de investigadores internacionalmente reconocidos en el área de Ingeniería Sanitaria.

El capítulo 7 del documento mencionado, denominado: “Filtros de Medio Granular con Recirculación” por Louis Salguero, ingeniero ambiental de la USEPA; contiene desde criterios de diseño de filtros con recirculación hasta la operación y mantenimiento de los mismos. Además, relata las experiencias vividas en las PTAR construidas en Puerto Barrios y Livingston, departamento de Izabal, Guatemala y La Unión, El Salvador. Se muestran datos de análisis físico-químicos realizados en los afluentes de cada planta y costos de construcción y operación.

# **1. Marco teórico**

## **1.1. Filtración en medio granular**

El proceso de filtración tiene como objetivo inicial, la remoción de sólidos en suspensión de un medio acuoso, al hacerlo escurrir a través de un medio poroso o lecho filtrante. La eliminación de la retención de los sólidos suspendidos se da por medio de la acción de diversos mecanismos físicos, químicos y biológicos que ocurren dentro de la unidad de filtración.

La filtración en medio granular, está condicionada principalmente por las características del agua a filtrar, el tamaño del material filtrante, la carga hidráulica y la velocidad de filtración.

### **1.1.1. Mecanismos de remoción**

Los mecanismos de remoción más influyentes son el cernido, sedimentación, impacto inercial, intercepción y adhesión. Pero también ocurren otros mecanismos como la adsorción química, adsorción física (fuerzas electroestáticas, electrocinéticas y fuerzas de Van der Waals) y floculación.

El cernido, también llamado retención, probablemente es el principal responsable de la eliminación de sólidos suspendidos. Este mecanismo es la simple retención de las partículas, en los poros del lecho filtrante de tamaño menor a dichas partículas. En la tabla I, se describen brevemente los demás mecanismos de remoción que ocurren en la filtración en medio granular.



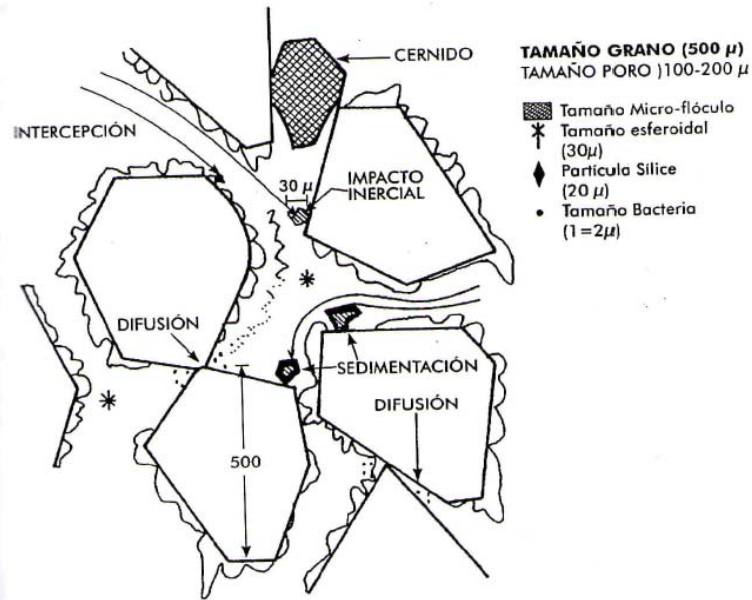
Tabla I. **Mecanismos de remoción en un filtro de medio granular**

<b>Mecanismo</b>	<b>Descripción</b>
Cernido	Las partículas mayores quedan retenidas en los poros del medio filtrante.
Sedimentación	Las partículas sedimentan sobre los granos del medio filtrante.
Impacto inercial	A velocidades altas de flujo, las partículas más pesadas siguen por inercia diferentes trayectorias a las líneas de flujo y se adhieren a los granos por impacto.
Intercepción	Las partículas suspendidas que siguen las líneas de flujo, se interceptan entre ellas y el medio filtrante, quedando así retenidas.
Adhesión	Sobre todo a velocidades bajas, las partículas se adhieren a los granos del medio filtrante.
Difusión	Debido al movimiento Browniano de las partículas, tienden a dispersarse de áreas de mayor concentración a áreas de menor concentración.
Adsorción química	Ocurre al utilizar ayudantes de filtración, que crean cadenas poliméricas que a su vez crean puentes químicos entre partículas y el medio filtrante.
Adsorción física	Combinación entre fuerzas electroestáticas y fuerzas de Van der Waals.

Fuente: elaboración propia (adaptado de la bibliografía).

A continuación en la figura 1, se aprecia de mejor manera cómo funcionan algunos mecanismos que ocurren en el proceso de filtrado.

Figura 1. Mecanismos de remoción en un filtro de medio granular



Fuente: ARBOLEDA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. p. 369.

## 1.2. Tratamiento biológico del agua residual

Como se explicó anteriormente, en el proceso de filtración ocurren diversos mecanismos físicos y químicos que ayudan en la remoción de sólidos en suspensión, pero una unidad de filtración también reduce la materia orgánica de un afluente.

Entre los mecanismos descritos en la tabla I, ninguno degrada directamente la materia orgánica, está es la labor de muchos tipos de microorganismos que viven en el medio filtrante.

La carga biológica que trae el agua cruda se introduce entre las partículas del medio filtrante, lo cual permite el crecimiento de una capa biológica llamada *Schmutzdecke*. Esta capa biológica está compuesta por diversas formas de vida como: diatomáceas, protozoos, rotíferas, bacterias e incluso algas.

Los microorganismos, principalmente bacterias, contribuyen en la eliminación de la DBO carbonosa, la coagulación de los sólidos no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica, de una forma biológica. El grado de remoción tiene relación directa con la maduración de la capa de microorganismos.

Además, los fenómenos de adsorción que se dan en la superficie de la capa biológica, inducen la remoción o inactivación de organismos patógenos. Por esto y todo lo mencionado previamente, el tratamiento biológico es algo necesario en un proceso de filtración.

Para poder reproducirse y funcionar de manera correcta, todos los microorganismos necesitan principalmente:

- Una fuente de energía
- Carbono para la síntesis de materia celular
- Elementos inorgánicos (nutrientes)

La fuente de energía puede ser la luz o provenir de las reacciones químicas de oxidación. La materia orgánica, el dióxido de carbono (dos de las principales fuentes de carbono) y los elementos inorgánicos (N, P, S, K, Ca y Mg) son parte del agua residual a tratar. Es así como los microorganismos se reproducen para realizar el tratamiento biológico.

La forma en que los organismos obtienen carbono los divide en heterótrofos y autótrofos. Los primeros utilizan el carbono orgánico para la formación de tejido celular, mientras los segundos obtienen carbono a partir del CO<sub>2</sub>.

También se clasifican a los organismos por su forma de obtener energía. Aquellos que la obtienen a partir de la luz, se denominan fotótrofos. Los organismos que obtienen energía a partir de reacciones químicas se conocen como quimiótrofos. En la tabla II, se resumen estas clasificaciones.

Tabla II. **Clasificación de organismos según fuentes de energía y carbono**

Clasificación		Fuente de energía	Fuente de carbono
Autótrofos	Fotoautótrofos	Luz	CO <sub>2</sub>
	Quimioautótrofos	Reacción de oxidación-reducción inorgánica	CO <sub>2</sub>
Heterótrofos	Fotoheterótrofos	Luz	Carbono orgánico
	Quimioheterótrofos	Reacción de oxidación-reducción orgánica	Carbono orgánico

Fuente: Metcalf & Eddy. Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización. p. 412.

La reducción de DBO en la filtración, se debe a los organismos quimioheterótrofos, que obtienen la energía mediante la oxidación de compuestos orgánicos.

### **1.2.1. Procesos del tratamiento biológico**

Los procesos pueden ser: aerobios o anaerobios. El proceso anaerobio se da en ausencia de oxígeno. El proceso aerobio es el caso contrario, se da en presencia de oxígeno. Por otra parte, el proceso anóxico o desnitrificación anaerobia, es el proceso por el cual el nitrógeno de los nitratos se transforma en nitrógeno gas en ausencia de oxígeno.

En el tratamiento con filtración, prevalece el tratamiento aerobio que realizará la eliminación de la materia orgánica y en algunos casos se dará nitrificación.

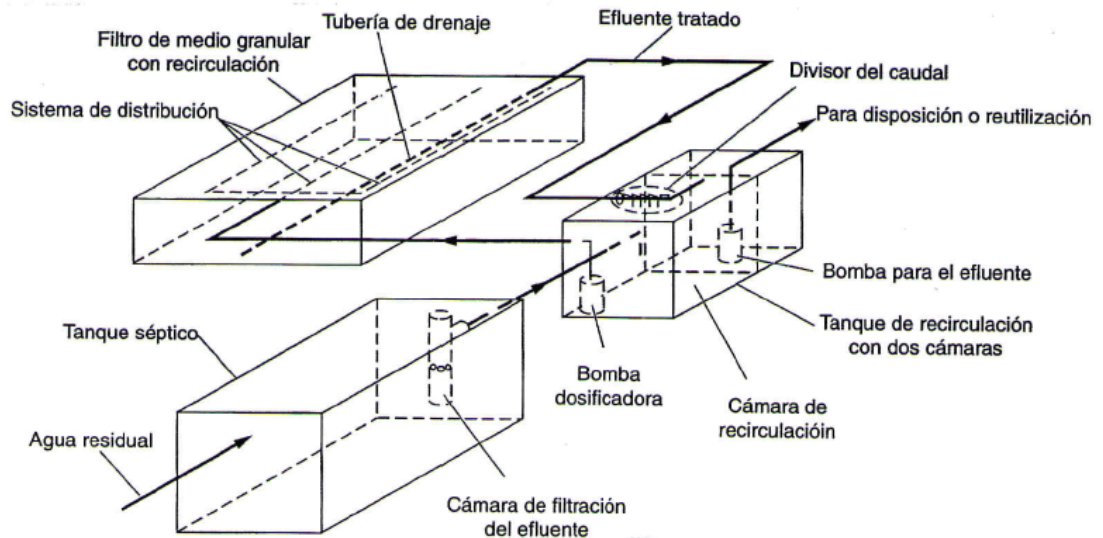
### **1.3. Filtros con recirculación**

Los filtros con recirculación, se derivaron de los filtros de arena intermitentes. Básicamente los mecanismos de que se llevan a cabo en ambos tipos de filtros, son los mismos, siendo la recirculación la principal diferencia.

#### **1.3.1. Esquema general**

Un filtro con recirculación consta básicamente de un depósito de recirculación y la unidad con el medio filtrante. En la figura 2, se aprecia de mejor manera los componentes de este tipo de filtros.

Figura 2. Esquema general de un filtro con recirculación



Fuente: Crites y Tchobanoglous. Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. p. 605.

### 1.3.2. Funcionamiento

Son dos los aspectos funcionales que diferencian un filtro con recirculación con cualquier otro tratamiento con medios filtrantes. Primero, como lo indica su nombre, es la recirculación del agua filtrada; y segundo la dosificación de caudal.

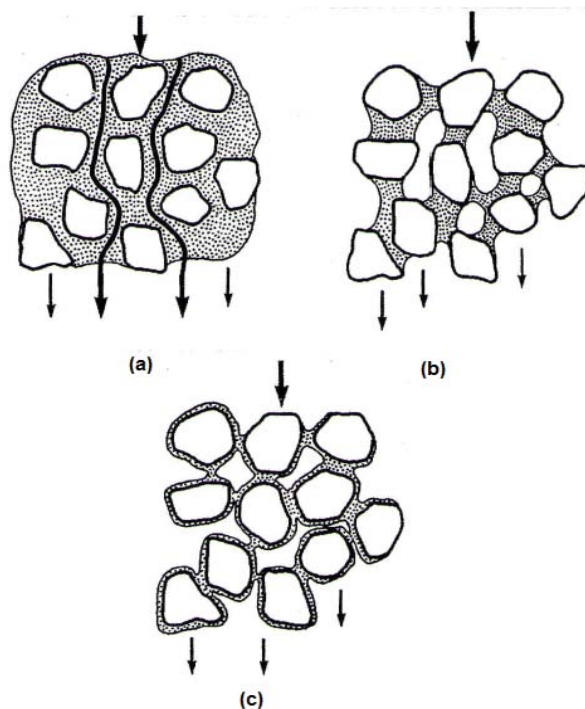
Una fracción del agua ya filtrada se devuelve al tanque de recirculación, mezclándola con el agua proveniente generalmente de un tratamiento primario y/o pretratamiento, y se dirige nuevamente hacia el medio filtrante.

Recircular no significa tratar el agua dos veces. El objetivo principal de recircular una parte del agua filtrada, es diluir el afluente al filtro y así poder tratar el agua con una tasa hidráulica mayor. De esta manera la materia

orgánica aplicada y absorbida en la película bacteriana, puede ser procesada con mayor facilidad por las bacterias. El líquido adicionado sirve también para lavar y arrastrar fuera del filtro material orgánico parcialmente descompuestos, desechos bacteriales y residuos retenidos en el filtro, que luego tienen a acumularse en el tanque de recirculación.

La dosificación de caudal es importante porque se ha demostrado que mejora la eficiencia de los filtros. Esta importancia se comprende mejor al ver la figura 3.

Figura 3. **Efecto de la dosificación y tasa de aplicación**



Fuente: Crites y Tchobanoglous. Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. p. 575.

La figura 3a, representa lo que sería una aplicación continua durante todo el día, es decir una dosis por día. El líquido aplicado llena los intersticios del medio filtrante, permitiendo que algunas partículas atraviesen el medio sin ser tratadas. Si se aplican pocas dosis por día, se obtendrá algo parecido a lo que muestra la figura 3b, los intersticios se llenan parcialmente.

La figura 3c, muestra lo que se obtiene en un filtro con recirculación al aplicar varias dosis diarias. Se reduce el volumen del líquido aplicado y fluye alrededor del medio filtrante formando una delgada película, al ocurrir esto los constituyentes del agua residual aplicada que se encuentran en forma soluble y coloidal son absorbidos, y el oxígeno del aire ubicado entre los intersticios del medio, pasa a través de la película del líquido hasta las bacterias aerobias que degradan la materia orgánica. De esta forma, se logra un desempeño mucho más eficiente.

### **1.3.3. Parámetros de diseño**

Generalmente los filtros con recirculación poseen un lecho filtrante constituido por arena gruesa y/o grava fina. Medio filtrantes conformados por arenas muy finas, presentan una posible rápida colmatación y carreras de filtración muy cortas. Es por eso que se ha recomendado un tamaño de partícula no menor a 0,6 milímetros (al utilizar arena). En caso de utilizar grava fina, el tamaño varía de 1 hasta 6 milímetros.

Tamaños mayores de medio filtrante ayudan a tener mayores tasas de filtración, pero a su vez se ha observado en diversas investigaciones que a mayor tamaño, se disminuye la remoción de nitrógeno.



En la tabla III, se muestra en cuadro resumen, los parámetros de diseño principales de los filtros con recirculación.

Tabla III. **Criterios de diseño de filtros con recirculación**

Factor de Diseño		Unidad	Intervalo	Valor usual
Medio filtrante	Material	Medio granular lavado y durable		
	Tamaño efectivo	mm	1 - 5	2,5
	Profundidad	mm	450-900	600
	Coefficiente de uniformidad		< 2,5	2
Drenaje	Clase	Tubería de drenaje perforada o con ranuras		
	Tamaño	mm	75 - 100	100
	Pendiente	%	0 - 0,01	0
Distribución a presión	Tamaño de tubería	mm	25 - 50	38
	Tamaño del orificio	mm	3 - 6	3
	Altura hidráulica en el orificio	m	1 - 2	1,6
	Distancia entre tuberías	m	0,5 - 1,2	0,6
	Distancia entre orificios	m	0,5 - 1,2	0,6
Parámetros de diseño	Carga hidráulica	mm/d	120 - 200	160
	Carga de DBO	kg DBO/m <sup>2</sup> *d	0,01 - 0.04	< 0,025
	Relación de recirculación		3:1 - 5:1	4:01
Dosificación	Duración de aplicación	min	< 2 - 3	< 2
	Período entre aplicaciones	min	15 - 25	20
	Frecuencia	veces/d	48 - 120	
	Caudal por orificio	l/orificio*dosis	3,8 - 11,4	7,6
	Volumen del tanque de recirculación	caudal/d	0,5 - 1,5	1

Fuente: Crites y Tchobanoglous. Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. p. 610.

### 1.3.4. Ventajas y desventajas de filtros con recirculación

Los filtros con recirculación han demostrado a través de múltiples investigaciones, ser un tratamiento eficiente de efluentes de tratamientos primarios, como fosas sépticas. Según estudios, estos sistemas llegan a tener eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub> y SST de hasta 95 %. A continuación se muestran algunos datos de estudios realizados a filtros con recirculación.

Tabla IV. **Remoción de DBO y SST en filtros con recirculación en USA**

Ubicación	Medio Filtrante		DBO <sub>5</sub> (mg/l)		SST (mg/l)	
	d <sub>10</sub> (mm)	UC	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Elkton, Oregon	3,5	1,80	141	6	32	6
Orcas Village, Washington	2,0	1,75	166	4	113	5
South Prairie, Washington	4,3	1,60	181	4	34	4

Fuente: Crites y Tchobanoglous. Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. p. 608.

Tabla V. **Rendimiento promedio de filtros con recirculación**

Filtro de arena con recirculación	Afluente	Efluente
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	140-200	< 15
SST (mg/l)	237-600	< 15

Fuente: Metcalf & Eddy. Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización. p. 1180.

Tabla VI. **Rendimiento promedio del filtro con recirculación en PTAR de Puerto Barrios**

<b>PTAR "El Cangrejal" Pto. Barrios, Izabal</b>	<b>Afluente</b>	<b>Efluente</b>
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	229,74	15,58
SST (mg/l)	153,20	12,56

Fuente: Adaptado de RAMÍREZ, Mario. Evaluación de parámetros físicos y químicos de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales del barrio El Cangrejal, municipio de Puerto Barrios, departamento de Izabal.

Otra ventaja es que, si se realizó un buen diseño, no se requiere gran conocimiento del operador para su operación y mantenimiento. Los filtros con recirculación son un sistema adecuado para pequeñas comunidades.

La gran desventaja de estos filtros es que requieren de un sistema de bombeo para poder recircular el líquido. Esto se traduce en costos de electricidad o combustible, dependiendo del tipo de bomba, además del mantenimiento de la misma. Esto es un problema en países como Guatemala, donde no hay gran inversión en tratamiento de agua residual, la tarifa eléctrica es relativamente alta y al mantenimiento de los sistemas no se le da la importancia que merece.

#### **1.4. Biodigestor clarificador PTAR Arturo Pazos**

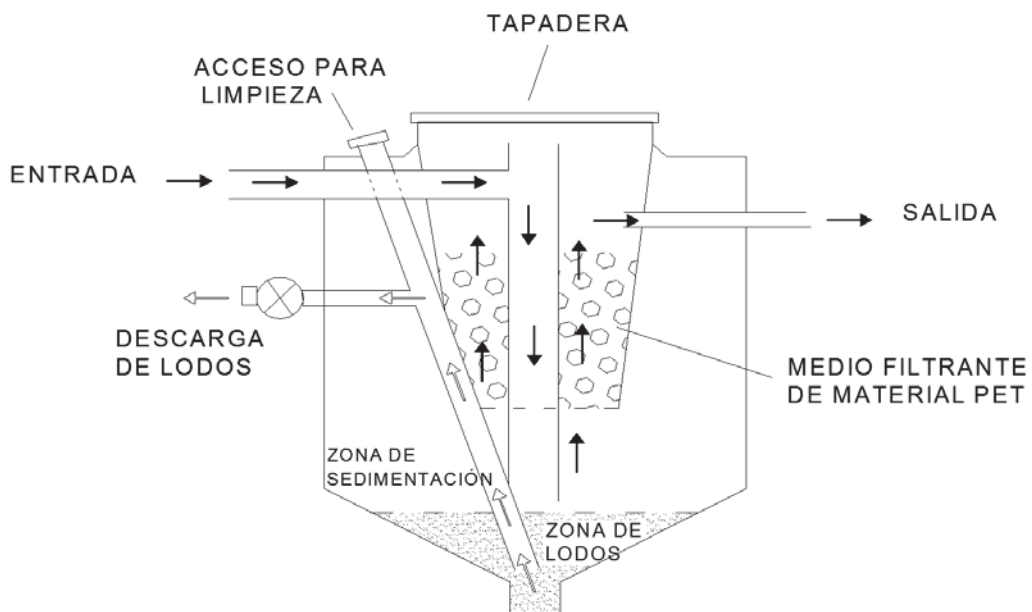
El efluente que tratará el filtro en estudio, proviene del Biodigestor Anaerobio de la Planta Piloto "Ing. Arturo Pazos", en la colonia Aurora II de la zona 13 de la ciudad de Guatemala. Esta unidad está ubicada al lado del canal sedimentador, que recoge el agua residual de la colonia y una pequeña parte se deriva hacia el biodigestor.

En los apartados siguientes se describirá brevemente el esquema de esta unidad de tratamiento y su funcionamiento.

#### 1.4.1. Esquema general

El biodigestor clarificador es un tanque Imhoff modificado. Es un sistema prefabricado por una empresa que se dedica especialmente a depósitos de polietileno. En la figura 4, se muestra un corte transversal de la unidad.

Figura 4. Esquema general biodigestor anaerobio



Fuente: elaboración propia.

Según algunas especificaciones técnicas, obtenidas de la dirección *web* de la empresa constructora, este modelo de biodigestor tiene una capacidad de 1 300 litros (volumen). Otros datos se pueden observar en la tabla VII, a continuación.

Tabla VII. **Características del biodigestor clarificador**

<b>Características de la unidad</b>	
Capacidad (litros)	1 300
Altura máxima (cm)	197
Diámetro (cm)	120
Altura de cono (cm)	45
Capacidad agua residual doméstica (personas)	10
Capacidad oficinas (personas)	50

Fuente: elaboración propia (adaptado de la bibliografía).

#### **1.4.2. Descripción general del proceso de tratamiento**

El proceso de tratamiento que proporciona el biodigestor clarificador, es muy similar al proceso que se da en una fosa séptica o en un tanque Imhoff. Como en dichas unidades, dentro del biodigestor se produce un tratamiento biológico anaerobio.

Prácticamente la unidad consta de dos cámaras. La primer cámara (parte superior) es la zona de sedimentación. Aquí es donde se da la clarificación del agua. El material que sedimenta se acumula en la zona de lodos, donde comienza la digestión de los mismos y la degradación de material orgánico sedimentado. El agua que fluye hacia arriba, pasa por la segunda cámara que es un medio filtrante constituido de material PET.

El material PET, tiene la función de proporcionar una superficie en para la adherencia y crecimiento de la película biológica. Esta película, está constituida de diversos microorganismos anaerobios y/o facultativos que ayudarán a digerir la materia orgánica que no haya sedimentado.

Para que funcione correctamente, como todo proceso biológico, el biodigestor requiere un tiempo de maduración para la formación de la película biológica en el medio filtrante y el crecimiento de microorganismos en la zona de lodos. Este es un proceso biológico en un medio suspendido (zona de sedimentación y lodos) en combinación de un proceso biológico en un medio fijo (material PET).

Entre las ventajas de este sistema se puede mencionar lo siguiente:

- Fácil instalación
- Material durable y resistente
- Fácil descarga de lodos
- Adecuado tratamiento primario del agua
- Mínima operación y mantenimiento

Entre las desventajas se distingue lo siguiente:

- Limitación en capacidad.
- Pocos modelos de fabricación
- Costo alto en comparación a una fosa séptica

### **1.4.3. Aforo del biodigestor clarificador**

El caudal del efluente se realizó por medio del método de aforo volumétrico. Se obtuvo como resultado un caudal igual a 3 733,60 litros por día.

### **1.5. Filtros intermitentes de arena**

Como se mencionó anteriormente, estos filtros se asemejan muchísimo con los mecanismos que actúan en el tratamiento de filtros con recirculación. Además de no poseer recirculación, otra diferencia importante es que el medio filtrante es de una granulometría menor. Esto se traduce en que para tratar un mismo caudal, tienen mayor dimensión que sus semejantes filtros con recirculación. Por esta razón, se utilizan preferiblemente para tratar caudales de viviendas aisladas.

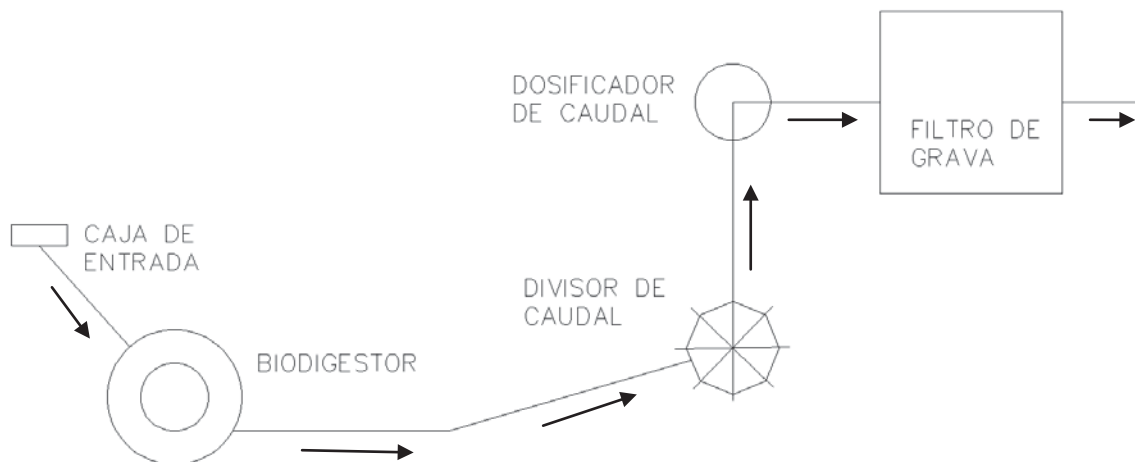
Básicamente un filtro intermitente de arena se compone de: sistema dosificador, medio filtrante y sistema de drenaje. Los criterios de diseño de estos filtros, son diferentes a los mostrados en la tabla III, esto por no poseer recirculación y por estar compuestos de un medio filtrante más pequeño.

## 2. Metodología

El primer paso fue el aforo del efluente del biodigestor clarificador ubicado en la Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual “Ing. Arturo Pazos”. La ubicación de dicha PTAR se puede observar en el anexo I. Previo a esto fue necesaria la reparación de pequeños desperfectos en la entrada del biodigestor.

El esquema general y diagrama de flujo del sistema de tratamiento es el que se muestra en la figura 5.

Figura 5. **Esquema general biodigestor anaerobio**



Fuente: elaboración propia.



## **2.1. Selección de parámetros de control**

El sistema funcionará como un tratamiento secundario, precedido por el tratamiento primario dado por el biodigestor. Su objetivo principal es reducir la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y los sólidos suspendidos totales. Por lo tanto estos son los parámetros que más interesan medir en cada muestreo.

### **2.1.1. Demanda bioquímica de oxígeno**

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO), es el parámetro más utilizado para medir la contaminación por materia orgánica. Es básicamente la cantidad de oxígeno que se requiere para estabilizar biológicamente la materia orgánica.

La DBO, se mide normalmente a los 5 días de tomada la muestra, es por eso que se utiliza el término  $DBO_5$ . Para su medición, normalmente se diluye la muestra con una solución preparada con nutrientes para asegurar la disponibilidad de los mismos durante el período de medición.

Para medir este parámetro, se toma primero la lectura de oxígeno disuelto (OD) de la muestra, inmediatamente después de ser diluida. Al cumplir los 5 días, se toma de nuevo una lectura de la muestra. Este procedimiento se debe llevar a cabo a una temperatura constante de la muestra, normalmente 20 grados centígrados. Es fácil concluir que la DBO está directamente relacionada con la cantidad de oxígeno disuelto del agua residual.

### 2.1.2. Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO), es la cantidad de oxígeno necesario para degradar la materia orgánica por vía química. Para medirla se utiliza un agente químico fuertemente oxidante y la prueba se debe realizar a elevadas temperaturas.

En el agua residual la DQO es siempre mayor que la DBO. Esto se debe a que es mayor el número de compuestos cuya oxidación se da por vía química frente a los que se oxidan por medios biológicos.

Debido a que el tiempo necesario para medir DQO es de aproximadamente 3 horas, es normal que se establezca la relación entre cantidad de DBO y DQO, y a partir de los datos de la DQO se lleve el control de las plantas de tratamiento.

Esta relación entre ambos parámetros también se utiliza para medir el índice de biodegradabilidad. Este indica si el agua puede ser tratada o no biológicamente en su totalidad. En la tabla VIII, se muestran los rangos con los que se maneja el índice de biodegradabilidad.

Tabla VIII. Rangos de índice de biodegradabilidad

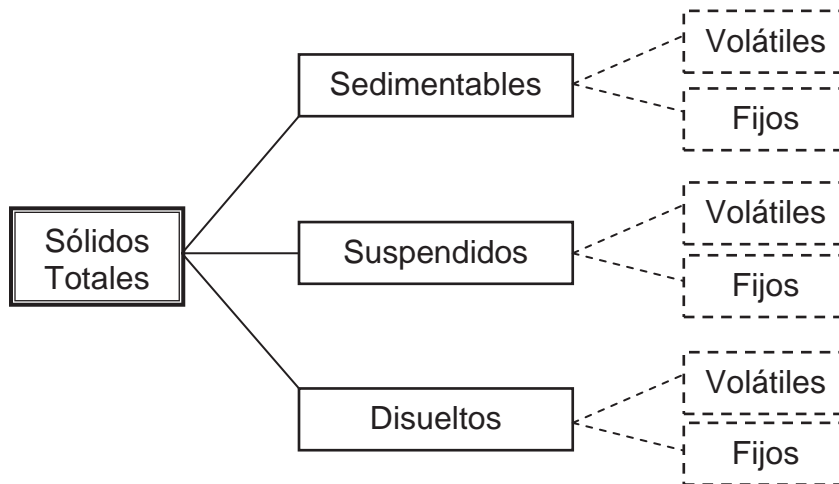
Índice de Biodegradabilidad	Descripción
> 60	Agua biológicamente tratable
$20 \leq (DBO_5/DQO) \leq 60$	Agua parcialmente tratable biológicamente
> 20	Agua no tratable biológicamente

Fuente: elaboración propia (adaptada de bibliografía).

### 2.1.3. Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos (SST) son una división de los sólidos totales, que son una de las características físicas del agua más importantes. La medición de sólidos se divide como se muestra a continuación en la figura 13.

Figura 6. División de los sólidos totales



Fuente: elaboración propia.

De manera general se definen los sólidos sedimentables, como los que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono Imhoff) en un período de una hora. Los sólidos disueltos son los capaces de atravesar un filtro con tamaño nominal de poro de 1,2 micrómetros. Y por último, los sólidos suspendidos son los retenidos por el filtro.

Además cada tipo de sólidos descrito, se subdivide en sólidos volátiles y fijos. Los primeros representan la fracción de materia orgánica que al llegar a altas temperaturas ( $550 \pm 50$  °C) se oxidará y escapará en forma de gas. Los

sólidos fijos representan la cantidad de materia inorgánica (mineral), la cual en su mayoría se mantiene estable a muy altas temperaturas.

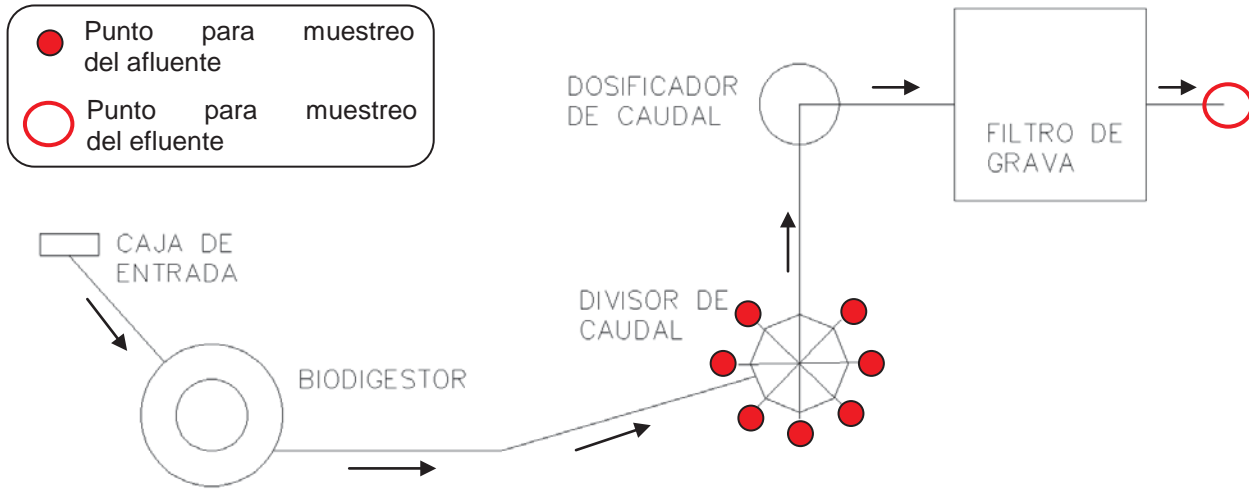
Para medir los sólidos suspendidos totales, se debe filtrar el líquido y luego pesar la membrana filtrante previamente pesada. La diferencia entre ambas mediciones, dará la cantidad de sólidos suspendidos en miligramos por litro.

## **2.2. Toma de muestras**

La toma de muestras se hará en la salida del biodigestor (tratamiento primario) y en la salida del filtro propuesto (tratamiento secundario). En la figura 7, se observa la ubicación de los puntos para toma de muestras que será de tipo puntual.

Las muestras correspondientes al afluente del filtro, serán tomadas en cualquiera de las salidas del derivador de caudal, y las muestras correspondientes al efluente serán tomadas directamente de la tubería de salida del filtro.

Figura 7. Puntos para toma de muestras



Fuente: elaboración propia (sin escala).

### 2.3. Número de muestras

El número total de muestras, debe tal que la cantidad de muestras a analizar otorgue resultados que se consideren representativos de la realidad. Para determinar este número, se utilizaron curvas de niveles de confianza establecidos por la siguiente fórmula:

$$N \geq \left( \frac{t * s}{U} \right)^2$$

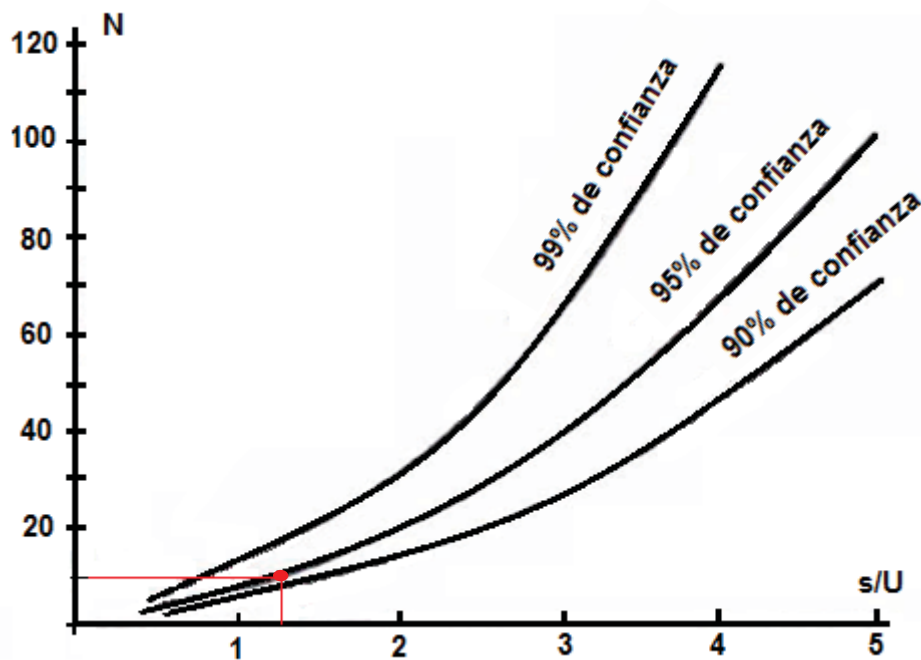
Donde:

- N = número total de muestras
- t = t student para un determinado nivel de confianza
- s = desviación estándar

U = nivel de confianza aceptable

Para este caso se tomará una desviación estándar igual a 0,02 y un nivel de confianza de 0,015. La relación entre estos dos valores ( $s/U$ ) es igual a 1,33. Tomando un nivel de confianza igual a 95 % y con la ayuda de la gráfica mostrada en la figura 8, se obtiene el número de muestras aproximado que se debe utilizar, siendo este igual o mayor a 9 muestras.

Figura 8. Curvas de niveles de confianza



Fuente: GALINDO, Carlos. Estudio, caracterización y tratamiento de lodos provenientes de fosas sépticas. p. 21.

En este estudio se tomaron 24 muestras, divididas en 12 muestras en la entrada del filtro e igual número en la salida del mismo, recolectadas en intervalos de una semana. Las muestras, de la número 1 a la 7, fueron

tomadas por la tarde, de 14 a 15 horas. El resto de muestras se tomaron en jornada matutina de 8 a 9 horas. El filtro trató el agua residual por un período total de estudio igual a 87 días.

#### **2.4. Descripción del proceso de tratamiento**

Como ya se mencionó, el proceso de tratamiento es secundario. El agua residual cruda recibe un pretratamiento en una pequeña parte del canal sedimentador. Se añadió una pantalla para retener sólidos flotantes y grasas, previo a la entrada del biodigestor.

El tratamiento primario es dado por el biodigestor, según lo explicado en 1.4, para pasar hacia el filtro construido. Dentro del medio filtrante se forma la película de microorganismos, que darán el tratamiento biológico y donde también ocurrirán procesos de tratamiento físico y químicos.

El filtro recibirá oxígeno a través de su superficie y varias aberturas en el fondo, que permitirán la entrada de este elemento indispensable para que el tratamiento sea aerobio como se pretende.

#### **2.5. Diseño del sistema de tratamiento**

En los siguientes apartados se muestra el procedimiento utilizado para el diseño del filtro estudiado.

### 2.5.1. Tasa de carga hidráulica de diseño

El caudal de salida del biodigestor es de 3 733,60 litros por día. Este es un caudal relativamente grande, trabajar un caudal de este tamaño equivale a que las dimensiones del filtro sean grandes.

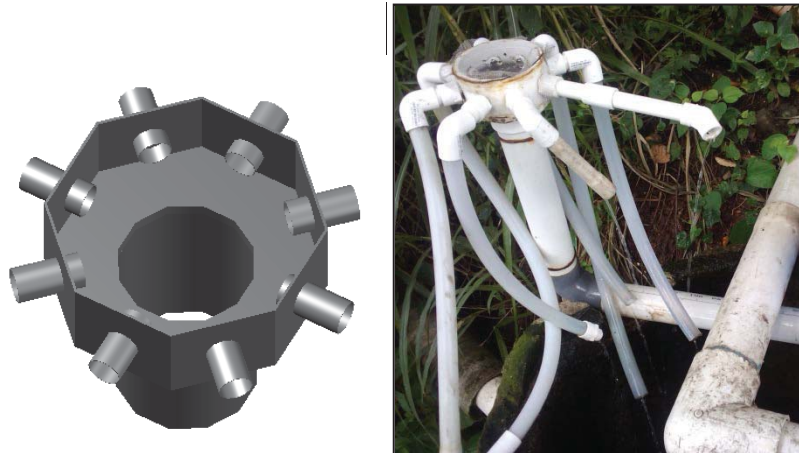
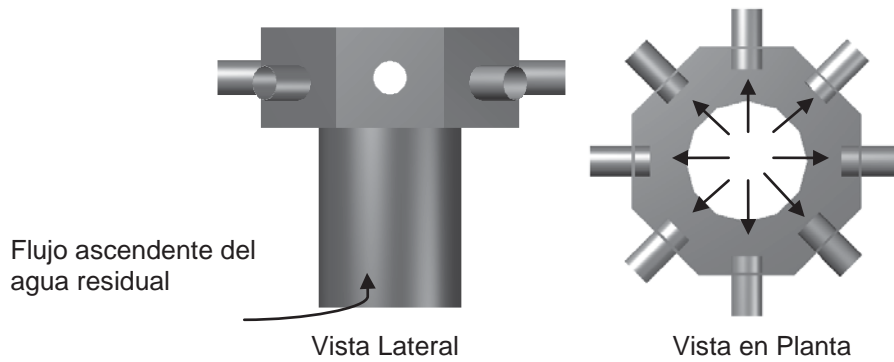
Como ya se ha dicho, los filtros con recirculación se usan esencialmente para pequeñas comunidades o viviendas aisladas. Por tal motivo, se dividió el efluente del biodigestor y solamente se trató una parte del mismo. Para esto se diseñó un sistema de división de caudal, que lo fracciona en ocho partes iguales. De esta forma se obtiene un filtro de menores dimensiones, lo que es ideal para motivos de investigación.

La división del caudal, pretendiendo hacerla de bajo costo y de una manera fácil, se realizó por medio de los siguientes accesorios de PVC:

- 1 Reducidor *Bushing* 2"- 4"
- 8 adaptadores macho de ½"
- 1 tubo de 2"
- 1 codo de 90° de 2"



Figura 9. Derivador de caudal



Fuente: elaboración propia.

El reductor *bushing*, se perforó en cada uno de sus ocho lados, con un diámetro igual a los adaptadores macho de  $\frac{1}{2}$ ". Cada perforación se hizo de forma simétrica y a una misma altura. Se coloca cada adaptador con teflón y se ubica el accesorio al final de la tubería del afluente. Se debe colocar el dispositivo exactamente a 90 grados (a plomo), para que el caudal (que ingresa en sentido ascendente) se divida equitativamente en 8 partes.

Por lo tanto el caudal a tratar es de:

$$Q_m = \frac{3\,733,60 \text{ l/d}}{8} = 466,70 \text{ l/d}$$

Este caudal servirá para el dimensionamiento del filtro. Para esto se utiliza la siguiente fórmula:

$$A = \frac{Q_m * F}{THA}$$

Donde:

A = área del filtro (m<sup>2</sup>)

Q<sub>m</sub> = caudal medio de entrada (l/día)

F = factor de caudal pico

THA = tasa hidráulica de aplicación (carga hidráulica) en l/m<sup>2</sup>/día

La tasa de carga hidráulica, es básicamente la tasa con la que entra el líquido a la unidad filtrante. Está dada en unidades de volumen sobre área por tiempo, que básicamente es una velocidad. En el sistema internacional se trabaja usualmente como milímetros por día (mm/d). Esta tasa, depende del tamaño del medio filtrante, a mayor tamaño mayor es la tasa de carga hidráulica con la que puede trabajar el filtro.

La carga hidráulica para filtros con recirculación, varía entre 120 y 200 l/m<sup>2</sup>\*día. Para el filtro a diseñar, por poseer un medio filtrante de mayor tamaño, se diseñó con un valor de 250 l/m<sup>2</sup>\*día. El valor de factor de caudal pico, es de 2,50 por ser agua residual de origen residencial.

Entonces el dimensionamiento sería el siguiente:

$$A = \frac{466,70 \text{ l/d} * 2,50}{250,00 \text{ l/m}^2 * d} = 4,67 \text{ m}^2 \equiv 2,15\text{m} \times 2,15\text{m}$$

Los filtros con recirculación emplean lechos filtrantes con profundidades entre 0,50 y 1,20 metros, siendo el primero el valor más recomendado. El filtro propuesto tendrá un medio filtrante con una profundidad de 0,50 metros.

### **2.5.2. Proceso constructivo**

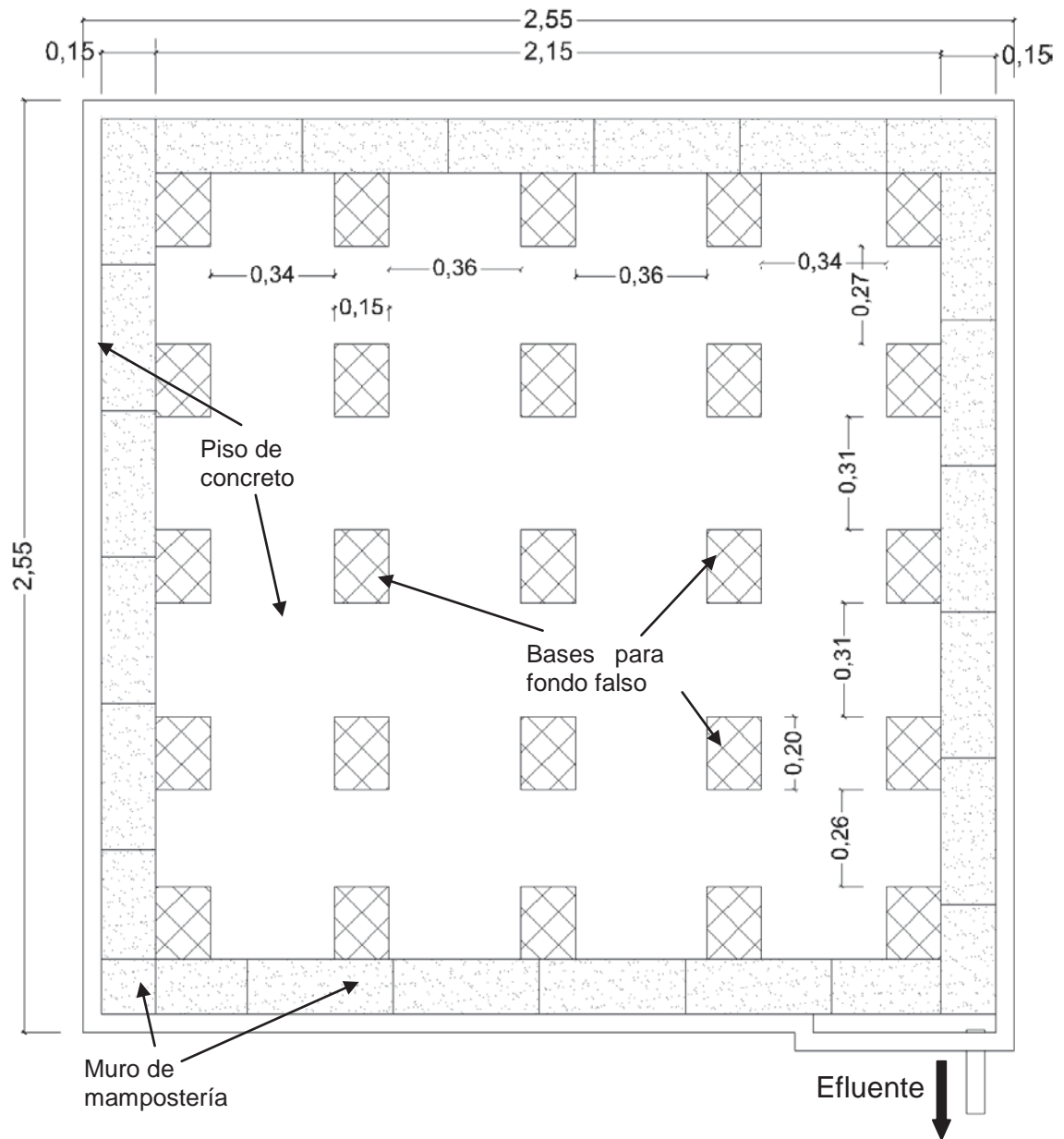
La unidad de filtración se construyó de la siguiente forma: primero se fundió una base de concreto de 0,05 metros de espesor. Sobre la misma se realizó el levantado de los muros de mampostería, con block pómez de 0,14 m X 0,19 m X 0,39 m.

Posteriormente se colocaron las bases que servirían para soportar el fondo falso y el medio filtrante. Estas se hicieron con mitades de block pómez de las mismas dimensiones que el muro, fijados con sabieta al piso. Sobre los soportes se colocaron planchas de concreto que servirían como fondo falso. Estas tienen un tamaño de 0,50 m X 0,50 m, y cada una tiene 16 orificios de 0,01 de diámetro. Sobre el fondo falso se colocó una pequeña capa de pedrín de ¾" y sobre este, los 0,50 metros del medio filtrante con pedrín de ¼".

Por último se ubicó la tubería de distribución, la cual está constituida por 6 tubos de PVC de ½" de diámetro y 2 metros de largo, perforados en la parte superior. Cada agujero tiene un diámetro de 0,005 metros y tienen una separación de 0,30 metros entre sí. A su vez, los tubos tienen una separación

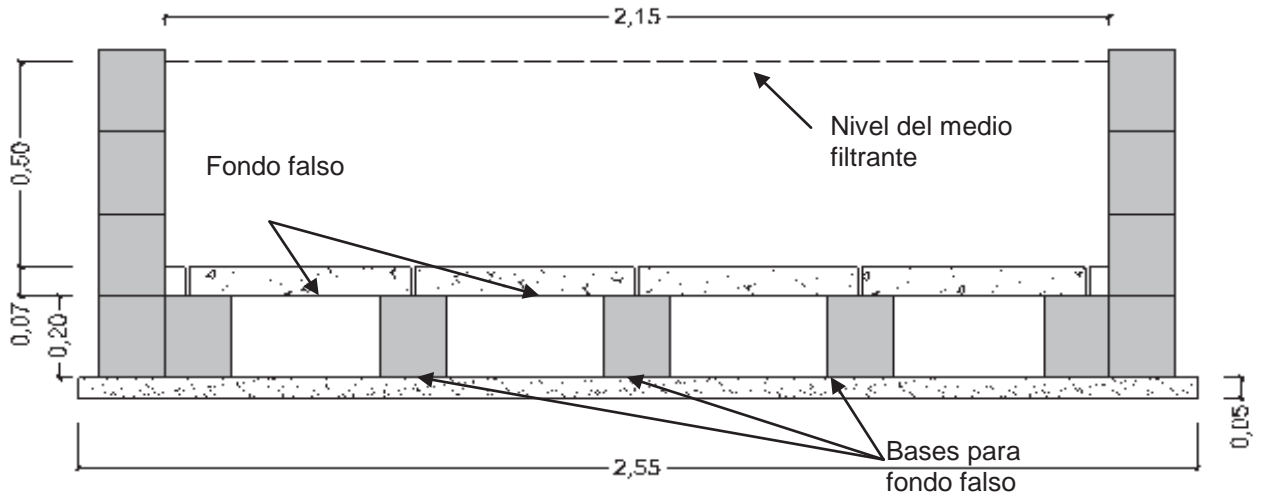
de 0,30 metros. Estos valores de separación entre tuberías y agujeros, son los recomendados para este tipo de filtros.

Figura 10. Dimensiones del filtro en planta



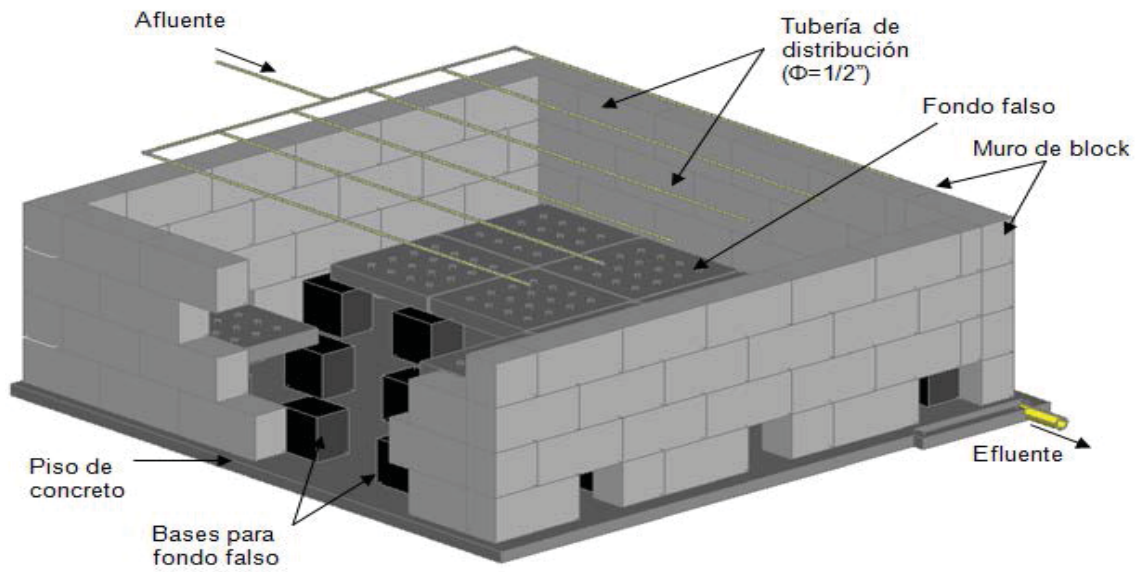
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Elevación del filtro



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Vista isométrica del filtro



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Filtro intermitente construido**



Fuente: elaboración propia.

### **2.5.3. Carga orgánica de diseño**

Esta comprende la cantidad (masa) de materia orgánica soluble y particulada que se aplica al filtro por unidad de área y tiempo. En el sistema internacional se trabaja en kilogramos de  $\text{DBO}_5$  por metro cuadrado por día ( $\text{kg DBO}_5/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ).

Valores mayores de tasa de carga orgánica se pueden utilizar, si se realizan variaciones en la dosificación del afluente.

Al realizar el análisis del agua residual a la salida del biodigestor (afluente del filtro de estudio), se obtuvo una  $DBO_5$  de 123 mg/l y una DQO de 222 mg/l. La relación entre estos dos parámetros, es decir el índice de biodegradabilidad es igual a 0,55. Este valor indica que el agua residual puede ser tratada de forma biológica (ver tabla VIII), por lo tanto la propuesta de tratamiento secundario con un filtro intermitente, es aceptable.

Con el valor de  $DBO_5$  mencionado anteriormente, se obtiene la carga orgánica de diseño. Esta se calcula de la siguiente forma:

$$C.O = \frac{Q_m * DBO_5}{A * 1000^2}$$

Donde:

C. O. = carga orgánica ( $kg_{DBO_5} / m^2 \cdot día$ )

$Q_m$  = caudal medio diario (l/día)

A = área del filtro ( $m^2$ )

Al realizar el cálculo se tiene lo siguiente:

$$C.O = \frac{466,70 \text{ l/d} * 123,00 \text{ mg/l}}{2,15^2 * 1000^2} = 0,012 \text{ kg}_{DBO_5} / m^2 \cdot día$$

#### 2.5.4. Dosificación de caudal

El sistema para dosificación de caudal, está constituido por un recipiente cilíndrico, con un eje variable en su altura. Este eje sirve para que el recipiente se pueda balancear en una base. El principio de este dispositivo es que

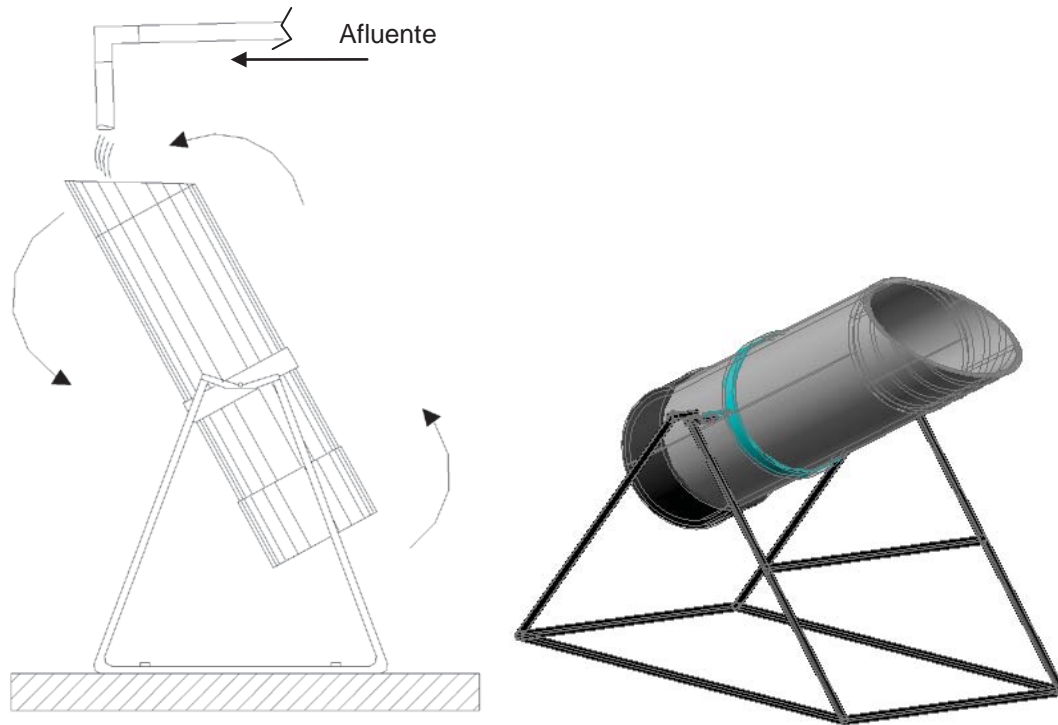
conforme el recipiente se va llenando de líquido, llegará a un nivel donde se sobrepasará el punto de equilibrio y el recipiente se volteará depositando el líquido en un depósito que lo dirigirá hacia la tubería de distribución del filtro. El recipiente tendrá un contrapeso en la parte inferior, que hará que el mismo regrese rápidamente a su posición inicial para su nuevo llenado y próxima dosificación.

Este dispositivo, funciona muy bien, es de bajo costo, no requiere de operación ni demasiado mantenimiento y puede variar el volumen de agua que se requiera en cada descarga.

La desventaja de los dosificadores hidráulicos, es que la frecuencia de dosis, está sujeta a los cambios del caudal entrante. Pero se tiene la ventaja que los cambios de caudal, no serán tan bruscos, ya que el biodigestor sirve también como homogenizador de caudal.



Figura 14. Esquema del dosificador

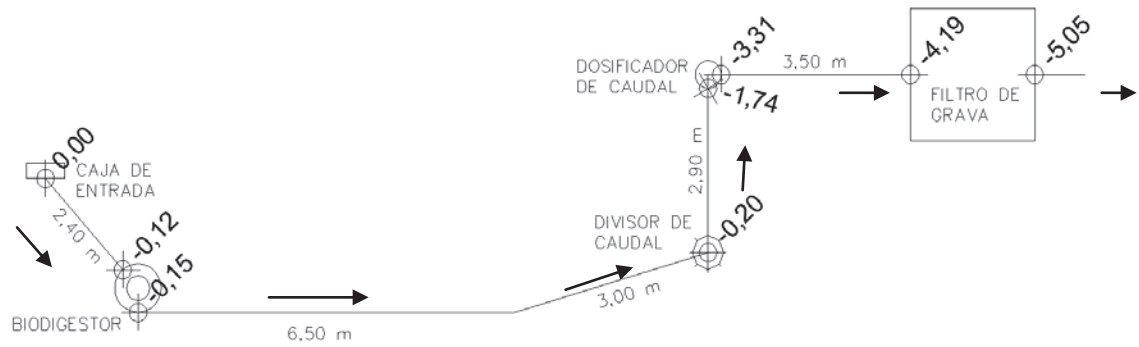


Fuente: elaboración propia.

## 2.6. Esquema final del sistema de tratamiento

El conjunto del sistema de tratamiento en su totalidad (primario y secundario) se resume en la figura 15.

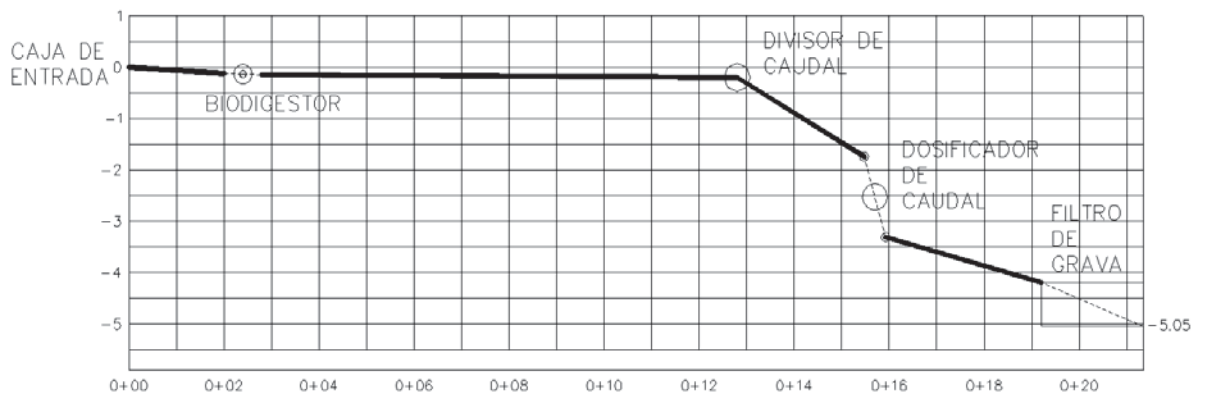
Figura 15. Esquema del sistema, vista en planta



Fuente: elaboración propia.

A lo largo del sistema el agua sufre pérdidas de carga, dadas sobre todo por fricción. En la figura 16, se puede observar el perfil hidráulico que retrata las cotas del nivel del líquido a lo largo del sistema de tratamiento.

Figura 16. Perfil de hidráulico del sistema de tratamiento



Fuente: elaboración propia

Figura 17. Sistema construido



Fuente: elaboración propia.

### **3. Resultados**

Para poder obtener resultados inmediatos, se inoculó el medio filtrante para reducir el tiempo de maduración del mismo. Es decir que se sembraron bacterias, obtenidas de otros medios filtrantes en la PTAR, para que las mismas se adhirieran más rápidamente a la grava y así comenzarán a reproducirse lo más pronto posible.

#### **3.1. Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días**

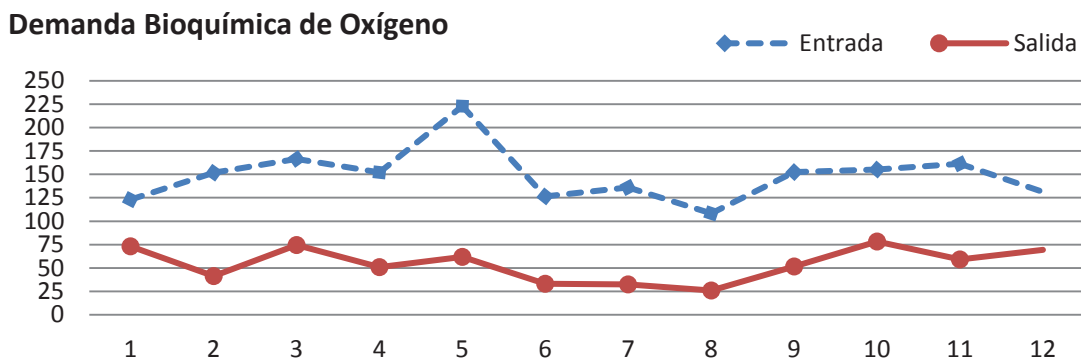
Se realizó el análisis de la DBO a los cinco días de tomada la muestra. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la tabla IX, y se puede observar su variación en la figura 18.

Tabla IX. **Resumen de resultados de DBO<sub>5</sub>**

Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)				Eficiencia %
Muestra No.	Fecha	Entrada	Salida	
1	05/07/2012	123,0	73,3	40,38
2	12/07/2012	151,7	41,5	72,62
3	18/07/2012	166,3	74,6	55,15
4	25/07/2012	152,0	50,8	66,58
5	01/08/2012	223,0	62,0	72,20
6	08/08/2012	126,3	33,2	73,72
7	23/08/2012	136,0	32,4	76,18
8	29/08/2012	108,3	26,0	76,00
9	05/09/2012	152,3	51,8	66,00
10	12/09/2012	155,3	78,4	49,53
11	13/09/2012	161,3	59,2	63,31
12	19/09/2012	131,3	69,5	47,07
Mínimo		108,3	26,0	40,4
Máximo		223,0	78,4	76,2
Promedio		148,9	54,4	63,2

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfica de resultados de DBO<sub>5</sub>**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Demanda química de oxígeno

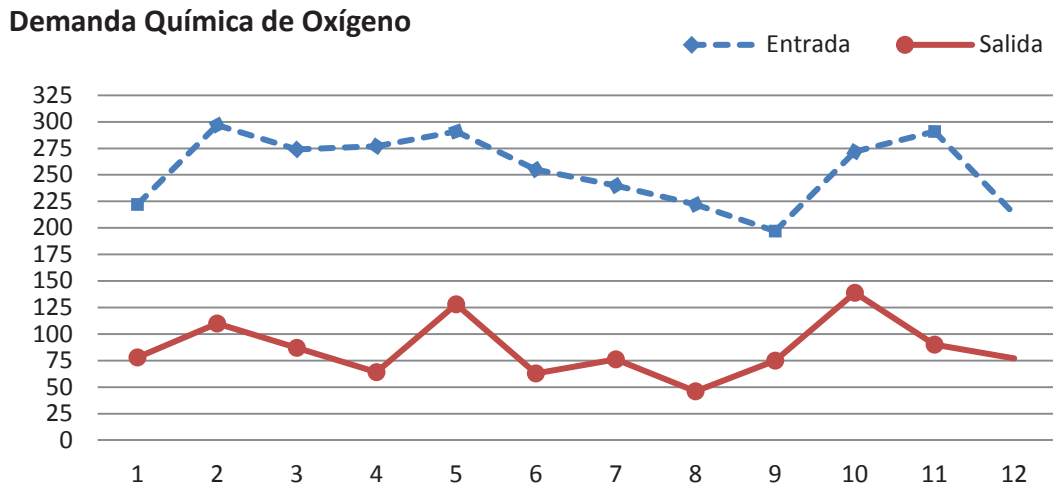
Los resultados de DQO obtenidos se muestran a continuación en la tabla X y en la figura 19.

Tabla X. Resumen de resultados de DQO

Demanda Química de Oxígeno (mg/l)				Eficiencia %
Muestra No.	Fecha	Entrada	Salida	
1	05/07/2012	222,0	78,0	64,86
2	12/07/2012	297,0	110,0	62,96
3	18/07/2012	274,0	87,0	68,25
4	25/07/2012	277,0	64,0	76,90
5	01/08/2012	291,0	128,0	56,01
6	08/08/2012	255,0	63,0	75,29
7	23/08/2012	240,0	76,0	68,33
8	29/08/2012	222,0	46,0	79,28
9	05/09/2012	197,0	75,0	61,93
10	12/09/2012	272,0	139,0	48,90
11	13/09/2012	291,0	90,0	69,07
12	19/09/2012	213,0	77,0	63,85
Mínimo		197,0	46,0	48,9
Máximo		297,0	139,0	79,3
Promedio		254,3	86,1	66,3

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Gráfica de resultados de DQO



Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Sólidos suspendidos totales

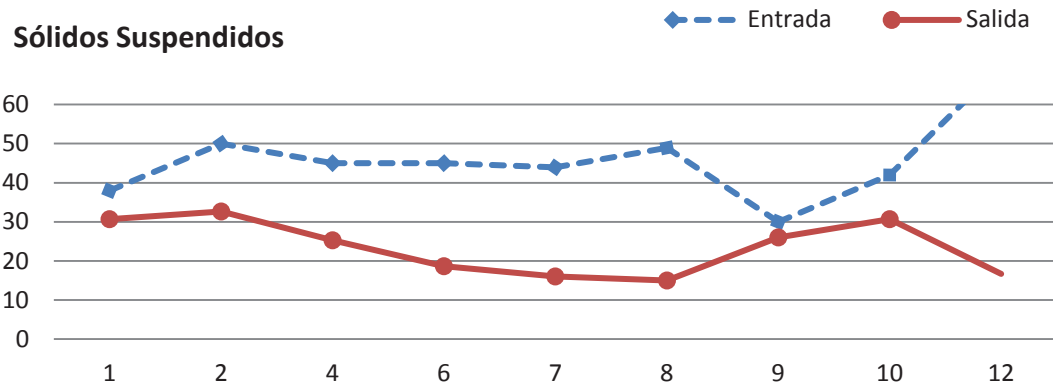
En la tabla XI se pueden observar los resultados obtenidos de SST, los cuales se grafican en la figura 20.

Tabla XI. **Resumen de resultados de SST**

<b>Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)</b>				Eficiencia %
Muestra No.	Fecha	Entrada	Salida	
1	05/07/2012	38,00	30,67	19,30
2	12/07/2012	50,00	32,67	34,67
4	25/07/2012	45,00	25,33	43,70
6	08/08/2012	45,00	18,67	58,52
7	23/08/2012	44,00	16,00	63,64
8	29/08/2012	49,00	15,00	69,39
9	05/09/2012	30,00	26,00	13,33
10	12/09/2012	42,00	30,67	26,98
12	19/09/2012	70,00	16,67	76,19
Mínimo		30,0	15,0	13,3
Máximo		70,0	32,7	76,2
Promedio		45,9	23,5	45,1

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Gráfica de resultados de SST**



Fuente: elaboración propia.



### 3.4. Oxígeno disuelto

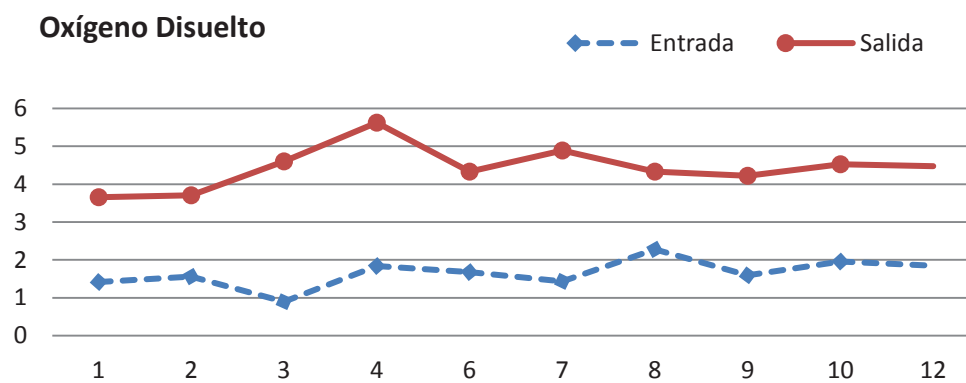
Este parámetro debe ser medido instantáneamente, por lo que se midió *in situ*. A continuación en la tabla XII, se observan los resultados del análisis del oxígeno disuelto.

Tabla XII. **Resumen de resultados de OD**

Oxígeno disuelto				Eficiencia %
Muestra No.	Fecha	Entrada	Salida	
1	05/07/2012	1,42	3,66	61,20
2	12/07/2012	1,56	3,71	57,95
3	18/07/2012	0,90	4,61	80,48
4	25/07/2012	1,84	5,63	67,32
6	08/08/2012	1,68	4,34	61,29
7	23/08/2012	1,44	4,89	70,55
8	29/08/2012	2,28	4,34	47,47
9	05/09/2012	1,60	4,23	62,17
10	12/09/2012	1,96	4,53	56,73
12	19/09/2012	1,85	4,48	58,71

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Gráfica de resultados de OD



Fuente: elaboración propia.

### 3.5. Turbiedad

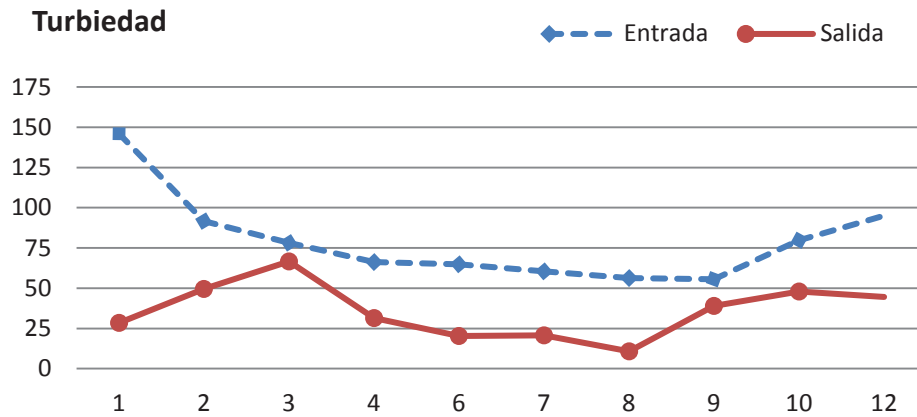
Los resultados de turbiedad que se obtuvieron son los que se muestran en la tabla XIII y figura 22.

Tabla XIII. Resumen de resultados de turbiedad

Muestra No.	Fecha	Turbiedad (UNT)		Eficiencia %
		Entrada	Salida	
1	05/07/2012	146,0	28,4	80,55
2	12/07/2012	91,8	49,6	45,97
3	18/07/2012	78,2	66,6	14,83
4	25/07/2012	66,2	31,4	52,57
6	08/08/2012	64,8	20,3	68,67
7	23/08/2012	60,5	20,8	65,62
8	29/08/2012	56,3	10,8	80,82
9	05/09/2012	55,6	39,0	29,86
10	12/09/2012	79,8	47,9	39,97
12	19/09/2012	95,1	44,6	53,10

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Gráfica de resultados de turbiedad**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6. Color aparente

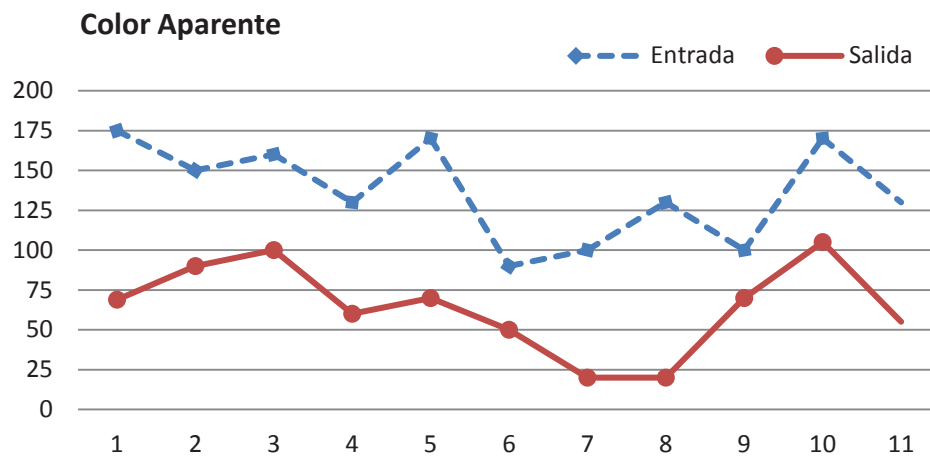
Los resultados obtenidos de este parámetro se resumen a continuación en la tabla XIV y se grafican en la figura 23.

Tabla XIV. **Resumen de resultados de color aparente**

Color Aparente				Eficiencia %
Muestra No.	Fecha	Entrada	Salida	
1	05/07/2012	175,0	69,0	60,57
2	12/07/2012	150,0	90,0	40,00
3	18/07/2012	160,0	100,0	37,50
4	25/07/2012	130,0	60,0	53,85
5	01/08/2012	170,0	70,0	58,82
6	08/08/2012	90,0	50,0	44,44
7	23/08/2012	100,0	20,0	80,00
8	29/08/2012	130,0	20,0	84,62
9	05/09/2012	100,0	70,0	30,00
10	12/09/2012	170,0	105,0	38,24
12	19/09/2012	130,0	55,0	57,69

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Gráfica de resultados de color aparente**



Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Potencial de hidrógeno

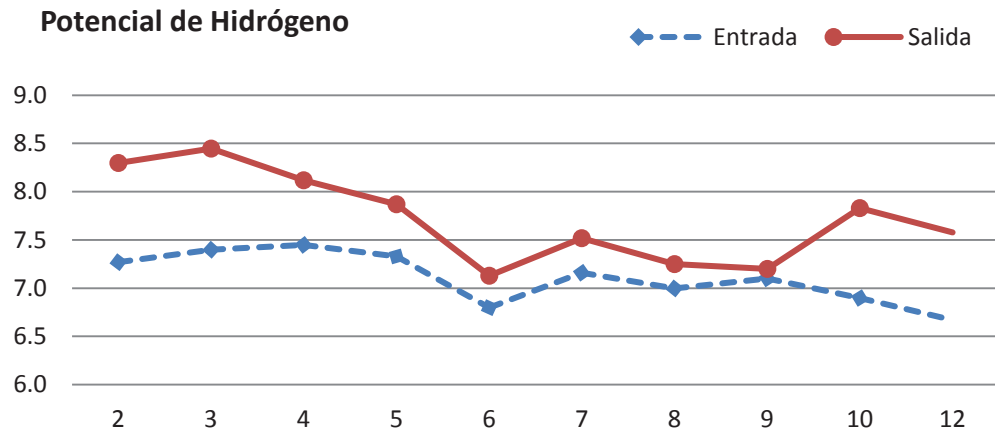
A continuación en la tabla XV se muestran los resultados obtenidos de este parámetro.

Tabla XV. **Resumen de resultados de pH**

<b>Potencial de Hidrógeno</b>			
Muestra No.	Fecha	Entrada	Salida
2	12/07/2012	7,3	8,3
3	18/07/2012	7,4	8,5
4	25/07/2012	7,5	8,1
5	01/08/2012	7,3	7,9
6	08/08/2012	6,8	7,1
7	23/08/2012	7,2	7,5
8	29/08/2012	7,0	7,3
9	05/09/2012	7,1	7,2
10	12/09/2012	6,9	7,8
12	19/09/2012	6,7	7,6

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Gráfica de resultados de pH



Fuente: elaboración propia.



## 4. Discusión de resultados

En resumen se tiene que, la eficiencia promedio de remoción de  $\text{DBO}_5$  fue de 63,2 %, siendo la media de materia orgánica del efluente igual a 54,4 mg/l y 148,9 mg/l para el afluente. La eficiencia máxima de remoción de este parámetro fue de 76 %. La máxima eficiencia de remoción de DQO se obtuvo en la octava muestra, siendo 79 %. El promedio total de eficiencia fue de 66,3 % de remoción de DQO. La DQO media del efluente de 86,1 mg/l y del afluente 254,3 mg/l. Estos resultados indican una eficiencia relativamente baja.

En lo que se refiere al análisis de SST, se omitieron los resultados las muestras 3 y 5, por mostrar valores incoherentes que pudieron ser por algún error en la medición de este parámetro. Sin embargo, analizando las demás muestras, se observa que efectivamente hay una reducción de los SST pero en promedio fue baja, 45,0 %, y un valor medio en el efluente de 23,5 mg/l. Esto nos indica que el filtro no es realmente eficiente para reducción de SST, y que probablemente se deba añadir un sedimentador a su salida para clarificar el agua, y así obtener mejores resultados en la medida de este parámetro.

En las gráficas de  $\text{DBO}_5$  y DQO, se puede ver que entre las muestras 7 y 8, se obtiene la mejor calidad del efluente del filtro, a partir de ese punto la eficiencia comienza a decaer y luego vuelve a mejorar en la muestra número 11. Esto indica que a medida que los microorganismos se desarrollaban en el interior del medio filtrante, la eficiencia mejoraba hasta llegar a un punto de saturación donde la película biológica ha crecido tanto que comienza a desprenderse del medio. Esto ocasiona una pérdida en la eficiencia del tratamiento y lo cual se refleja también en la turbiedad del efluente. Este



arrastre de microorganismos y sus desechos, genera un aumento de materia orgánica o que incide en la disminución de remoción de DBO. Físicamente este fenómeno se observó como partículas grisáceas en el efluente del filtro. La mejora se debe al nuevo crecimiento de la película biológica en el medio.

En todos los casos el oxígeno disuelto del agua, aumentó a la salida del filtro. Esto comprueba que se consiguió un tratamiento aerobio. En promedio el OD en la entrada fue de 1,65 mg/l y el de la salida fue de 4,43 mg/l, lo cual es aceptable para mantener vida acuática.

Con excepción de la primera muestra, la eficiencia en remoción de turbiedad fue baja. Teniendo en promedio 53,2 % de eficiencia en este parámetro. Estos datos rectifican lo observado en los resultados de SST: baja eficiencia y necesidad de un clarificador a la salida del filtro, el cual también podría mejorar la remoción de color, la cual tiene una eficiencia promedio de 53,2 %.

El pH del agua subió significativamente en los primeros 4 análisis mostrados. Esto se debe probablemente a la falta de una limpieza a la grava utilizada. La limpieza era necesaria ya que la grava posee algo de cal, lo que ocasionó un aumento significativo de este parámetro en un inicio, y se redujo conforme la grava se lavó a causa del caudal entrante.

## **5. Manual de operación y mantenimiento**

El sistema básicamente es una unidad de filtración que utiliza como medio filtrante piedrín con diámetro de un cuarto de pulgada, y un dispositivo dosificador de caudal. El sistema recibe el efluente del biodigestor anaerobio, el cual funciona como un tratamiento primario. No se cuenta con una unidad adecuada de pretratamiento del afluente.

Esta unidad de tratamiento no posee ningún artefacto operado de forma mecánica y ni eléctrica. Funciona totalmente por gravedad, es decir que no necesita fuerzas externas para su funcionamiento.

### **5.1. Componentes del sistema**

En los apartados siguientes se describen los elementos que componen el sistema de tratamiento.

#### **5.1.1. Unidad derivadora de caudal**

Este es un accesorio que divide el efluente del tratamiento primario en ocho partes iguales (ver figura 9). El motivo del mismo es reducir el caudal, ya que el filtro construido está dimensionado y diseñado para tratar la octava parte del caudal de salida del biodigestor anaerobio.

### **5.1.2. Dispositivo para dosificación de caudal**

El diseño de la unidad de filtración se basa en el hecho que el agua a tratar debe ingresar al mismo, de forma intermitente.

El dosificador de caudal funciona hidráulicamente sin ningún dispositivo eléctrico y/o mecánico. El dosificador puede ser graduado según el caudal que se requiera descargar hacia la unidad de filtración. La descarga del caudal se hace a medida se va llenando de agua el depósito. Al llegar al volumen deseado (según graduación), el depósito se voltea descargando así su contenido hacia la tubería de distribución (ver figura 14).

### **5.1.3. Sistema de distribución de caudal**

El caudal ingresa al medio filtrante a través de un sistema de distribución que consta de una red de tubería suspendida de PVC debidamente perforada. La tubería tiene un diámetro nominal de ½” están separadas entre sí por 0,30 metros de distancia.

Cada agujero de la tubería de distribución tiene un diámetro de 3/16”, y están separados por 0,30 metros de distancia. Los agujeros se encuentran en la parte de arriba del tubo, evitando así una mala distribución del caudal en el medio filtrante. Los tubos deben estar completamente horizontales.

#### **5.1.4. Medio filtrante**

Está constituido por piedrín de un cuarto de pulgada, distribuido en un área de 2,15 m X 2,15 m y un espesor de 0,50 metros. El medio filtrante no solo servirá para retener material suspendido que pueda estar en el agua a tratar, si no que servirá también para dar un medio de soporte a los microorganismos que en cierta forma limpiaran el agua en la filtración.

#### **5.1.5. Fondo falso**

Este está constituido por 16 placas individuales de concreto armado, perforada con agujeros de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro. El tamaño de cada placa es de 0,50 m X 0,50 m, teniendo un espesor de 0,07 metros. Las placas están apoyadas, sobre pequeños soportes hechos de block pómez de 0,14 X 0,19 X 0,39 partido a la mitad. El conjunto de placas está cubierto por una capa de 0,05 metros de piedrín de  $\frac{3}{4}$ ".

Todo en conjunto forma el llamado fondo falso, y sirve para drenar el agua filtrada cumpliendo con los siguientes objetivos: que no se pierda material filtrante, drenaje libre del agua filtrada sin permitir estancamientos y la entrada de oxígeno hacia el medio filtrante (ver figuras 10, 11, 12 y 13).

### **5.2. Labores de operación y mantenimiento**

Para garantizar un tratamiento eficiente del agua residual que pasa a través de la unidad, se debe velar por una correcta labor de operación y mantenimiento. A continuación se detallan los trabajos necesarios en estas actividades.

### **5.2.1. Operación**

La unidad de tratamiento no requiere gran control de operación. Su funcionamiento es completamente por gravedad, por lo que no requiere energía externa para funcionar.

Se debe realizar la toma de muestras del agua cuando se requieran análisis de la misma. La toma de muestra del afluente, se puede realizar en cualquiera de las salidas del derivador de caudal o en la entrada del dosificador de caudal. La toma de muestras del efluente se debe hacer en la salida del filtro (ver figura 7).

### **5.2.2. Mantenimiento**

Para que la unidad de filtración funcione correcta y eficientemente, se deben realizar las actividades de mantenimiento, mostradas a continuación en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Labores de mantenimiento**

<b>Unidad</b>	<b>Actividad de Mantenimiento</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>Entrada Biodigestor</b>	Recolección de grasas y sólidos flotantes en caja de entrada.	Diariamente
	Verificar que esté libre de obstrucciones.	Diariamente
<b>Derivador de Caudal</b>	Verificar que ningún tubo esté bloqueado.	Diariamente
	Chequear que el dispositivo esté a 90 grados (a plomo).	Semanalmente
	Limpieza con cepillo	Mensualmente
	Extracción de sólidos sedimentables quitando el dispositivo.	Cada 6 meses
<b>Dosificador de Caudal</b>	Verificar que rote libremente.	Diariamente
	Revisar la correcta entrada de agua residual	Diariamente
	Confirmar la correcta descarga de caudal.	Diariamente
	Limpieza con cepillo	Mensualmente
<b>Tubería de Distribución</b>	Verificar que los orificios no estén obstruidos	Cada 3 días
	Limpieza superficial	Cuando se requiera
	Nivelación de tubería (completamente horizontal)	Cuando se requiera
<b>Medio Filtrante</b>	Recolección de hojas y palos sobre el medio filtrante	Cada 2 días

Fuente: elaboración propia.

Es recomendable la instalación de una unidad de pretratamiento eficiente, para evitar el ingreso de grasas y aceites a la unidad.

### 5.2.2.1. Ajustes de rutina

En la tabla XVII se observan los ajustes de rutina que se deben realizar en caso de detectar las condiciones ahí descritas.

Tabla XVII. Ajustes de rutina

Color/olor del afluente	Color/olor del efluente	Condición	Posible Problema	Ajuste
Mal olor y color café claro	Olor imperceptible y color aceptable	Buen funcionamiento	ninguno	ninguno
Mal olor y color café oscuro	Mal olor y/o mucho color	Entrada de alta carga orgánica proveniente de tratamiento primario o entrada de algún fuerte agente químico	Mal funcionamiento del tratamiento primario	Revisar tratamiento primario según su Manual de Operación y Mantenimiento
-	-	Nulo o muy pequeño caudal de entrada	Obstrucción en el tratamiento primario.	Revisar todos los elementos hasta hallar obstrucción.
-	-	Efluente nulo y/o rebalse en dosificador de caudal.	Atasco del dosificador de caudal y/o obstrucción en alguna tubería del sistema.	Revisar dosificador de caudal y liberar objeto de atasco. Eliminar obstrucción

Fuente: elaboración propia.

### **5.3. Medidas de seguridad y salud**

Con la finalidad de que el operador del sistema de tratamiento, trabaje en un ambiente seguro y sin daños a la salud, se describen a continuación medidas de seguridad y salud mínimas que se deben tomar en cuenta obligatoriamente para los trabajos de operación y mantenimiento.

#### **5.3.1. Materiales**

El operador de la planta debe contar como mínimo con los siguientes materiales:

- Mascarillas desechables
- Guantes de hule
- Jabón líquido y en gel para lavarse las manos
- Desinfectante
- Overol
- Botas de hule
- Anteojos protectores

#### **5.3.2. Equipo y herramientas**

El equipo y herramientas con las que debe contar el operador, es el siguiente:

- Botiquín de primeros auxilios
- Canasta con cedazo para recoger sobrenadantes en entrada a biodigestor.
- Cubeta para depositar sobrenadantes



- Varilla delgada para limpieza de agujeros en tubería de distribución

### **5.3.3. Otras medidas de seguridad**

Como medidas de seguridad es recomendable que el operador siga las siguientes instrucciones:

- No ingerir bebidas ni comidas durante las horas de servicio
- Lavarse las manos al terminar las labores
- Evitar contacto directo con las aguas residuales y tratadas
- No tocarse la boca al momento de hacer las tareas
- Cambiarse de ropa al terminar las tareas
- Vacunarse contra el tétano
- Cada 3 meses efectuarse un examen de heces y orina

## Conclusiones

1. Al comparar los resultados obtenidos con los valores mostrados en las tablas IV, V y VI, se observa que las eficiencias del filtro estudiado no se asemejan a las eficiencias de filtros con recirculación, siendo éstas mucho más altas. Por lo tanto un filtro con recirculación es, en este sentido, mucho mejor a un filtro intermitente de grava sin recirculación.
2. En el análisis de  $\text{DBO}_5$ , el filtro construido muestra una eficiencia media de 63,2 %, siendo 76,2 % el valor máximo. Los filtros con recirculación presentan eficiencias de hasta 98% de remoción de  $\text{DBO}_5$ .
3. En lo que respecta a SST, el filtro intermitente presentó una eficiencia media de 45,0 % y una eficiencia máxima de 76,19 %. Un filtro con recirculación llega a tener eficiencias arriba del 80 % en remoción de SST, lo cual los hace en ese sentido, mejores al filtro estudiado.
4. En el último análisis el efluente presentó una turbiedad de 44,6 UNT, siendo la eficiencia de remoción igual a 53 %. Esta muestra se dejó en reposo durante una hora, imitando lo que sería colocar un sedimentador a la salida del filtro, y se midió nuevamente la turbiedad obteniendo 15,3 UNT, lo que equivale a una eficiencia de 84 %.
5. Para ejemplificar el efecto de un sedimentador en la salida del filtro, en la muestra número 11, también se midió la  $\text{DBO}_5$  de la muestra filtrada. El resultado fue un efluente con 35,4 mg/l de  $\text{DBO}_5$ , siendo la eficiencia de remoción igual a 78 % (63 % sin filtrar la muestra). Esto demuestra que

la implementación de un sedimentador, no solo clarificaría el agua mejorando los resultados de SST y turbiedad, sino que también podría mejorar la eficiencia de remoción de materia orgánica, la cual es en parte añadida por los desechos de los microorganismos vivientes en el medio filtrante.

6. El comportamiento del filtro muestra que si existe un tratamiento aerobio dentro del mismo, pero este llegó a un límite máximo a los casi 2 meses de funcionamiento. Después presentó una baja y un pequeño aumento de eficiencia en los dos últimos análisis. Esto puede significar que en la muestra No. 9, comenzó el arrastre de la película biológica, debido a la saturación de la misma dentro del filtro, siendo ser la causa del alza de materia orgánica del efluente. Hecho que se confirma al observar los resultados de SST y turbiedad, y la gran presencia de partículas grisáceas en la salida del filtro.
7. Se observa también que el descenso en la eficiencia de remoción de materia orgánica, coincide con el alza de la misma en el afluente del filtro. Esto indica que probablemente en ese momento el tratamiento primario redujo su eficiencia y requiere de alguna labor de mantenimiento. Un bajo rendimiento del biodigestor sumado a una entrada puntual de alta carga orgánica a la PTAR, afecta considerablemente el rendimiento del filtro estudiado.
8. Aunque los resultados no igualen a un filtro con recirculación, el filtro evaluado es una alternativa como tratamiento secundario para viviendas unifamiliares o un conjunto de pocas casas. Siendo una unidad que no genera malos olores, no requiere del uso de energía externa, la

construcción no es de difícil y su mantenimiento puede considerarse sumamente fácil y eventual.

9. Para un país como Guatemala en donde el costo de energía eléctrica es bastante alto y no se invierte en labores de operación y mantenimiento, el filtro propuesto es en este sentido una mejor alternativa que un filtro que requiere de sistemas de bombeo para recircular el caudal. Cabe mencionar que un filtro con recirculación que no sea operado correctamente ni se le de el mantenimiento adecuado, probablemente nunca llegará a tener las eficiencias ni los resultados mostrados en las tablas IV, V y VI.



## Recomendaciones

1. Para realizar un buen dimensionamiento de un filtro o cualquier otro tipo de unidad de tratamiento, es sumamente necesario realizar varios aforos del afluente para construir una curva de caudal representativa que nos permita dimensionar correctamente.
2. El sistema de distribución se hizo con tubería de PVC. Esto conllevó a dos problemas principales. Primero que los orificios perforados, de aproximadamente 0,05 m, eventualmente quedaban obstruidos por la materia residual contenida en el agua. Segundo, la tubería debido a estar expuesta a la intemperie más el peso del agua y un mal sistema de soporte, tiende a pandearse y deformarse levemente; esto provocó la salida de mayor caudal en algunos orificios, conllevando a una distribución no uniforme sobre el lecho filtrante. Un sistema hecho con canales y vertederos, podría funcionar mejor.
3. La cantidad de SST se podría reducir de gran manera con la construcción de un sedimentador secundario de pequeñas dimensiones. Se tendría que hacer la evaluación del tiempo de retención necesario para clarificar el agua con un sedimentador convencional o laminar, para mejorar la eficiencia en disminución de SST y turbiedad.
4. En este estudio se recolectaron muestras puntuales, lo cual no es lo ideal. Es preferible la toma de muestras de tipo compuestas para obtener resultados más confiables y reales.

5. Por no ser objetivo de la investigación, no se midió los parámetros relacionados a nutrientes (nitrógeno y fósforo en sus diferentes formas). Es claro que por el tipo de tratamiento, la remoción de estos parámetros es mínima. Sería importante hacer la evaluación del filtro y poder proponer un tratamiento terciario si se desea estudiar una remoción de nutrientes.
  
6. Realizar cambios al filtro para mejorar las eficiencias obtenidas del filtro construido. Como alternativa se podría evaluar aumentando el número de dosis de caudal diarias, reduciendo el volumen del dosificador de caudal o aumentando el caudal de entrada. Otra forma sería cambiando el medio filtrante, probablemente por grava de diámetro menor, y, como ya se mencionó, la implementación de un sedimentador a la salida del filtro.

## Bibliografía

1. ANDERSON, Damann L.; SIEGRIST, Robert L.; OTIS, Richard J. *Technology Assessment of Intermittent Sand Filters*. Washington, DC. United States Environmental Protection Agency. 1992. 30 p.
2. ARBOLEDA, Jorge. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. 3a ed. Colombia: McGraw Hill, 2000. 793 p.
3. CRITES, Ron; TCHOBANOGLOUS, George. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw Hill, 2000. 776 p.
4. GALINDO, Carlos. *Estudio, caracterización y tratamiento de lodos provenientes de fosas sépticas*. Trabajo de graduación Maestría en Ciencias de Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. Guatemala, junio 2010. 69 p.
5. METCALF & EDDY. *Ingeniería de aguas residuales*. Tratamiento, Vertido y Reutilización. 3a ed. México: McGraw Hill, 1998. 1 485 p.
6. Ministerio de Ambiente y Recursos Hidráulicos. Acuerdo Gubernativo 236-2006. Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la disposición de Lodos. Guatemala
7. RAMÍREZ, Mario. *Evaluación de parámetros físicos y químicos de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales del Barrio El Cangrejal*,



*municipio de Puerto Barrios, departamento de Izabal.* Trabajo de graduación Maestría en Ciencias de Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. Guatemala, julio 2003. 105 p.

8. ROTOPLAS, Argentina. 20 de abril de 2012.  
<<http://www.rotoplasargentina.com.ar/tanque-linea-ingenieria-biodigestor.php>>.
9. SALGUERO, Louis. OAKLEY, Stewart. *Tratamiento de aguas residuales domésticas en Centroamérica.* Un manual de experiencias, diseño, operación y sostenibilidad. Agencia de Protección Ambiental de Los Estados Unidos de América.

## **ANEXOS**



DOMO Z. 13

MAGA

INSIVUMEH

ENTRADA AEROPUERTO LA AURORA

INGRESO RESIDENCIAL AURORA II

LAGUNA FACULTATIVA

LAGUNA AEROBIA