



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos (ERIS)
Maestría en Ingeniería Sanitaria

**Evaluación de la eficiencia de biodigestor comercial
en el tratamiento de aguas residuales domiciliarias**

Ing. Paúl Alberto Calderón de León

Asesorado por Dr. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos

Guatemala, mayo de 2014

Universidad de San Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería

**Evaluación de la eficiencia de biodigestor comercial
en el tratamiento de aguas residuales domiciliarias**

Estudio especial

Presentado a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos (ERIS)

Por el ingeniero

Paúl Alberto Calderón de León

Asesorado por Dr. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos

Como requisito previo para optar al grado académico de

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

Guatemala, mayo de 2014

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 RuballosSamayoa
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 Artemio Pocasangre Collazos
Examinador	MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
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:

Evaluación de la eficiencia de biodigestor comercial en el tratamiento de aguas residuales domiciliarias

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



Paul Alberto Calderón de León
paulcalderon99@yahoo.com
Carné No. 100010526



Guatemala, 02 de mayo de 2014.

FACULTAD DE INGENIERÍA

Señores

Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Universidad San Carlos de Guatemala

Respetuosamente les informo que en mi calidad de Asesor y Coordinador de la Maestría de Ingeniería Sanitaria he revisado el trabajo de estudio especial Titulado: "Evaluación de la eficiencia de biodigestor comercial en el tratamiento de aguas residuales domiciliarias" presentado por el estudiante: Ingeniero Paúl Alberto Calderón de León.

Manifestando que el estudiante antes mencionado, ha cumplido de manera satisfactoria con los requisitos de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- y la Universidad de San Carlos de Guatemala.

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

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Dr. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos
Asesor del Estudio
Coordinador de la Maestría de Ingeniería Sanitaria

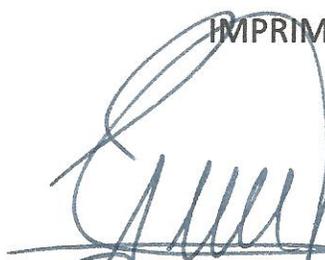


FACULTAD DE INGENIERÍA

El director de Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los siguientes profesores: Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, MSc. Ing. Pedro Saravia Celis, MSc. Ing. Zenón Much Santos, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria, Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, la revisión lingüística realizada por la Lic. Rosa Amelia Gonzáles Domínguez, colegiada No. 5284 al trabajo del estudiante Ingeniero Civil Paúl Alberto Calderón de León, titulado **“Evaluación de la eficiencia de biodigestor comercial en el tratamiento de aguas residuales domiciliarias”**, en representación de la comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala, cinco de mayo del año dos mil catorce.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

IMPRIMASE



MSc. Ing. Pedro Saravia Celis
Director

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Acto que dedico a:

Dios

Por permitirme la finalización de este caminar académico contando contigo Padre Eterno, compañero fiel y regalarme a esa familia maravillosa, a esos padres fantásticos, a mis hermanos y sus familias encantadoras. Y aunque esa dicha de tenerlos en mi vida pudiera ser desbordante, Dios en su fidelidad y amor, me regalo como esposa a una gran mujer e hijos maravillosos, mi alegría, mi motivación, mi todo.

Mi hijo

Javier, quiero dedicarte en especial este logro. Una persona tiene tres regalos en la vida: tiempo, mente y corazón, saca el mejor beneficio de ellos. Dios me permita verte superando cualquier meta que te propongas. ¡Te quiero mucho!

Agradecimientos a:

Dios	Padre Eterno y compañía fiel por haberme permitido el tiempo y las condiciones para finalizar esta aventura que inició como una ilusión, convirtiéndose en posterior objetivo y hoy se convierte en realidad y responsabilidad para el ejercicio de la profesión.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Baluarto en mi carrera profesional teniendo en mente la misión de “Ir y enseñad a todos”.
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos	Agradezco las enseñanzas y aprendizajes en sus aulas y fuera de ellas, conocimiento crítico y científico que abrió mi mente a la ciencia, en especial al director MCs Pedro Saravia Celis y coordinador Dr. Ing. Adán Poca Sangre, por su colaboración en este segundo impulso en mi carrera.
Ingeniera Celia Grajeda	Un especial reconocimiento por su apoyo e investigación, la cual permitió que el presente estudio pueda tener mayor significancia en el tema abordado.
Amigos de la ERIS	¡Gracias por siempre!

Índice general

Índice de ilustraciones	V
Glosario	VII
Resumen	XI
Objetivos	XIII
Hipótesis	XV
Delimitación del estudio	XVII
Introducción	XIX
Planteamiento del problema	XXI
1. Marco teórico.....	1
1.1. Aguas residuales domiciliarias	1
1.2. Contaminación de las aguas domiciliarias.....	1
1.3. Clasificación del tratamiento de aguas residuales.....	4
1.3.1. Tratamiento preliminar.....	4
1.3.2. Tratamiento primario.....	5
1.3.3. Manejo de lodos	5
1.4. Manejo descentralizado de aguas residuales.....	7
1.5. Marco regulatorio del vertido de aguas residuales vigente en la República de Guatemala	10
1.6. Biodigestor comercial	11
1.6.1. Características físicas del biodigestor comercial	12
1.6.2. Afluente y periodo de retención, según diseño	13
1.6.3. Procesos de tratamiento en biodigestor	14
1.6.3.1. Soporte de microorganismos	16
1.6.4. Instalación operación y mantenimiento sugerido	16

2.	Antecedentes	19
2.1.	Planta piloto de tratamiento de aguas residuales.....	19
2.1.1.	Ubicación y población atendida.....	20
2.1.2.	Características climatológicas y topográficas.....	21
2.1.3.	Comportamiento del caudal del afluente	21
2.1.4.	Caracterización del afluente	23
2.2.	Biodigestor comercial instalado en planta de tratamiento de aguas residuales Ing. Arturo Pazos Soza	25
2.3.	Periodo de evaluación y eficiencia inicial	26
3.	Metodología	29
3.1.	VARIABLES DE ESTUDIO.....	30
3.2.	Determinación del espacio muestral	31
3.3.	Día, horario y frecuencia de toma de muestras.....	33
3.4.	Evaluación de los componentes físicos del biodigestor	33
3.5.	Medición de parámetros.....	34
3.6.	Modificación de las condiciones físicas.....	34
3.7.	Extracción y determinación de lodos.....	36
4.	Resultados	37
4.1.	Resultados para la determinación de la eficiencia luego de cinco años de funcionamiento del biodigestor comercial.	41
4.1.1.	Variación del caudal	41
4.1.2.	Sólidos sedimentables	42
4.1.3.	Sólidos totales en suspensión	43
4.1.4.	Remoción de DBO ₅ y DQO	44
4.2.	Comparación de eficiencia inicial y eficiencia a cinco años de funcionamiento	45

4.3.	Resultados de la determinación del funcionamiento del biodigestor comercial a diferentes caudales.....	46
4.3.1.	Regulación de caudal	46
4.3.2.	Eficiencia de la unidad de tratamiento a diversos periodos de retención	47
4.4.	Determinación de lodos generados	49
5.	Discusión de resultados	51
5.1.	Determinación de la eficiencia luego de cinco años de funcionamiento del biodigestor comercial.....	51
5.1.1.	Variación de caudal	51
5.1.2.	Sólidos sedimentables.....	51
5.1.3.	Sólidos totales en suspensión	52
5.1.4.	Remoción de DBO_5	52
5.1.5.	Remoción de DQO	52
5.1.6.	Comparación de eficiencia teórica y practica.....	53
5.2.	Eficiencia inicial y eficiencia a cinco años de funcionamiento .	53
5.3.	Eficiencia de la unidad de tratamiento a diversos periodos de retención.....	53
5.4.	Determinación de lodos generados	54
	Conclusiones	55
	Recomendaciones	57
	Bibliografía	59

Índice de ilustraciones

Figuras

1.	Corte transversal del biodigestor comercial.....	11
2.	Localización de planta de tratamiento de aguas residuales	20
3.	Caudal promedio diario de PTAR Aurora II	22
4.	Caudal promedio horario de PTAR Aurora II.....	23
5.	Determinación de número de muestras	32
6.	Localización de toma de muestras	32
7.	Esquema de vertedero	35
8.	Extracción de lodos	36
9.	Variación de caudal (condiciones originales)	41
10.	Remoción de sólidos sedimentables	42
11.	Remoción de sólidos totales en suspensión.....	43
12.	Remoción de DBO5	44
13.	Remoción de DQO	45
14.	Evolución de la eficiencia de la unidad de tratamiento	46
15.	Desviación estándar de caudales.....	47
16.	Eficiencia de la unidad de tratamiento a diversos periodos de retención	48
17.	Extracción de lodos	49

Tablas

I.	Composición típica de tres clases de aguas residuales domésticas.....	3
II.	Características de los lodos	7
III.	Accesos a servicios de saneamiento en la República de Guatemala	8
IV.	Campo poblacional de aplicación de las diferentes alternativas de depuración	9
V.	Límites máximos permisibles a cuerpos receptores	10
VI.	Características físicas del biodigestor comercial	12
VII.	Caudal y periodo de retención	13
VIII.	Eficiencia teórica de unidades de tratamiento.....	14
IX.	Parámetros característicos del afluente	24
X.	Caracterización del afluente.....	27
XI.	Caracterización del efluente.....	27
XII.	Eficiencia inicial del biodigestor	28
XIII.	Resultados de caudal, temperatura y sólidos sedimentables	37
XIV.	Resultados de sólidos suspendidos totales y pH	38
XV.	Resultados de DQO y DBO ₅	39
XVI.	Resultados de oxígeno disuelto y fósforo total.....	40
XVII.	Caudal, periodo de retención y muestreos.....	48

Glosario

Agua	Sustancia formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, esencial para la reproducción de los seres vivos.
Aguas residuales	Aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas.
Caudal	Volumen de agua por unidad de tiempo
Coliformes fecales	Parámetro que indica la presencia de contaminación fecal en el agua y de bacterias patógenas, provenientes del tracto digestivo de los seres humanos y animales de sangre caliente.
Contaminación	Presencia o introducción al ambiente de elementos nocivos a la vida, o que degraden la calidad de la atmosfera, agua, suelo o bienes y recursos naturales en general, conforme a lo establecido a la ley que lo regula.
Cuerpo receptor	Embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.

Demanda bioquímica de oxígeno	Medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable, durante un período de cinco días y una temperatura de veinte grados Celcius.
Demanda química de oxígeno	Medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química.
Elemento filtrante	Material de elevada área superficial por unida de de volumen, económico, duradero y de difícil obstrucción.
ERIS	Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hídricos.
Filtro percolador	Unidad de tratamiento de aguas residuales empleado como tratamiento primario o secundario, según el diseño propuesto.
Parámetro	Variable que identifica una característica de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos, asignándole un valor numérico.

Percolador	Unidad de tratamiento para hacer que un líquido se mueva a través de un medio poroso.
PET	Polietileno de tereftalato, plástico de alta calidad empleado en la fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes.
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales.
Remoción	Contaminante reducido del agua residual luego de su tratamiento, mejorando la calidad del agua.
Residuales	Combinación de los mismos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.
Reuso	Aprovechamiento de un efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales.
Sedimentador	Unidad de tratamiento de aguas residuales utilizada para sedimentar las partículas contenidas en un medio líquido.
Tratamiento de aguas	Cualquier proceso físico, químico, biológico o combinación de estos, cuyo propósito es la eliminación de contaminantes presentes en las aguas residuales.

Resumen

La baja cobertura en la red de drenajes trae consigo la necesidad de desarrollar sistemas descentralizados de aguas residuales domésticas y tratamientos *in situ*. El biodigestor comercial es presentado por su fabricante como una alternativa sostenible para el saneamiento periurbano y rural, como un tratamiento primario *in situ*, antes de la disposición final de las aguas residuales.

El biodigestor comercial presenta cualidades físicas que permiten una instalación rápida, sin necesidad de mano de obra especializada, sin embargo, debe determinarse sus cualidades en el tratamiento de aguas residuales.

Se realizó la presente investigación para determinar la eficiencia de remoción de carga contaminante en el tratamiento de aguas residuales domiciliarias; además de su eficiencia inicial y a mediano plazo, evaluándose después de cinco años de funcionamiento, así también se examinó el estado físico de la unidad, cuantificación de lodos, evaluación de la eficiencia ante distintos caudales e inconvenientes del sistema.

La investigación se realizó en la planta de tratamiento experimental localizada en la colonia militar Aurora II, zona 13 de la ciudad de Guatemala, durante el periodo de septiembre del 2011 a mayo del 2012. El caudal utilizado para abastecer el biodigestor comercial es el del inicio de la planta de tratamiento (agua no tratada), para establecer la eficiencia de aguas residuales domiciliarias a calidades y caudales característicos de una vivienda unifamiliar.

El biodigestor comercial está construido de polietileno de alta densidad, tiene dos cámaras de tratamiento anaerobio, inicia el tratamiento en una fosa séptica o sedimentador, continua con un tratamiento en un reactor anaeróbico de flujo ascendente, con anillos fabricados de envase PET (polietileno de tereftalato) como elemento filtrante o de sustento para la biomasa.

La investigación fue complementada con los resultados de la investigación *Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales* de la ingeniera Celia Grajeda, que han permitido llegar a conclusiones de la eficiencia del biodigestor comercial en distintas etapas de funcionamiento, permitiendo una evaluación inicial y a cinco años de funcionamiento.

Los parámetros de monitoreo fueron sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, pH, temperatura, DBO₅, DQO, oxígeno disuelto y fósforo, que permitieron establecer la eficiencia en remoción de sólidos y materia orgánica. Además se realizó la toma de muestras en el afluente y efluente de la unidad, considerando el comportamiento del caudal medio del afluente general.

Con los resultados obtenidos se puede determinar que el biodigestor comercial tiene similar eficiencia tanto en su fase inicial, como a cinco años de funcionamiento sin extracción de lodos, esta eficiencia enmarca a la unidad como un tratamiento primario con eficiencia de 97 % de remoción de sólidos sedimentables y DBO₅ del 57 %. También se observó una eficiencia de 94% de remoción de sólidos sedimentables y DQO del 47 %, a un periodo de retención de 11,28 horas.

Objetivos

General

Determinar la eficiencia del biodigestor comercial, en la remoción de contaminantes en aguas residuales domiciliarias, después de cinco años de funcionamiento.

Específicos

1. Evaluar los componentes físicos del biodigestor para el tratamiento de aguas residuales ubicado en planta de tratamiento piloto, Aurora II, luego de cinco años de funcionamiento.
2. Cuantificar lodos generados en el biodigestor luego de cinco años de funcionamiento.
3. Determinar la eficiencia de un biodigestor comercial en el tratamiento de las aguas residuales ante distintos de caudales.

Hipótesis

Existe una eficiencia permanente en el tratamiento de aguas residuales de los biodigestores comerciales luego de cinco años de funcionamiento, pese a que el periodo de retención se ve disminuido por la acumulación de lodos en la unidad de tratamiento.

Delimitación del estudio

Delimitación espacial

El estudio de evaluación de eficiencia del biodigestor comercial se realizó en las instalaciones de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales Ing. Arturo Pazos Sosa, colonia Aurora II, zona 13 de la ciudad de Guatemala. El biodigestor fue instalado en marzo del año 2006.

Delimitación temporal

El estudio toma como referente la investigación *Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales realizada en el año 2006* y complementada con la investigación realizada de agosto del 2011 a junio del 2012, es decir a más de cinco años de funcionamiento de la unidad a evaluar.

Introducción

En algunos países de Latinoamérica existe un marcado déficit de cobertura, tanto en el abastecimiento de agua como en el acceso a drenajes. Guatemala no es ajena a esta realidad, presenta el 78.65 % de hogares con abastecimiento de agua, 40.28 % con acceso a red de drenajes, es decir que el 51% de la población con cobertura de agua, no tiene acceso a red de drenajes. Esta situación se debe a un sin número de razones, obedeciendo a barreras económicas, financieras y técnicas.

Esta baja cobertura en la red de drenajes implica la necesidad de desarrollar sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales domésticas, como una alternativa sostenible para el saneamiento periurbano y rural, mediante un tratamiento primario *in situ*.

El biodigestor comercial presenta cualidades físicas que permiten un fácil manejo, instalación y operación de la unidad de tratamiento.

El propósito de esta investigación es evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes de las aguas residuales domiciliarias, de tal manera que sus ventajas físicas y eficiencia puedan constituir una opción viable en el tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas.

Planteamiento del problema

Existe la necesidad del uso de sistemas de tratamiento de agua residual de bajo caudal, como opción de manejo descentralizado de aguas residuales en zonas periurbanas y rurales en donde no existe una red de alcantarillado, y por ende no hay un sistema de tratamiento de aguas residuales domiciliarios centralizado. Se encontró en el mercado diferentes unidades de tratamiento, cuyas ofertas ofrecen una solución a estos problemas. Sin embargo, es importante dar a conocer la eficiencia de estas unidades de tratamiento, por lo que esta investigación estudia una unidad encontrada en el mercado y se denomina comercialmente como “biodigestor”. La problemática a investigar se basa en tres líneas:

- Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales del biodigestor, luego de cinco años de funcionamiento.
- Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales del biodigestor a distintos caudales.
- Evaluación de la generación de lodos del biodigestor comercial, luego de cinco años de funcionamiento.

Por ello el estudio puede constituir una herramienta para la toma de decisiones en la implementación de este tipo de unidades de tratamiento de aguas residuales, ya que aportará índices de eficiencia comparativa en el corto y mediano plazo, elementos referentes a la generación de lodos y operación del sistema.

1. Marco teórico

1.1. Aguas residuales domiciliarias

De acuerdo con el *Reglamento de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores* para la República de Guatemala emitido por Acuerdo Gubernativo 236-2006, se cataloga como “aguas residuales”: “al agua residual de tipo ordinario o especial que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes”, indicando que el agua residual de tipo ordinario es: el agua residual generadas por las actividades domésticas, tales como uso en servicios sanitarios, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa y otras similares, así como la mezcla de las mismas. Siendo aguas residuales ordinarias las que abastecen a la unidad de tratamiento analizada en el presente estudio.

1.2. Contaminación de las aguas domiciliarias

Las aguas residuales domiciliarias tienen en su concentración de contaminantes un comportamiento no uniforme, debido a variables como la dotación de agua, clima, condiciones socioeconómicas, cuidado del agua, control de vertido de aguas exclusivamente domiciliarias, etc.

De acuerdo con *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*, los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos, teniendo metodologías específicas de medición y parámetros permisibles de descargas de acuerdo con las regulaciones de cada país.

Según *Sistemas de tratamiento de aguas residuales*, 2002, “las aguas residuales contienen aproximadamente un 99.9 % de agua y el resto está constituido por materia sólida. Los residuos sólidos están formados por materia mineral y materia orgánica. La materia mineral proviene de los subproductos desechados por actividades durante la vida cotidiana y de la calidad de las aguas de abastecimiento. La materia orgánica proviene exclusivamente de la actividad humana y está compuesta por materia carbonácea, proteínas y grasas. Las proteínas constituyen del 40 al 50 % de la materia orgánica y están representadas por los complejos de aminoácidos, proporcionando la mayor parte de los nutrientes bacterianos. Aproximadamente 50-60 % de las proteínas se encuentran disueltas en las aguas residuales y 20-30 % en la fracción sedimentable. La materia carbonácea está representada por los hidratos de carbono, que a su vez están constituidos por almidones, azúcares y celulosa. Los almidones y azúcares son fácilmente degradables. Los porcentajes de hidratos de carbono que se encuentran en forma disuelta y sedimentable son semejantes a las proteínas; mientras que las grasas incluidas en los ácidos grasos no suelen ser solubles y se degradan más lentamente”.

Los principales contaminantes que contiene el agua residual y que pueden estar disueltos o suspendidos, se agrupan en:

- Materia orgánica con grado variable de biodegradabilidad.
- Compuestos nitrogenados de origen orgánico y/o mineral.
- Compuestos fosforados de origen mineral.
- Microorganismos compuestos por organismos saprofitos y patógenos tales como helmintos, protozoos, bacterias y virus.

Los constituyentes de las aguas residuales pueden catalogarse con base en su grado de carga contaminante, definiendo está entre alto, medio y bajo

grado de contaminación; de acuerdo a esto se establecen los siguientes valores característicos de la carga contaminante de agua residual domiciliar.

Tabla I. **Composición típica de tres clases de aguas residuales domésticas**

Constituyente	Concentración mg/l		
	Baja	Media	Alta
Sólidos totales	120	700	350
Disuelto	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
En suspensión	350	200	100
Fijos	75	50	30
Volátiles	275	150	70
Sólidos sedimentables ml/l-h	20	10	5
DBO (5 días, 20°C)	300	200	100
DQO	570	380	190
Nitrogeno total (como N)	85	40	20
Orgánico (como N)	35	15	8
Amoniacal (como N)	50	25	12
Fósforo total (como P)	20	10	6
Cloruro (Cl)	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃)	200	100	50
Grasas	150	100	50
Calcio (como Ca)	110	50	10
Magnesio (como Mg)	10	9	8
Sodio (como Na)	100	50	23

Fuente: ROJAS, Ricardo. Sistemas de tratamiento de aguas residuales, p 8.

Entendiendo por tratamiento de aguas residuales a todos aquellos procesos o mecanismos empleados para la reducción de agentes contaminantes vertidos en el agua cuando son utilizadas. El tratamiento de las aguas dependerá de las características de su carga contaminante, se catalogan en procesos físicos, biológicos y químicos. Las razones para el tratamiento pueden ser higiénicas o de salud pública, económicas, estéticas o por el cumplimiento de las regulaciones locales.

1.3. Clasificación del tratamiento de aguas residuales

En Guatemala se acostumbra realizar la siguiente clasificación de las etapas de tratamiento, siendo estas: tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento avanzado o terciario, desinfección y disposición de lodos.

1.3.1. Tratamiento preliminar

Según el libro de *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*, el agua residual contiene por lo general sólidos en suspensión de diferentes tamaños, siendo distintos los objetos y residuos sólidos que circulan por la red de drenaje; entre ellos también existen arenas y gravas. El tratamiento primario es el que disminuye los sólidos en suspensión, contenidos en el agua residual, utilizando procesos físicos para la eliminación de residuos sólidos. Entre los procedimientos físicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales se encuentran el tamizado grueso, tamizado fino y microtamizado, desarenadores y sedimentadores. La remoción en sedimentadores, tanques Imnhoff y tanques sépticos, tienen una remoción de partículas mayores a 0,004 mm.

1.3.2. Tratamiento primario

El objetivo primordial del tratamiento primario es la remoción de la materia sedimentable o flotante por medio de los procesos físicos o mecánicos. El tratamiento primario es capaz de remover no solamente la materia que incomoda, sino también, una fracción importante de la carga orgánica y que puede representar entre el 25 % y el 40 % de la DBO₅ y entre el 50 % al 65 % de los sólidos suspendidos. Según *Ingeniería de las aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*, indica que la eficiencia de una fosa séptica para los sólidos sedimentables totales se encuentra entre 78 a 85 % y una remoción de DBO₅ del 33 a 62 %. Entre los tipos de tratamiento primario se citan:

- Sedimentación primaria
- Flotación
- Precipitación química
- Filtros gruesos
- Oxidación química
- Coagulación, floculación, sedimentación y filtración

1.3.3. Manejo de lodos

En el tratamiento de las aguas residuales se produce una serie de subproductos localizándolos en el canal de rejillas, desarenadores y sedimentadores, teniendo el mayor volumen tanto en el sedimentador primario como secundario. Los lodos antes de su disposición final deben ser acondicionados a causa del alto contenido de materia orgánica putrescible y que de ninguna manera puedan ser dispuestos libremente. El lodo procedente de las plantas de tratamiento, varía según el tipo de planta, tratamientos, caudales y composición de las aguas residuales a tratar. En líneas generales se

puede indicar que los lodos provienen de la sedimentación primaria y representa entre el 0.22 % y el 0.93 % del volumen de agua residual y el contenido de sólidos volátiles es del 63 % al 83 %.

En el caso de los lodos provenientes de la sedimentación secundaria, varían en función de los procesos. Los lodos resultantes de los filtros percoladores muestran un rendimiento de 0.08 % a 0.10 % del caudal tratado y el contenido de sólidos volátiles es del 60 % en promedio. Los procesos típicos de manejo de lodos son: concentración, digestión, acondicionamiento, deshidratación o secado, incineración y oxidación. De estos, la digestión y oxidación por vía húmeda son los más empleados para la reducción de la materia orgánica, y la concentración, acondicionamiento y deshidratación para la eliminación de la humedad.

En la posterior tabla se resumen las características de los lodos procedentes de diferentes procesos de tratamiento

Tabla II. Características de los lodos

Fuente de lodo	Aspecto	Olor	Secado	Humedad
Primario	Pardo y pegajoso	Fuerte	Difícil	95.0 - 97.5
Secundario				
Filtro biológico	Ceniciento flocculento	Medio	Medio	92.0 - 95.0
Lodo activado	Marrón flocculento	Leve	Difícil	98.5 - 99.5
Precipitación química	Ceniciento gelatinoso	Fuerte	Difícil	93.0 - 95.0
Lodo séptico	Negro	Fuerte		
Lodo digerido	Negro homogéneo granular	Suave	Fácil	S.P. 87 F.B. 90 L.A. 93 P.Q. 90

Fuente ROJAS, Ricardo. Sistemas de tratamiento de aguas residuales, p 16.

El tratamiento de la materia orgánica persigue la reducción apreciable del contenido de la materia orgánica volátil, aumento del contenido de sólidos fijos, reducción del contenido de humedad, mayor posibilidad de drenaje del agua contenida en los lodos, producción de gases, principalmente metano.

1.4. Manejo descentralizado de aguas residuales

De acuerdo a los datos presentados en la tabla III, se puede observar una disparidad entre el servicio de agua entubada y acceso a la red de drenajes, esto por ende, implica que no existe una red de drenajes que conduzcan a sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales, esta falta de acceso a una red de alcantarillado, trae como consecuencia una complicación para el tratamiento de las aguas residuales, ya que al no ser recolectadas deberían ser tratadas en el lugar, por medio de unidades de tratamiento unifamiliares; siendo el biodigestor una unidad con posibilidades de aplicación.

Tabla III. **Accesos a servicios de saneamiento en la República de Guatemala**

Acceso a Saneamiento	Urbano	Rural	Total	%
Hogares con acceso a agua entubada	1,298,834	787,854	2,086,688	78.65 %
Hogares con acceso a drenajes	975,106	93,622	1,068,728	40.28 %

Fuente: ENCOVI 2006, INE. *con base a un total de 2,653,000 hogares del país

El sistema de tratamiento de aguas residuales en el área rural es poco utilizado, siendo los tanques sépticos las unidades mayormente utilizadas para el tratamiento y su disposición final mediante la utilización de pozos de absorción, vertido a zanjones, ríos o cañadas.

De acuerdo con: *La depuración de las aguas residuales en pequeños núcleos. Situación actual, compromisos y alternativas*, la elección entre los posibles sistemas de depuración debe pasar por una primera etapa de preselección, de acuerdo a las circunstancias específicas de cada lugar: población, superficie disponible, grado de depuración exigido (legislación sobre vertidos), limitaciones económicas tanto en construcción como funcionamiento; tipo de agua residual a tratar, y otras circunstancias propias de cada lugar para hacerlas viables o desechables alguna de las alternativas propuestas.

A continuación se presentan los campos poblacionales de aplicación y la superficie necesaria por habitante para cada una de las alternativas posibles.

Tabla IV. **Campo poblacional de aplicación de las diferentes alternativas de depuración**

Alternativa	100	200	500	1000	2000	5000	10000	> 10000	Superficie Necesaria (m2/hab.)
Fosa séptica	+++	++	+						0.1 - 0.5
Tanque Imhoff	+++	+++	++	+					0.05 - 0.1
Zanja filtrante	+++	+++	+++	++	++	+			6 - 66
Lecho filtrante	+++	+++	+++	++	++	+			2 - 25
Filtro de arena	+++	+++	+++	++	+				1 - 9
Lecho de turba	++	+++	+++	+++	+++	++	+		0.6 - 1.0
Pozo filtrante	+++	+++	+++	++	++	+			1 - 14
Filtro verde	+	++	+++	+++	+++	++	++	+	12 - 110
Lecho de juncos	+	++	+++	+++	+++	++	+	+	2 - 8
Filtración rápida	+	++	+++	+++	+++	++	+	+	2 - 22
Esc. Superficial	++	+++	+++	+++	++	+	+	+	5 - 15
Lag. aireada			+	++	+++	+++	+++	+++	1 - 3
Lag. aerobia	+	+	++	+++	+++	+++	++	++	4 - 8
Lag. Facultativa	+	++	+++	+++	+++	+++	++	++	2 - 20
Laf. anaerobia	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	++	1 - 3
Lag. anaero. Mod.				++	++	+++	+++	++	1 - 5
Lecho bacteriano	+	++	+++	+++	++	++	++	++	0.5 - 0.7
Biodisco	+	+	++	+++	+++	+++			0.5 - 0.7
Aireación prolongada	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	++	0.2 - 1.0
Canal de oxidación			++	+++	+++	+++	+++		1.2 - 1.8
Trat. Fisco quimico	+	+	++	+++	+++	+++	++		0.1 - 0.2
(+: Poco, (++) Medio, (+++): Mucho									

Fuente: COLLADO LARA, Ramon, La depuración de las aguas residuales en pequeños núcleos. Situación actual, compromisos y alternativas, p 8..

1.5. Marco regulatorio del vertido de aguas residuales vigente en la República de Guatemala

La regulación guatemalteca, según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 establece los parámetros de medición para la determinación de las características de las aguas residuales y definen los límites máximos permisibles para cada uno de ellos, siendo estos:

Tabla V. Límites máximos permisibles a cuerpos receptores

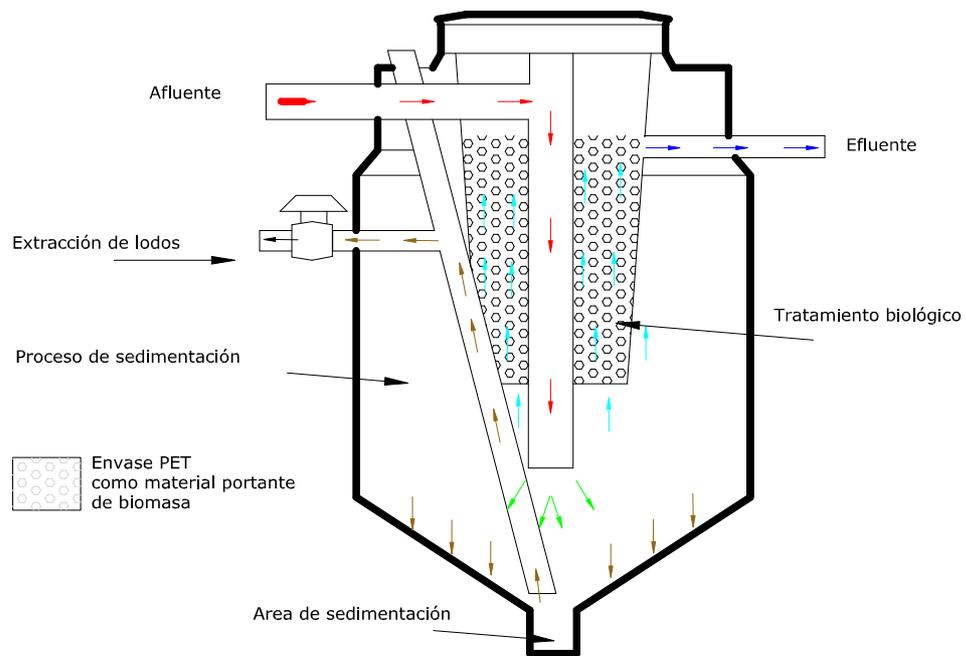
Parámetro	Unidad	Valor inicial	Fecha máxima de cumplimiento			
			02/05/11	02/05/15	02/05/20	02/05/24
			ETAPA			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	°C	TCR ± 7	TCR ± 7	TCR ± 7	TCR ± 7	TCR ± 7
Grasas y aceites	mg/l	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Aus/Pres	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	mg/l	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	mg/l	1400	100	50	25	20
Fósforo total	mg/l	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	U. pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	mg/l	< 1 X 10 ⁵	< 1 X 10 ⁵	< 1 X 10 ⁵	< 1 X 10 ⁴	< 1 X 10 ⁴
Arsénico	mg/l	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	mg/l	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	mg/l	6	3	1	1	1
Cobre	mg/l	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	mg/l	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	mg/l	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	mg/l	6	4	2	2	2
Plomo	mg/l	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	mg/l	10	10	10	10	10
Color	U.	1500	1300	1000	750	500

Fuente: Acuerdo Gubernativo 236-2006.

1.6. Biodigestor comercial

El biodigestor comercial está construido de polietileno de alta densidad, con dos cámaras de tratamiento anaerobio. La primera fase del tratamiento, la realiza una cámara de fosa séptica o sedimentador, continuando con un tratamiento en un reactor anaeróbico de flujo ascendente, con anillos fabricados de envase PET (polietileno de tereftalato) como elemento filtrante o de sustento para la biomasa. Debido a su entrada mediante un codo a 90° (ver figura 1), esta permite separar la materia flotante del resto del fluido, conduciendo el caudal a la fosa séptica donde se produce la decantación de los sólidos sedimentables y una posterior fermentación anaeróbica de los mismos hasta su estabilización. Esta fermentación da lugar al desprendimiento de metano y dióxido de carbono que son liberados a la atmósfera mediante las tuberías de conducción del fluido.

Figura 1. Corte transversal del biodigestor comercial



Posteriormente pasa por un reactor anaerobio de flujo ascendente, en donde se utilizan anillos fabricados de envase PET, como material filtrante para después dirigirse a la disposición final del efluente o idealmente a un tratamiento complementario.

Los lodos se depositan en el fondo de la unidad y son expulsados por medios hidrostáticos a través de la tubería dispuesta para este propósito. Esta operación se realiza mediante la apertura de la válvula de control que se encuentra en el exterior, existiendo una pérdida de carga (diferencia de cota de entrada y salida) de 10 centímetros y una presión hidrostática para la expulsión de los lodos de 15 centímetros. Los componentes del biodigestor pueden resumirse de la siguiente manera: entrada de aguas residuales, tapa de registro, filtro anaerobio, tubería y válvula de extracción de lodos, tapa de registro de lodos y salida de agua tratada.

1.6.1. Características físicas del biodigestor comercial

El biodigestor comercial cuenta con varias presentaciones en el mercado, estas opciones dependen del caudal a tratar, que el fabricante lo traduce como personas a las que se le prestará el servicio. En la tabla siguiente se presentan estas características.

Tabla VI. Características físicas del biodigestor comercial

Característica	Unidad	Capacidad (Litros)			
		600	1300	3000	7000
Altura	Metro	1.65	1.95	2.15	2.65
Diámetro	Metro	0.86	1.12	2	2.4
Capacidad para el tratamiento de aguas residuales.	Persona	5	10	25	57

Fuente: Manual del fabricante.

La evaluación de la eficiencia de un biodigestor comercial en el tratamiento de aguas residuales domiciliarias, se realizó con una unidad de 1 300 litros de capacidad. Se deduce por las características físicas de la unidad de tratamiento evaluada, que el 85 % del volumen de la unidad lo constituye un tratamiento de fosa séptica y el 15 % restante, en un reactor anaerobio de flujo ascendente.

1.6.2. Afluente y periodo de retención, según diseño

El fabricante no especifica el caudal de diseño de la unidad ni periodo de retención, ya que sus especificaciones se basan en número de personas. Se pueden inferir estas propiedades tal como se expresa en la tabla VII, *Caudal y periodo de retención*, dicha tabla se encuentra de acuerdo a dotaciones características, estableciendo un periodo de retención mínimo de 13,20 horas y periodo de retención máximo de 26,40 horas para la unidad evaluada.

Tabla VII. Caudal y periodo de retención

Característica	Capacidad	Unidad
	1300 litros	
Capacidad para el tratamiento de aguas residuales.	10	Persona
Dotación 200 litros/día	2000.00	Litros
Período de retención	13.20	Horas
Volumen mínimo de sedimentador (Pr = 12 horas)	1200.00	Litros
Dotación 100 litros/día	1000.00	Litros
Período de retención Pr	26.40	Horas
Volumen mínimo de sedimentador (Pr = 12 horas)	600.00	Litros
Pr = Periodo de retención mínimo		

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la revisión bibliográfica se presenta la siguiente tabla de eficiencia teórica de unidades de tratamiento similares a la evaluada.

Tabla VIII. **Eficiencia teórica de unidades de tratamiento**

Parámetro	Fosa séptica		Biodigestor
	Metcalf & Eddy	Según fabricante	
DBO ₅	De 33 a 62 %	De 25 a 30 %	60 %
DQO		De 25 a 50 %	
Grasas y aceites		Mayor de 50 %	
Sólidos sedimentables	De 78 a 85 %	Mayor de 50 %	60 %

Fuente: Metcalf & Eddy *Ingeniería de las aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*, y Catálogos del fabricante (2012)

De acuerdo al fabricante, la unidad a evaluar presenta una reducción del DBO₅ del 60 % y reducción de sólidos sedimentables totales del 60 %. No presentando otros parámetros de eficiencia que puedan ser evaluados.

1.6.3. **Procesos de tratamiento en biodigestor**

De acuerdo a lo expresado en el fundamento teórico del numeral *Clasificación del tratamiento de aguas residuales* y capítulo 2, *Caracterización del biodigestor comercial*, en la unidad evaluada, se presenta un tratamiento primario y un biológico, especificando en los siguientes incisos los procesos de cada uno de ellos.

De acuerdo *Especificaciones técnicas para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización*, el periodo de retención de una fosa séptica está dada por la siguiente expresión:

$$Pr = 1.5 - 0.30 \times \text{Log}(P \times q)$$

En donde:

Pr = periodo de retención

P= población (habitantes)

q= caudal medio diario (litros/habitante día)

Al aplicar la ecuación anterior, el periodo de retención para una fosa séptica que atienda una población de cinco personas y una dotación por persona de 200 litros/persona/día se establece un Pr= 0,57 días, esto requiere un volumen de retención entre 1 114 litros.

Tomando en cuenta lo indicado en la sección Características físicas del biodigestor comercial, se establece que el volumen de sedimentación se encuentra en 1 100 litros, estando en armonía con el volumen teórico.

El proceso en la fosa séptica o de sedimentación inicia con los contaminantes minerales, los cuales son precipitados por su tamaño y sus características inertes, los mismos no pueden ser degradados biológicamente, depositándose en el fondo del tanque. Los sólidos orgánicos precipitados al fondo son digeridos por bacterias anaerobias reduciendo estos en volumen y transformándolos en compuestos más estables. Debido a su forma cónica en la base de la unidad, permite que la concentración de material sedimentado se concentre en la base del cono, permitiendo una extracción de los lodos más efectiva.

La unidad de tratamiento cuenta con un reactor anaerobio de flujo ascendente con un volumen del 15 % del total de la unidad, esto se traduce a una retención entre 2.34 y 4.68 horas de acuerdo a dotaciones de 100 y 200

litros/habitante/día respectivamente, para un reactor de este tipo su eficiencia teórica según *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados* es de 75 % a 90 % respecto a la remoción de DBO5.

1.6.3.1. Soporte de microorganismos

El reactor anaerobio de flujo ascendente del biodigestor comercial evaluado tiene como medio de soporte anillos fabricados de envase PET, esto como elemento de portación de la película bacteriana, adherida al anillo plástico. De acuerdo con *Implementación de material de desecho pet como elemento filtrante en filtros biológicos*, los anillos fabricados de envase PET, como elemento portante de la película bacteriana, tiene una eficiencia de remoción de carga orgánica similar, a la remoción de unidades que utilizan agregado pétreo y ripio de construcción como elemento filtrante.

El sistema de filtración con envase PET tiene ventajas, de ellas se encuentra la reducción de peso, en comparación a otros medios filtrantes tradicionales (ripio y agregado pétreo), condición que permite una estructura liviana de portación del elemento filtrante. Esta condición permite al biodigestor utilizar un soporte liviano.

1.6.4. Instalación operación y mantenimiento sugerido

De acuerdo al fabricante, el biodigestor deberá instalarse de la siguiente manera:

- Realizar la excavación tomando en cuenta la altura de la unidad y cotas de entrada y salida de la red de drenaje domiciliar, se dará una sobre excavación mínima de 20 centímetros en el contorno de la unidad.

- La excavación en la base se debe realizar con la forma cónica del biodigestor, extrayendo cualquier objeto que pudiera dañar las paredes de la unidad. En su base deberá colocarse un soporte fundido de 60 centímetros de diámetro y como mínimo 5 de espesor, constatando un buen apoyo en el extremo inferior.
- Llenar el biodigestor con agua antes del proceso de compactación.
- Realizar el llenado de la unidad con una mezcla de suelo y cemento, extrayendo cualquier objeto que pudiera poner en riesgo las paredes de la unidad.

El biodigestor comercial, de acuerdo al fabricante, debe tener una extracción de lodos, recomendando que dicha operación se realice en periodos de 12 a 24 meses. La primera extracción de lodos debe realizarse a los 12 meses de la fecha de inicio, para estimar la cantidad de lodos generados y así programar el intervalo de mantenimiento, realizando las operaciones de extracción de lodos de la siguiente manera:

- Abrir la válvula de lodos, dejando salir estos por acción hidrostática, ya que existe una diferencia entre cota de salida de caudal y cota de salida de lodos de 15 centímetros, condición que permite realizar este procedimiento.
- Al abrir la válvula se tendrá un fluido de la siguiente manera:
 - Salida de dos a tres litros de agua pestilente de color *beige*.

- Salida de lodo estabilizado de color café e inoloro, dependiendo del volumen, de la periodicidad del mantenimiento y composición de las aguas residuales.
- Nuevamente saldrá agua pestilente de color *beige*, indicativo de que la extracción de lodos estabilizados ha finalizado, por lo que se deberá cerrar la válvula de lodos.
- Si se observa dificultad en la salida de lodos, se deberá agitar el fondo de la unidad, introduciendo en el ducto de limpieza una vara de manera reiterada, teniendo cuidado de no dañar las paredes de la unidad. Esta acción fluidificará los lodos sedimentados, permitiendo su remoción.
- En el contenedor de extracción de lodos, la parte líquida del lodo estabilizado será absorbida por el suelo, quedando retenida la materia orgánica que después de secar, se convierte en un polvo negro, puede ser utilizado como fertilizante tomando en cuenta la regulaciones en procesos de reutilización.
- Echar agua sobre el filtro anaeróbico para limpiarlo, después de una obstrucción o cada tres o cuatro extracciones de lodos.
- Las costras de material orgánico formados a través de los aros del filtro se desprenden solas al quedar gruesas.

2. Antecedentes

La investigación se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Ing. Arturo Pazos Sosa, planta piloto con fines académicos y de investigación bajo la administración de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria (ERIS), de la Universidad San Carlos de Guatemala (USAC).

2.1. Planta piloto de tratamiento de aguas residuales

En la investigación *Certificación de la norma ISO 14000 para una planta de tratamiento de aguas negras*, se indica que en el año de 1973 el Banco Nacional de la Vivienda y la ERIS unificaron esfuerzos para darle el tratamiento a las aguas residuales de las colonias Aurora I y Aurora II. La ERIS propuso el desarrollo de una planta experimental piloto que permitiera el tratamiento adecuado de las aguas residuales, pero al mismo tiempo sirviera para la docencia y la investigación de sistemas de tratamiento aplicables a Guatemala y Centro América. Asimismo, se realizó un proyecto de cooperación presentado al Gobierno Federal Suizo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) quienes aceptaron y ejecutaron por medio de la empresa Ecolepoly Technique Federale de Lausanne.

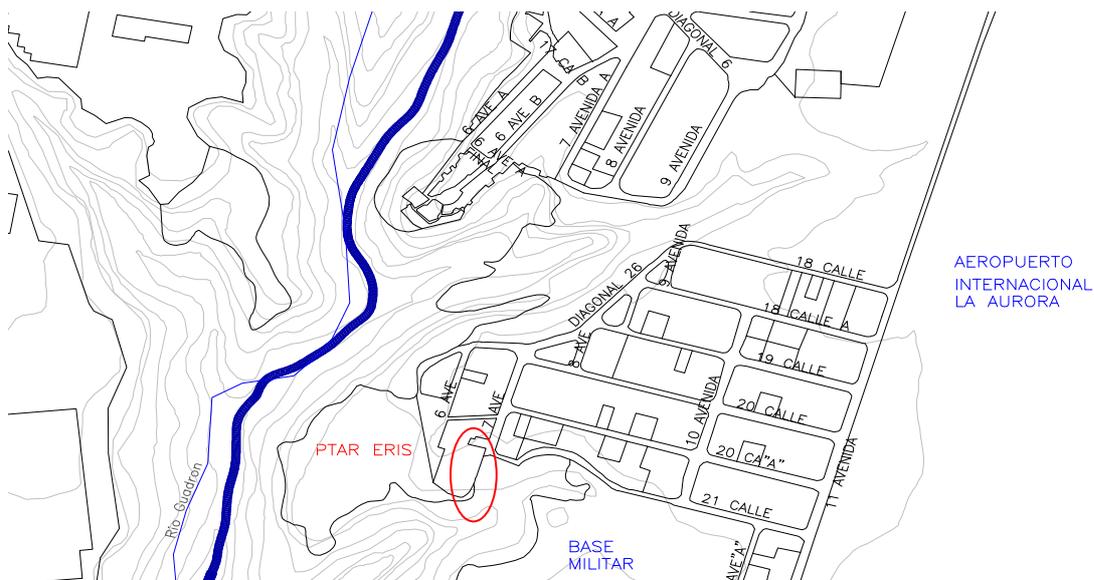
De acuerdo con esa misma investigación, la planta piloto Ing. Arturo Pazos Sosa inició operaciones en el año de 1974, originalmente tratando las aguas residuales de las colonias Aurora I y Aurora II, posteriormente los caudales de la colonia Aurora I fueron desviados, por ello son tratados únicamente las aguas residuales de la colonia Aurora II.

En la actualidad la planta de tratamiento de aguas residuales consta de varios sistemas de tratamiento, funcionando en paralelo y serie de acuerdo al diseño de estas. Debido a que la investigación se realizó con agua cruda (sin tratar) no se describen los procesos de tratamiento existentes en la planta por no considerarse de interés, ni constituirse en variables que pudieran haber afectado la presente investigación.

2.1.1. Ubicación y población atendida

La planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) está ubicada en la colonia militar Aurora II, zona 13. Limitada al norte con el Observatorio Nacional y colonia Aurora II, al este con el aeropuerto internacional La Aurora y colonia Aurora II y al sur oeste con depresiones geomorfológicas. Siendo su ubicación latitud norte $14^{\circ} 34' 37.25''$ y longitud oeste $90^{\circ} 32' 12.42''$.

Figura 2. Localización de planta de tratamiento de aguas residuales



Fuente: Adaptación de hojas cartográficas IGN.

2.1.2. Características climatológicas y topográficas

De acuerdo a datos recabados en el periodo del año 1990 al 2011 en la estación meteorológica central del Instituto Nacional de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), características climatológicas son las siguientes:

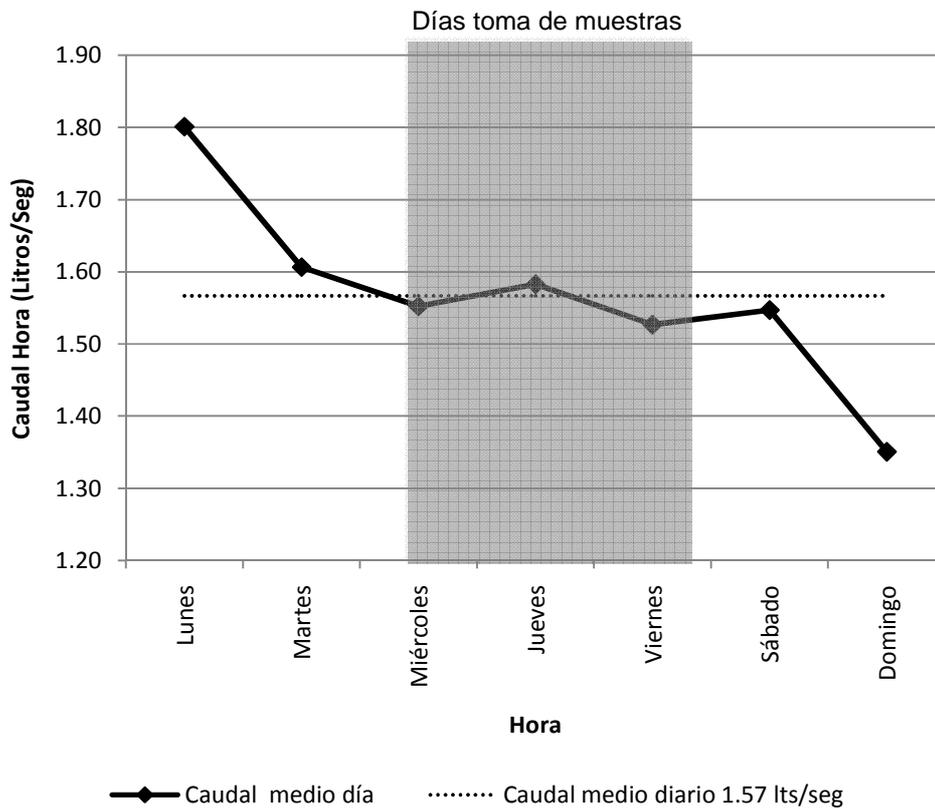
- Temperatura media anual: 19.6 °C
- Temperatura máxima media anual: 25.5 °C
- Temperatura mínima media anual: 13.5 °C
- Precipitación media anual: 1274 mm/año
- Días de lluvia durante el año 125 días/año

Se puede observar en las curvas a nivel de la figura 2, que el predio consta de un área llana y otra de alta pendiente, lo que permite la conducción de las aguas residuales a las distintas unidades de tratamiento por métodos gravitacionales. Las elevaciones del sitio varían desde 1 502 msnm a 1 455 msnm.

2.1.3. Comportamiento del caudal del afluente

De acuerdo con *Determinación del caudal de aguas servidas de la colonia militar Aurora, zona 13*, el caudal medio diario muestra un comportamiento heterogéneo durante la semana, con un caudal estable durante los días martes, miércoles, jueves, viernes y sábado tal como se evidencia en la siguiente figura.

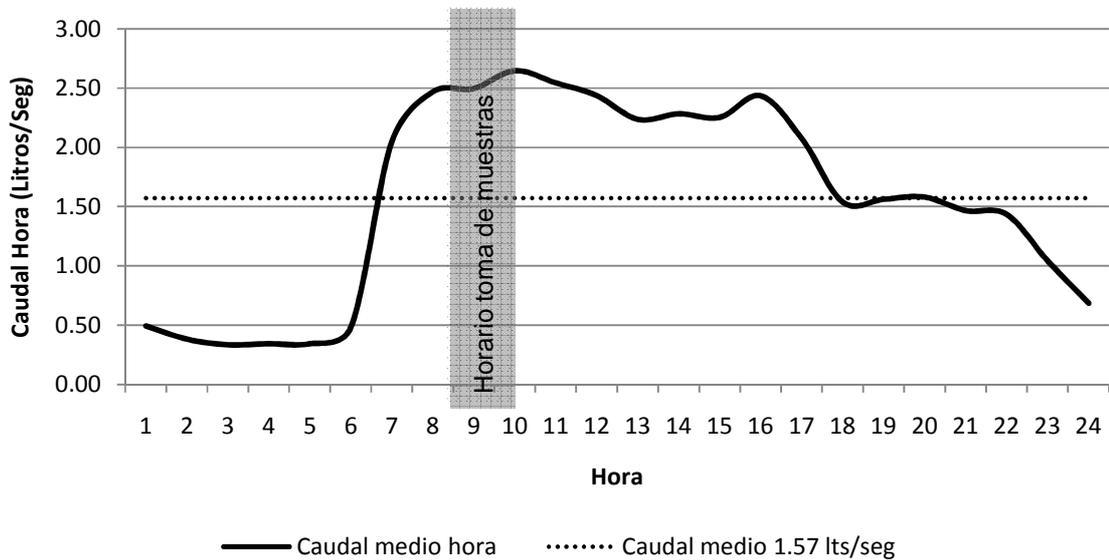
Figura 3. Caudal promedio diario de PTAR Aurora II



Fuente: SANTIZO BARRIOS, Celestino F. *Determinación del caudal de aguas servidas de la colonia militar Aurora, zona 13. Modificado.*

El comportamiento horario en la planta de tratamiento, es el característico de las aguas residuales urbanas, tal como lo expone Santizo en *Determinación del caudal de aguas servidas de la colonia militar Aurora, zona 13*, y se resume en la siguiente figura.

Figura 4. Caudal promedio horario de PTAR Aurora II



Fuente: SANTIZO BARRIOS, Celestino F. *Determinación del caudal de aguas servidas de la colonia militar Aurora, zona 13. Modificado.*

2.1.4. Caracterización del afluente

En la investigación *Evaluación del tratamiento primario, secundario e investigación del tratamiento terciario por fitodepuración en la remoción de nutrientes y descarga microbiológica en la planta piloto de tratamiento de agua residual domestica Aurora II, "Ingeniero Arturo Pazos Sosa" posterior a la rehabilitación*, se determinaron los parámetros característicos del afluente y efluentes de las unidades de tratamiento, de donde se extrajeron los parámetros del agua cruda (sin tratamiento) y se resumen en la siguiente tabla.

Tabla IX. **Parámetros característicos del afluente**

Parámetro	Unidades	Valor
DBO5	mg/l	264
DQO	mg/l	495
Coliformes totales	NMP/100ml	9.80E+14
Coliformes fecales	NMP/100ml	1.00E+14
Aspecto		Turbia
Color	Unidades	104
Turbiedad	UTN	107
pH	Unidades	6.80
Temperatura	° Celsius	22.6
Conductividad eléctrica	um	660
N-NH3	mg/l	43
N-NO2	mg/l	0.05
N-NO3	mg/l	10.80
N-Nitrógeno total	mg/l	53.85
Sólidos sedimentables	cm3/l	5.00
Sólidos en suspensión	mg/l	30
Sólidos disueltos	mg/l	330
Hidróxidos	mg/l	0
Carbonatos	mg/l	0
Bicarbonatos	mg/l	342
Alcalinidad total	mg/l	342

Fuente: ORTIZ CASTILLO, Edwin. *Evaluación del tratamiento primario, secundario e investigación del tratamiento terciario por fitodepuración en la remoción de nutrientes y descarga microbiológica en la planta piloto de tratamiento de agua residual doméstica Aurora II, "Ingeniero Arturo Pazos Sosa" posterior a la rehabilitación.* 12 p.

.De acuerdo a la tabla I, Composición típica de tres clases de aguas residuales domésticas y la relación con la tabla IX , las aguas residuales a utilizar se pueden catalogar como una concentración baja en relación a sus contaminantes.

2.2. Biodigestor comercial instalado en planta de tratamiento de aguas residuales Ing. Arturo Pazos Soza

El biodigestor comercial evaluado fue instalado durante el primer trimestre del año 2006, de acuerdo con *Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales*, se instaló atendiendo las recomendaciones realizadas por el fabricante, contando con supervisión durante el proceso. La unidad fue instalada a 3 metros de la entrada del sedimentador primario. Las condiciones físicas existentes desde el 2006 fueron respetadas para la determinación de la eficiencia de la unidad, luego de cinco años de funcionamiento, debido a que la modificación de estas condiciones alterarían las variables iniciales, invalidando los resultados comparativos de 2006 y los resultados de la presente investigación.

El biodigestor comercial se abastece al ingreso del sedimentador primario, con ello se somete a aguas residuales con calidades similares a su operación de diseño, sin embargo, la red de drenaje realiza una homogenización en la calidad del agua residual y genera un caudal continuo, situación no característica de una vivienda unifamiliar.

Se encontraron las siguientes condiciones físicas de abastecimiento: el sistema tiene una recolección por rebalse, por medio de una tubería de 1" y válvula de regulación localizada entre la toma del caudal de afluente y la unidad de tratamiento.

El desfogue se realiza por medio de una tubería de 2" conectada al caudal de demasías de la salida del sedimentador primario, para posteriormente continuar con su tratamiento. La tubería de extracción de lodos de un diámetro de 2" tiene una longitud de 2,50 metros, medidos desde la salida del biodigestor.

La unidad desde su puesta en marcha (febrero del 2006) al inicio de la evaluación (agosto 2011) no ha tenido el mantenimiento indicado por el fabricante y descrito en la sección Instalación operación y mantenimiento sugerido, sin embargo, estas condiciones se dan en muchas de las unidades instaladas, por lo que puede representar un funcionamiento característico de una vivienda promedio.

2.3. Periodo de evaluación y eficiencia inicial

En la investigación *Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales* se realizó la evaluación inicial del biodigestor comercial, mediante el monitoreo iniciado en marzo del 2006 a febrero del 2007, determinando la calidad del afluente y del efluente, estos análisis se realizaron en 10 muestras, establecieron la eficiencia inicial del biodigestor comercial, estos resultados se describen en las tablas posteriores.

Tabla X. Caracterización del afluente

Parámetros	Unidad	FECHA DE MUESTREO									
		22/3/06	29/3/06	5/4/06	19/4/06	2/5/06	11/5/06	17/5/06	24/5/06	16/11/06	8/2/07
Continúa tabla X											
pH	U	8	8.06	8.05	8.03	8.01	8.04	8	8.05	7.72	7.88
T°	° C	24.6	23.5	22.7	24.7	23.9	23.5	23.7	23.6	23.7	22.7
DQO	mg/l	318	650	398	432	460	688	500	398	386	436
DBO ₅	mg/l	180	220	220	200	260	480	370	160	181	316
Sólidos suspendidos	mg/l	378		659	520	210	580	986	654	349	327
Sólidos sedimentables	mg/l		5	2.5	2.5	2	8	6	3	4.5	3
Fósforo total	mg/l	5.8	7.4	5.9	5.9	6.7	7.3	6.6	4.25	8.6	9.4
Nitrógeno total	mg/l	33.63	62	25.8	43.7	36.9	43.5	40.3	40.3	55	33

Fuente: GRAJEDA, Celia "Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales Caracterización del efluente. Modificado.

Parametros	Unidad	FECHA DE MUESTREO									
		22/3/06	29/3/06	5/4/06	19/4/06	2/5/06	11/5/06	17/5/06	24/5/06	16/11/06	8/2/07
pH	U	7.85	7.44	7.78	7.75	7.97	7.89	7.7	7.9	6.96	7.24
T°	Celsius	24.1	22.9	22.3	24.3	23.1	23	23.1	23.3	20.4	20.9
DQO	mg/l	242	244	240	258	206	174	320	158	60	190
DBO ₅	mg/l	170	150	180	100	150	100	180	90	21	69
Sólidos suspendidos	mg/l	268		412	306	90	396	630	306	246	165
Sólidos sedimentables	mg/l	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0
Fósforo total	mg/l	6.2	6.7	6.6	3.9	5.1	6.1	7.6	7.7	6.5	8.6
Nitrogeno total	mg/l	58.8	29	31.4	17.9	32.5	35.8	35.8	38.1	43	3.7

Fuente: GRAJEDA, Celia "Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales. Modificado.

Tabla XI. **Eficiencia inicial del biodigestor**

Parámetros	Unidades	Afluente	Efluente	Eficiencia
pH	U	7.98	7.64	
T°	° Celsius	23.65	22.71	
DQO	mg/l	454.57	194.01	57.32 %
DBO ₅	mg/l	243.62	104.92	56.93 %
Sólidos suspendidos	mg/l	471.96	276.42	41.43 %
Sólidos sedimentables	mg/l	3.67	0.00	100.00 %
Fósforo total	mg/l	6.64	6.36	4.12 %
Nitrógeno total	mg/l	40.24	27.44	31.80 %

Fuente: GRAJEDA, Celia "*Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales*. Modificado.

3. Metodología

La evaluación de la eficiencia del biodigestor comercial luego de cinco años de funcionamiento se realizó mediante la determinación de los parámetros del afluente y efluente del sistema, bajo las condiciones físicas del inicio del proyecto de investigación, la recolección y análisis de muestras simples durante días hábiles consecutivos, atendiendo el comportamiento característico del caudal y logística de evaluación. Al establecer la variación de los resultados obtenidos en la investigación *Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales* y los resultados de esta investigación a cinco años de funcionamiento.

Para realizar la evaluación de los componentes físicos del biodigestor, luego de cinco años de funcionamiento, se hizo una inspección al sistema en su conjunto y la verificación de los componentes, evaluando el deterioro y funcionamiento de cada uno de estos.

Respecto a la cuantificación de los lodos generados en el biodigestor, luego de cinco años de funcionamiento, se realizó la extracción por medio de un diferencial de carga hidrostática y cuantificación volumétrica de los lodos.

La evaluación física y cualitativa del sistema se procedió al mantenimiento y mejoras del biodigestor, especialmente en la tubería que alimenta a la unidad, colocando una tubería de diámetro comercial representativa de un sistema de drenaje domiciliar.

La variación de caudales y evaluación de la eficiencia de un biodigestor comercial en el tratamiento de las aguas residuales, a diferentes periodos de

retención se realizó posterior a las mejoras y mantenimiento del sistema, al modificar el caudal de entrada, manteniéndolo estable durante un periodo superior a dos meses, evaluando posteriormente a este plazo su eficiencia para cada caudal específico; luego de monitorear los caudales mediante aforos volumétricos en el efluente de la unidad, realizando en cada monitoreo un aforo.

3.1. Variables de estudio

Se establecen los parámetros de monitoreo con base en los resultados obtenidos en *Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales*, eficiencias esperadas y pertinencia de medición. Se definen los siguientes parámetros principales a evaluar:

- Temperatura
- DBO₅
- DQO
- Sólidos suspendidos
- Sólidos sedimentables

Y los parámetros secundarios:

- Oxígeno disuelto
- Fósforo total

El oxígeno disuelto, por ser un tratamiento anaerobio, es predecible su disminución en la unidad de tratamiento, sin que ello implique una deficiencia en el tratamiento de las aguas residuales. Respecto al fósforo y nitrógeno total, su eficiencia es residual y es necesario un tratamiento posterior, para la remoción de estos parámetros.

3.2. Determinación del espacio muestral

Para la determinación del número de muestras que representen un análisis confiable, se utilizaron las curvas de niveles de confianza del método 1060 B de los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, de acuerdo con Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2002 utilizando la siguiente expresión matemática para su determinación:

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

Donde:

N = número de muestras

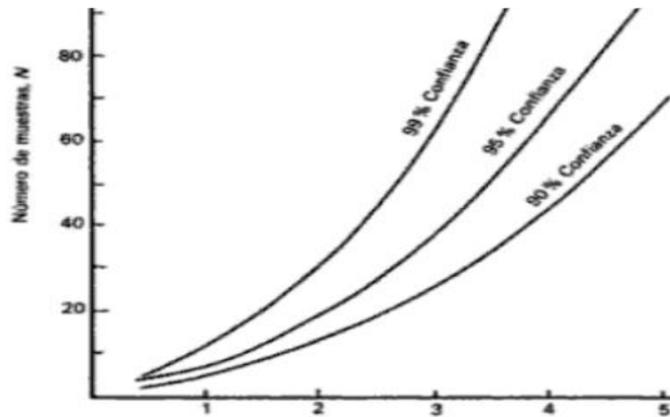
t = es el nivel de confianza dado, prueba t de *student*

s = desviación estándar global

U = nivel de confianza aceptable

Para una desviación estándar, *s*, de 0.018 y un nivel de confianza, *U*, de 0.014, se obtiene un valor de 1.28 para la relación *s/U*, determinando un número mayor o igual a nueve muestras de acuerdo con la interpolación de los datos obtenidos en la siguiente figura.

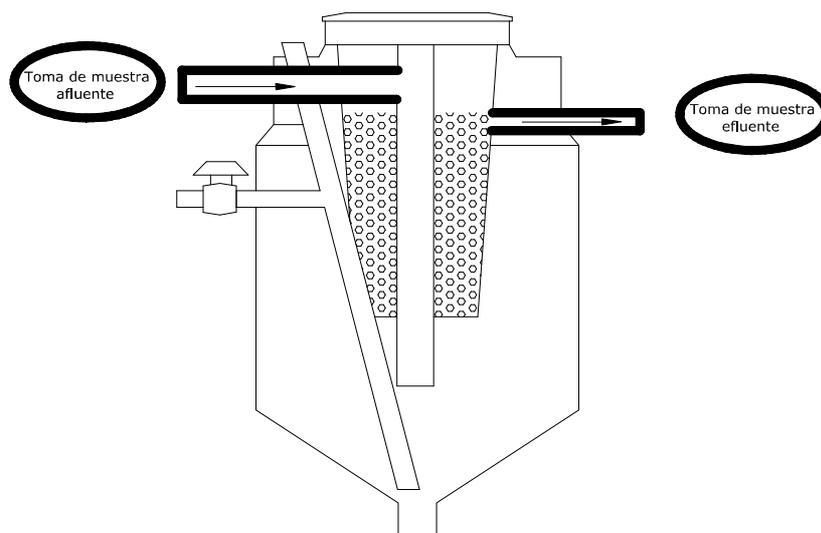
Figura 5. **Determinación de número de muestras**



Fuente: Standard methods for the examination of water and wastewater, 2002. p. 1-21.

De acuerdo a los objetivos planteados, los puntos de muestreo corresponden a la entrada y salida del biodigestor comercial (ver figura 6), determinando en el lugar el caudal y temperatura de cada muestra.

Figura 6. **Localización de toma de muestras**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Día, horario y frecuencia de toma de muestras

Las muestras tomadas fueron simples (puntuales), considerando el comportamiento del afluente y descrito en las figuras 1 y 2, de tal forma que los martes, miércoles, jueves, viernes y sábado fueron considerados por su comportamiento homogéneo y cercano al caudal medio, pero por su logística se determinó que el periodo de toma de muestra se realizará los miércoles, jueves y viernes; en horario de 8:45 a 9:45, ya que se encuentra en el caudal pico diario que abarca desde las 7 a las 17 horas, iniciando su análisis en el laboratorio 30 minutos después de su recolección.

3.4. Evaluación de los componentes físicos del biodigestor

Se realizó una inspección física del biodigestor comercial y sus componentes, luego de cinco años de funcionamiento, encontrando que el sistema se encuentra con condiciones adecuadas. Sin embargo, se observaron algunos inconvenientes en la tubería y abastecimiento de la unidad de tratamiento. Entre los problemas encontrados están:

- Diámetro de abastecimiento con suficiencia hidráulica, pero propensa a obstrucciones por las características de las aguas residuales, causando un suministro discontinuo.
- Regulación de caudal por medio de válvula, ocasionando un lugar propenso a taponamiento y tamizaje no deseado.
- Tubería de extracción de lodos instalada a contrapendiente y longitud de 2,5 metros, dificultando la salida de los lodos.

3.5. Medición de parámetros

Para la determinación de los parámetros de estudio se realizaron mediciones en el lugar y en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Doctora Alba Estela Tabarini Molina, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, bajo los procedimientos normados para cada uno de los parámetros.

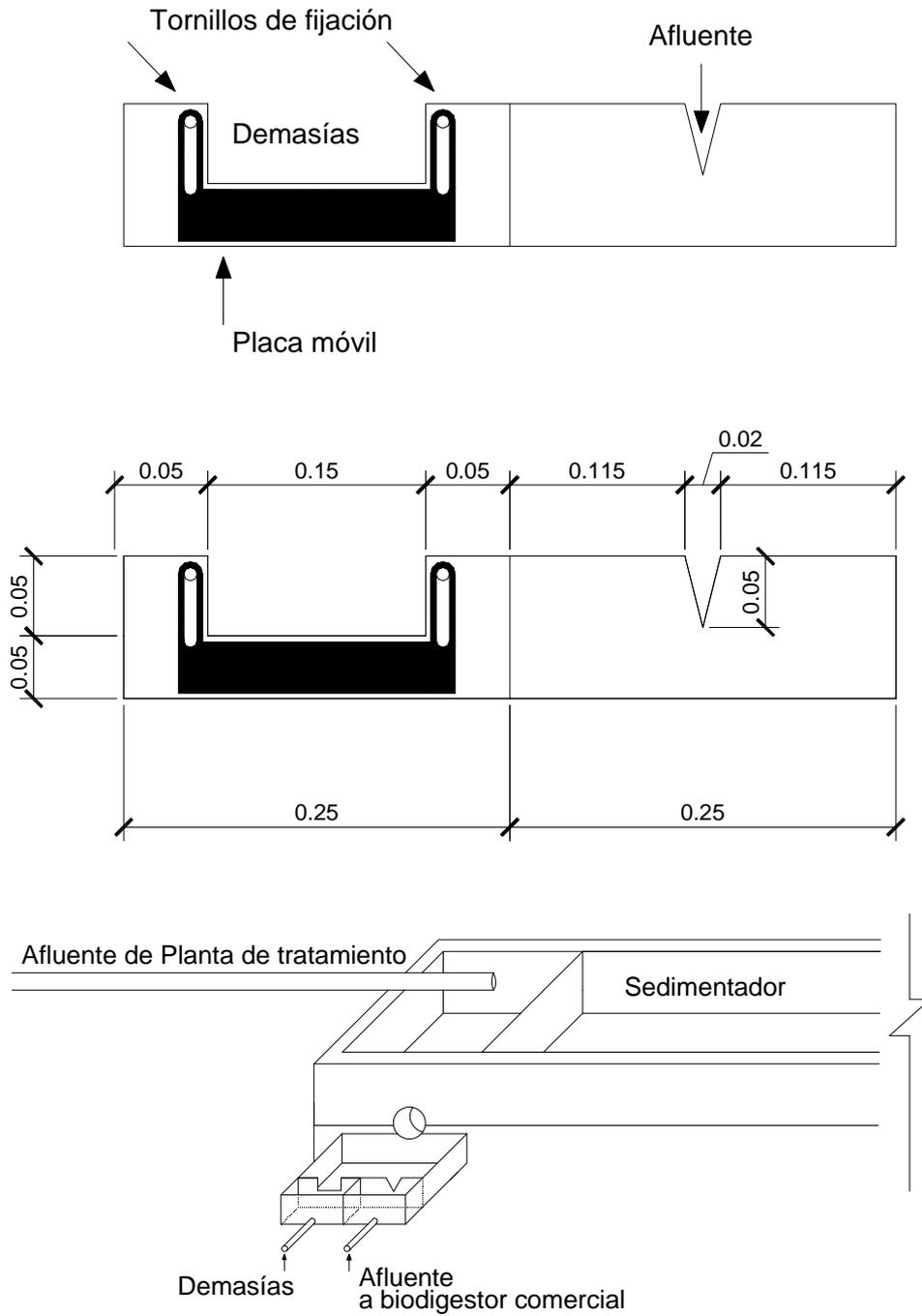
3.6. Modificación de las condiciones físicas

Luego de la evaluación del sistema y condiciones encontradas, se optó por cambiar el abastecimiento de las aguas residuales, así como la tubería de conducción del afluente, dejando el abastecimiento y regulación de caudal en un vertedero triangular. El vertedero presentó en campo y operación las siguientes ventajas:

- Regulación adecuada de caudal.
- Disminución del impacto de la variación del caudal horario, debido a que existe una relación de 1 a 20 entre el vertedero de abastecimiento y el vertedero de salida de demasías, obteniendo con ello un caudal estable.
- Fácil acceso para la remoción de objetos que obstruyan el vertedero.
- Verificación a simple vista de continuidad de caudal.

El vertedero fue construido de fibra de vidrio, con base en las dimensionales y esquemas siguientes:

Figura 7. Esquema de vertedero

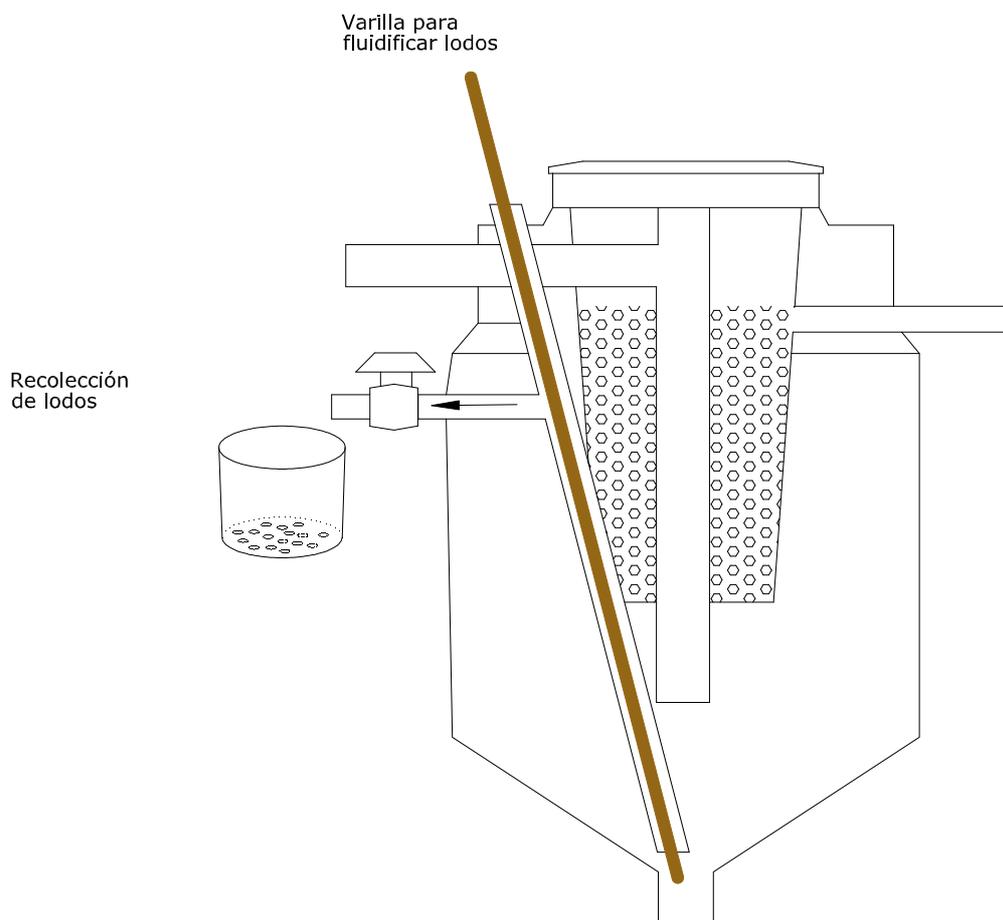


Fuente: elaboración propia.

3.7. Extracción y determinación de lodos

La extracción y determinación de lodos generados, luego de cinco años de funcionamiento, se realizó atendiendo a las recomendaciones del fabricante y esquematizada en la siguiente figura.

Figura 8. Extracción de lodos



Fuente elaboración propia.

4. Resultados

Al tener en cuenta los objetivos de la investigación se realizó un monitoreo bajo condiciones originales, siendo estos los muestreos número 1 al 8 y los muestreos número 9 al 14, que obedecen a la modificación de las condiciones físicas e instalación de vertedero para la regulación de caudal. Así también se realizaron mediciones complementarias de fósforo y oxígeno disuelto, siendo estos los muestreos número 15 y 16. La medición de los parámetros en estudio se presenta en las siguientes tablas:

Los resultados y datos estadísticos son presentados de manera individual, de acuerdo a sus objetivos se identificaron de la siguiente manera: eficiencia de remoción luego de cinco años de actividad, análisis comparativo de eficiencia inicial y eficiencia a cinco años de funcionamiento y eficiencia de la unidad de tratamiento sometida a distintos caudales.

Tabla XII. **Resultados de caudal, temperatura y sólidos sedimentables**

Muestreo No.	Toma de Muestras		Caudal Instantaneo	Temperatura		Sólidos sedimentables		
	Fecha	Hora		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Remoción
			m3/dia	°C		ml		
1	07/09/11	09:30	--	--	--	3	0	100 %
2	08/09/11	09:18	1,929.75	23.5	21	7.5	0	100 %
3	09/09/11	09:47	1,210.70	23	21	4	0	100 %
4	21/09/11	09:37	821.08	23	20	1.5	0.3	80 %
5	22/09/11	09:18	1,021.94	22	19	1.5	0.5	67 %
6	23/09/11	09:20	936.35	23	21	6.5	0	100 %

Continuación de la tabla XIII.

Muestreo No.	Toma de Muestras		Caudal Instantaneo	Temperatura		Sólidos sedimentables		
	Fecha	Hora		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Remoción
			m3/dia	°C		ml		
7	28/09/11	09:25	997.80	23	21	2.5	0	100 %
8	29/09/11	08:45	788.71	23	20	2.5	0	100 %
Promedio			1,100.90	22.93	20.43	3.63	0.10	93.33 %
9	14/03/12	09:10	3,041.28	23	19	2	0.3	85 %
10	15/03/12	09:16	2,715.43	20	18	5	0.1	98 %
11	16/03/12	09:01	2,568.65	23	20	2.5	0	100 %
Promedio			2,775.12	22.00	19.00	3.17	0.13	94.33 %
12	18/04/12	09:18	3,879.18	23	21	3.5	0.5	86 %
13	19/04/12	09:08	3,586.42	23	19	4	0.2	95 %
14	20/04/12	08:56	3,960.00	23	21	3	0.4	87 %
Promedio			3,808.53	23.00	20.33	3.50	0.37	89.13 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados de sólidos suspendidos totales y pH**

Muestreo No.	Fecha	Sólidos suspendidos totales			ph	
		Entrada	Salida	Remoción	Entrada	Salida
		mg/l			unidades	
1	07/09/11	432.00	116	73 %	6.39	7.05
2	08/09/11	366.00	34	91 %	7.37	7.03
3	09/09/11	450.00	26	94 %	7.43	6.95
4	21/09/11	456.00	68	85 %	7.59	7.00
5	22/09/11	338.57	60	82 %	7.53	6.91
6	23/09/11	576.00	30	95 %	7.53	6.96

Continuación de la tabla XVI.

Muestreo No.	Fecha	Sólidos suspendidos totales			ph	
		Entrada	Salida	Remoción	Entrada	Salida
		mg/l			unidades	
7	28/09/11	354.00	20	94 %	7.41	6.98
8	29/09/11	390.00	32	92 %	7.49	6.97
Promedio		420.32	48.30	88.29 %	7.34	6.98
9	14/03/12	506.25	41	92 %	7.64	7.18
10	15/03/12	546.00	34	94 %	7.82	7.29
11	16/03/12	710.53	47	93 %	7.78	7.26
Promedio		587.59	40.67	93.02 %	7.75	7.07
12	18/04/12	167.22	60	64 %	7.46	7.20
13	19/04/12	148.40	55	63 %	7.38	7.18
14	20/04/12	172.11	55	68 %	7.64	7.21
Promedio		162.58	56.38	65.21 %	7.49	7.20

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Resultados de DQO y DBO₅

Muestreo No.	Fecha	DQO			DBO ₅		
		Entrada	Salida	Remoción	Entrada	Salida	Remoción
		mg/l			mg/l		
1	07/09/11	550	241	56.18 %	272.67	121.33	55.50 %
2	08/09/11	418	188	55.02 %	234.67	134.00	42.90 %
3	09/09/11	522	138	73.56 %	231.33	126.67	45.24 %
4	21/09/11	368	165	55.16 %	194.00	68.67	64.60 %
5	22/09/11	360	221	38.61 %	211.33	135.33	35.96 %
6	23/09/11	620	183	70.48 %	264.67	133.33	49.62 %

Continuación de la tabla XV.

Muestreo No.	Fecha	DQO			DBO5		
		Entrada	Salida	Remoción	Entrada	Salida	Remoción
		mg/l			mg/l		
7	28/09/11	379	163	56.99 %	160.00	23.33	85.42 %
8	29/09/11	351	173	50.71 %	142.67	66.67	53.27 %
Promedio		446.00	184.00	57 %	213.92	101.17	54.07 %
9	14/03/12	620	295	52.42 %	133.33	80.00	40.00 %
10	15/03/12	520	239	54.04 %	208.00	120.00	42.31 %
11	16/03/12	560	288	48.57 %	234.00	149.33	36.18 %
Promedio		566.67	274.00	52 %	191.78	116.44	39.50 %
12	18/04/12	470	290	38.30 %	218.00	164.00	24.77 %
13	19/04/12	593	312	47.39 %	245.00	182.00	25.71 %
14	20/04/12	436	296	32.11 %	236.00	179.00	24.15 %
Promedio		499.67	299.33	39.26 %	233.00	175.00	24.88 %

Fuente: elaboración propia

Tabla XV. **Resultados de oxígeno disuelto y fósforo total**

Muestreo No.	Fecha	Hora	Caudal m ³ /d	Oxígeno disuelto mg/l			Fósforo total mg/l		
				Entrada	Salida	Disminución	Entrada	Salida	Remoción
15	20/06/12	09:30	1.82	1.57	1.38	12.10 %	5.7	5.6	1.75 %
16	22/06/12	10:20	1.81	1.14	1.08	5.26 %	5.8	5.6	3.45 %

Fuente: elaboración propia.

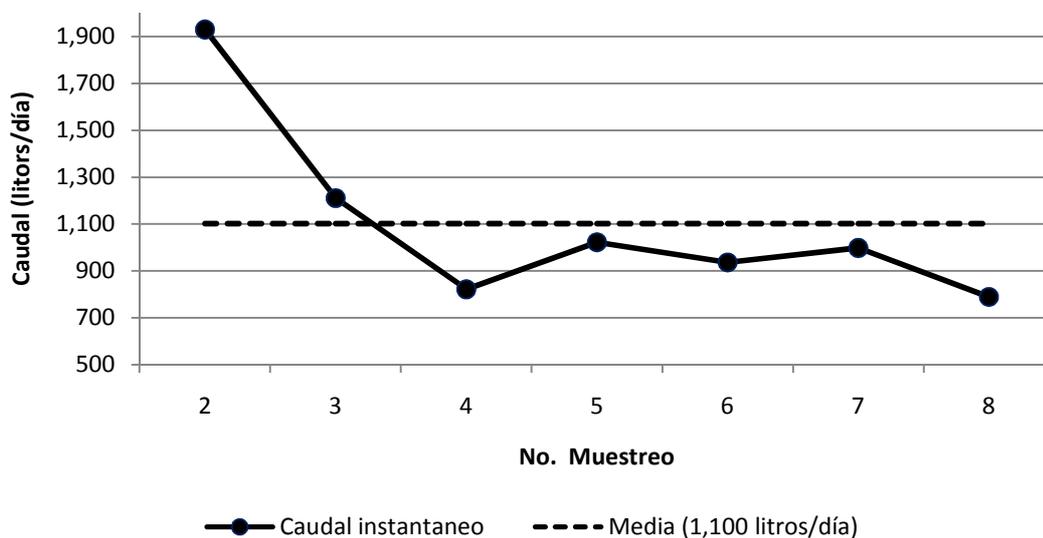
4.1. Resultados para la determinación de la eficiencia luego de cinco años de funcionamiento del biodigestor comercial

Para esta evaluación se toman en cuenta los muestreos número 1 al 8 realizado durante el periodo del 7 de septiembre del 2009 al 29 de septiembre del 2011, tiempo en el cual, el caudal y las condiciones físicas del biodigestor comercial permanecieron constantes.

4.1.1. Variación del caudal

Existió una variación del caudal en el proceso de muestreo, teniendo un pico máximo en la muestra número 2, esto a pesar de realizarse en los días y horas en donde el caudal presenta un comportamiento homogéneo

Figura 9. Variación de caudal (condiciones originales)

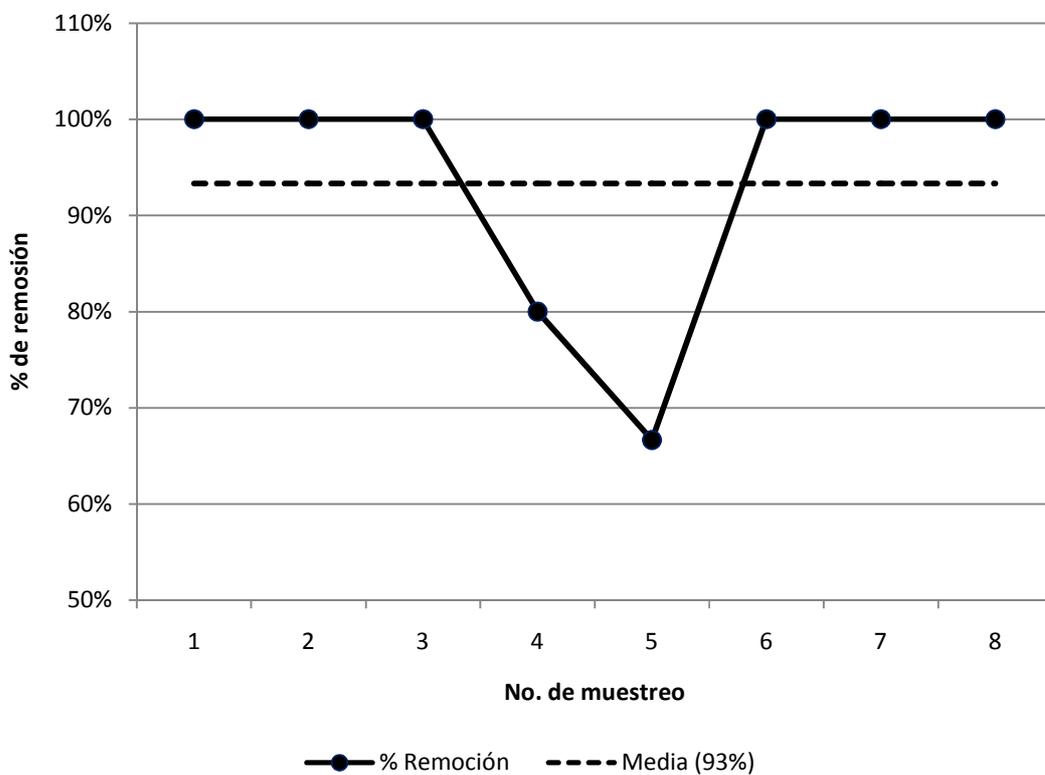


Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Sólidos sedimentables

La eficiencia de remoción sólidos sedimentables presentó un comportamiento irregular en las muestras 4 y 5, tal como se puede observar en el gráfico posterior y una eficiencia media del 93 %.

Figura 10. Remoción de sólidos sedimentables

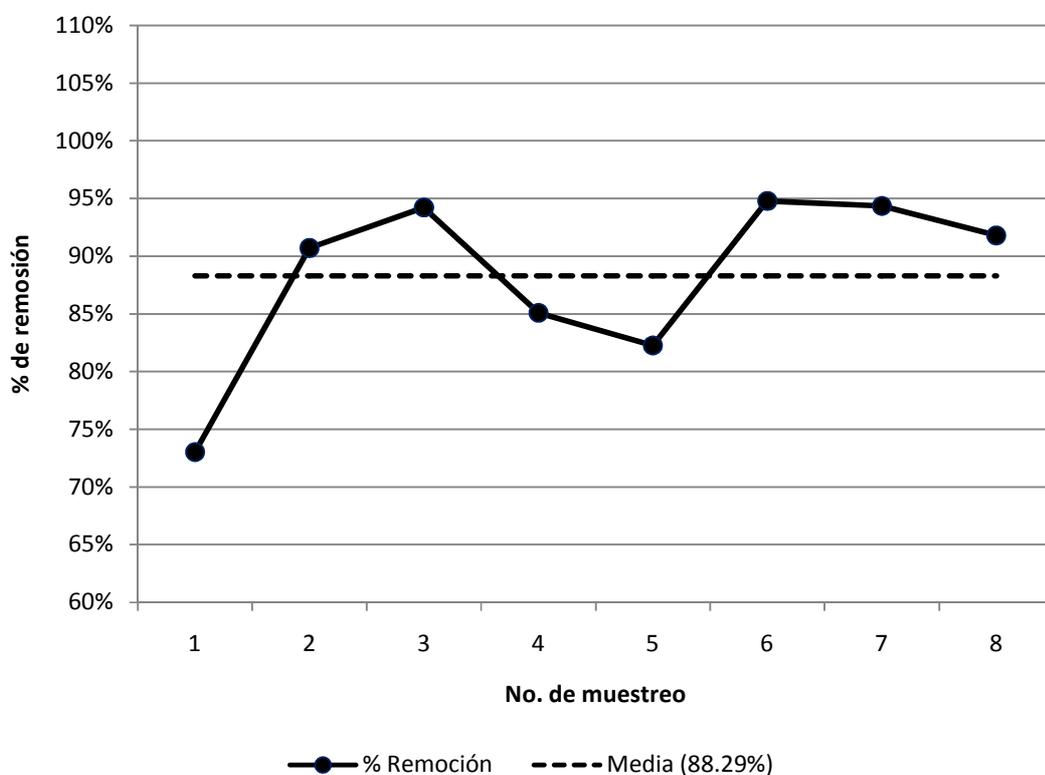


Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Sólidos totales en suspensión

La eficiencia de remoción de sólidos totales en suspensión presenta un comportamiento regular, con una eficiencia media de 88.29 % con mínimos cercanos a 70 % y máximos cercanos al 98 %.

Figura 11. Remoción de sólidos totales en suspensión

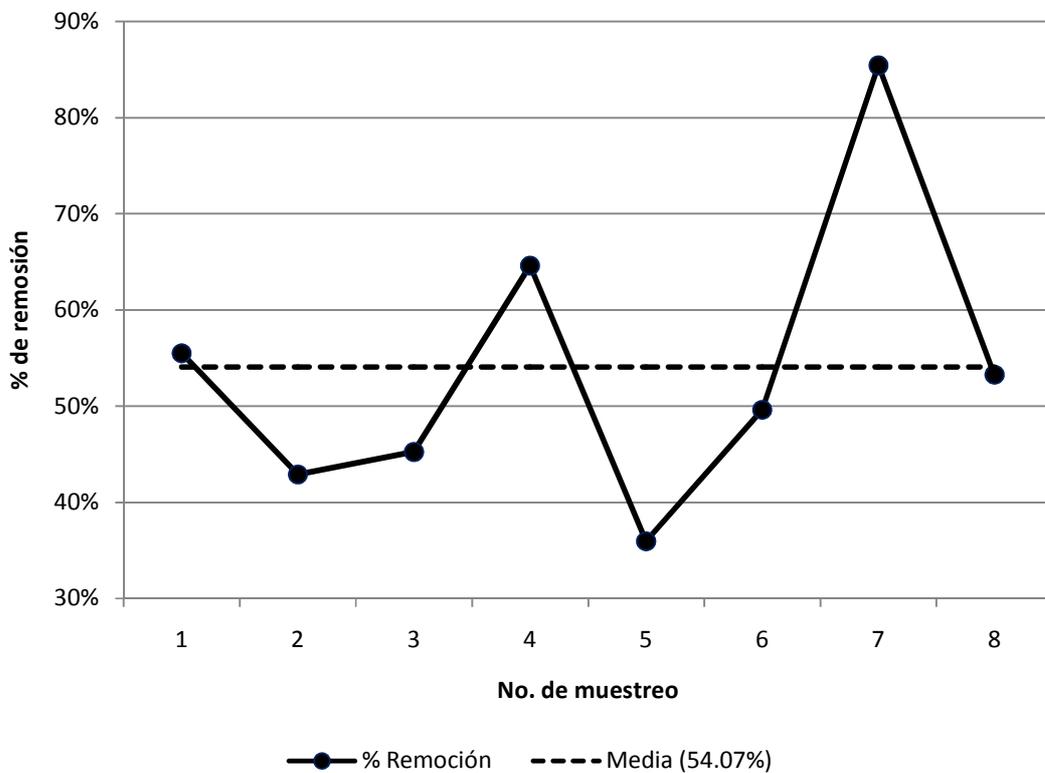


Fuente: elaboración propia.

4.1.4. Remoción de DBO₅ y DQO

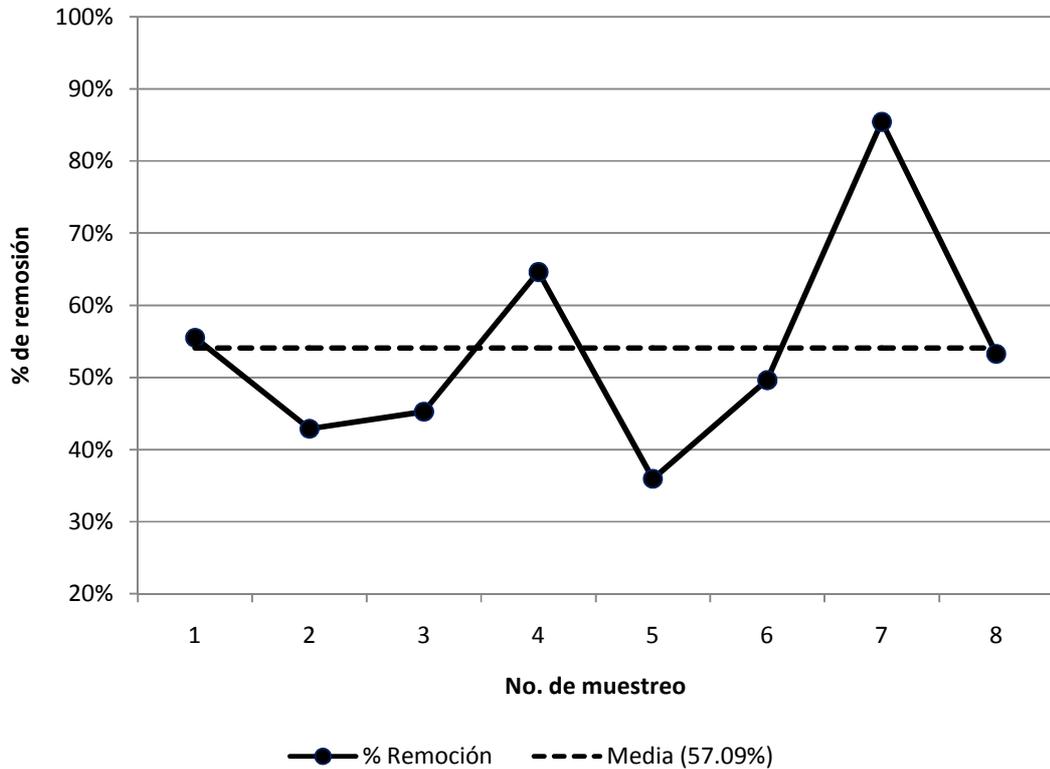
Tal como se puede observar en las figuras 12 y 13, existe una correlación entre la eficiencia de remoción de la DBO₅ y la DQO, con una remoción media del 54.07 % y 57.09 % respectivamente.

Figura 12. Remoción de DBO₅



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Remoción de DQO

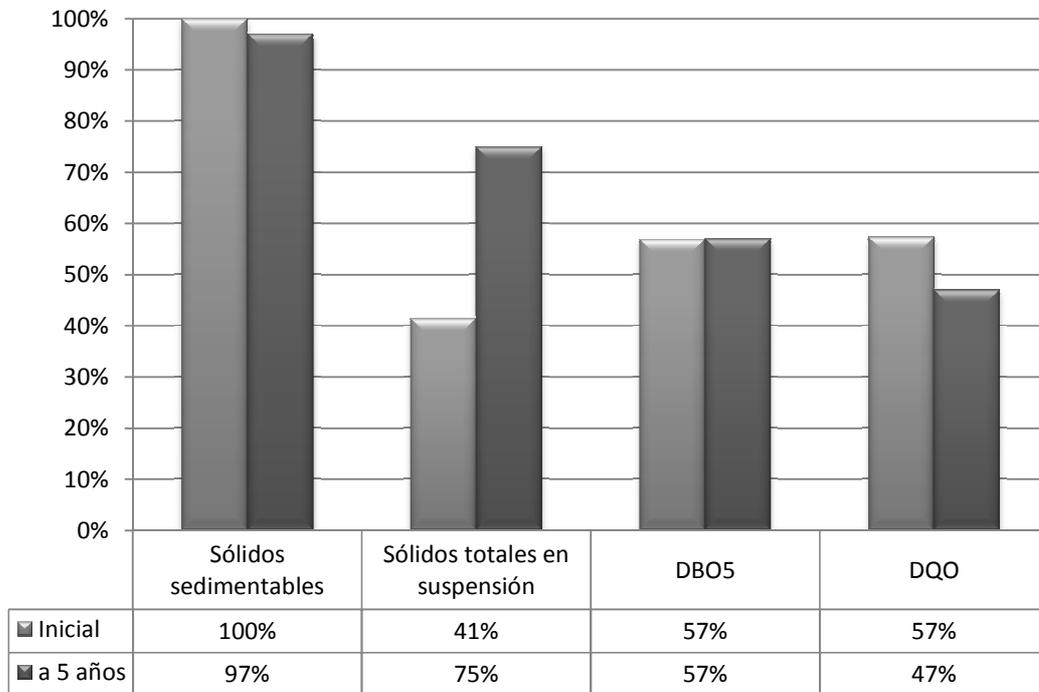


Fuente: elaboración propia.

4.2. Comparación de eficiencia inicial y eficiencia a cinco años de funcionamiento

Los resultados obtenidos en el periodo inicial en *Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales*, contenidos en tablas X, XI y XII y los resultados de esta investigación en las tablas XIV, XV y XVI, se presentan en el gráfico siguiente:

Figura 14. Evolución de la eficiencia de la unidad de tratamiento



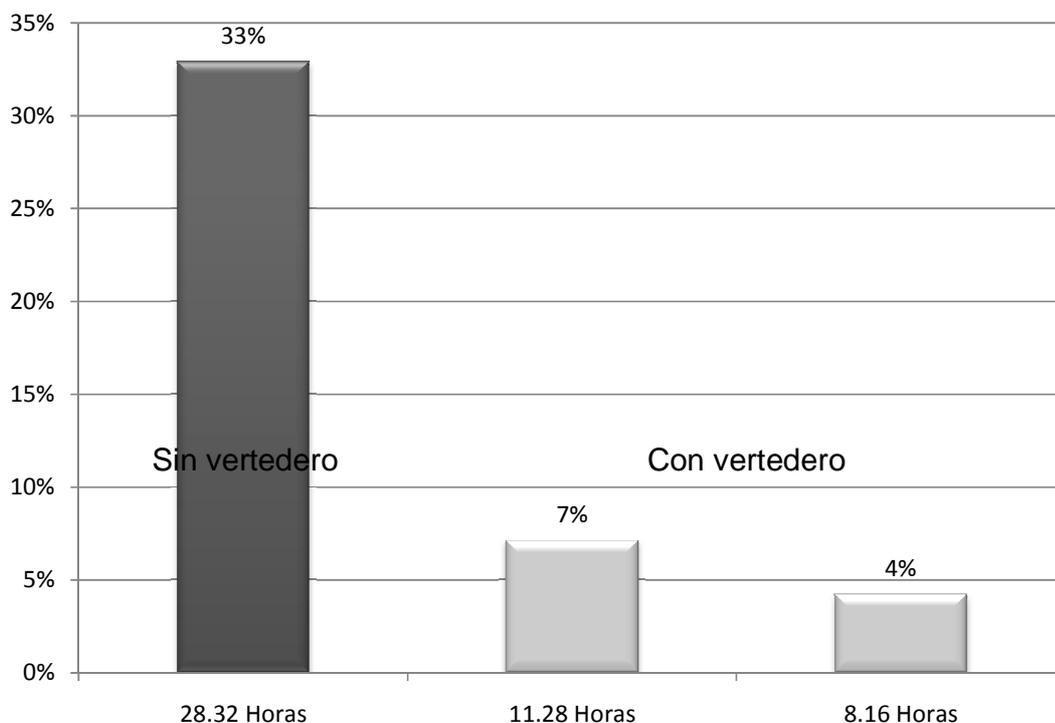
Fuente: elaboración propia.

4.3. Resultados de la determinación del funcionamiento del biodigestor comercial a diferentes caudales

4.3.1. Regulación de caudal

Se evaluó la variación de caudal sin vertedero en las muestras 1 al 8 y luego de la instalación del vertedero descrito en la sección 3.6, condición que se registró en las muestras 9 al 14 teniendo los siguientes resultados:

Figura 15. Desviación estándar de caudales



Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Eficiencia de la unidad de tratamiento a diversos periodos de retención

Se sometió el biodigestor comercial a diferentes caudales (periodos de retención), para evaluar el caudal de eficiencia optima de la unidad de tratamiento. Este proceso se realizó mediante la regulación del caudal por medio del vertedero instalado con éste fin, dejando funcionar la unidad por una semana, concluyendo éste período fue evaluada la unidad.

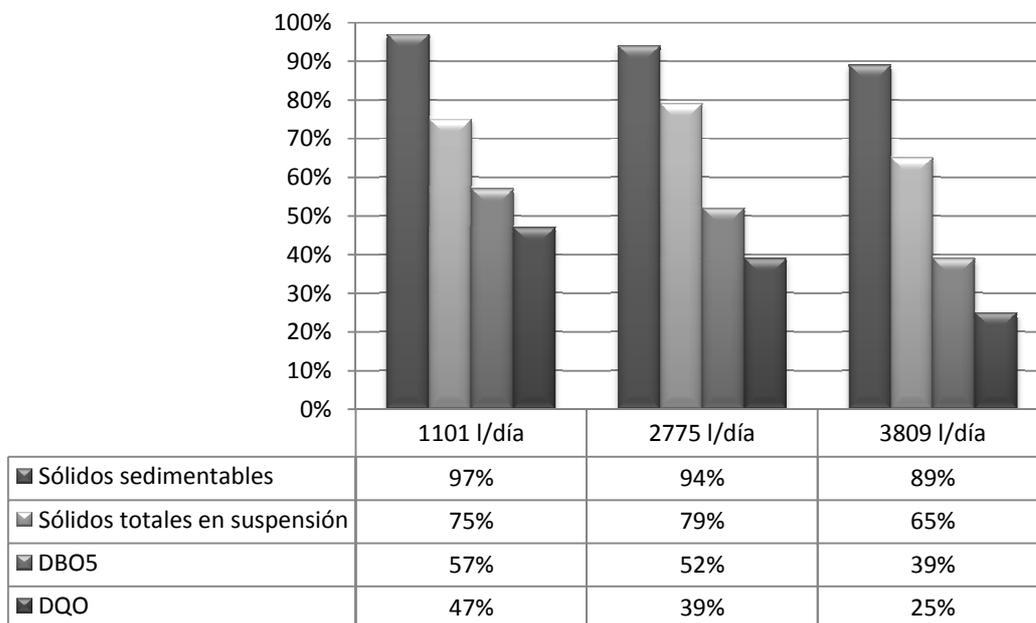
Tabla XVI. Caudal, periodo de retención y muestreos

Caudal	Periodo de Retención	Muestreos
1101 l/día	28.32 Horas	1 a 8
2775 l/día	11.28 Horas	9 a 11
3809 l/día	8.16 Horas	12 a 14

Fuente: elaboración propia.

Al relacionar las tablas XV, XVII y XVII se tienen las eficiencias mostradas en la figura siguiente.

Figura 16. Eficiencia de la unidad de tratamiento a diversos periodos de retención



Fuente: elaboración propia.

4.4. Determinación de lodos generados

Según indicaciones del personal de mantenimiento de la planta de tratamiento, en ocasiones anteriores se realizaron en el biodigestor comercial varias pruebas para la extracción de lodos, sin embargo, ninguna de ellas fue exitosa, se temió una obstrucción del sistema.

Una vez realizados los análisis para la determinación de la eficiencia del biodigestor, se procedió a la extracción de lodos, atendiendo a las recomendaciones realizadas por el fabricante y representada en la figura 17, se observa inicialmente una expulsión mínima de lodos, luego mediante la utilización de un bolillo de madera para la fluidificación de los lodos depositados y finalmente la extracción de lodos de consistencia viscosa.

Figura 17. Extracción de lodos



Fuente: Biodigestor comercial instalado en la planta de tratamiento Ing. Arturo Pazos Sosa.

Al iniciar el proceso de extracción de lodos se determinó que la longitud y pendiente de la tubería de extracción de estos, no contribuía con la extracción eficaz del mismo, por lo que se redujo la tubería a 0,50 metros.

Se utilizó un recipiente para la contención de lodos, el cual tenía una capacidad volumétrica de 21 litros y un agujero general con un volumen de 72 litros se procedió a la extracción del lodo. El resultado es la generación de 15 litros de lodos digeridos (olores poco ofensivos), viscoso, debido a ello su extracción fue difícil.

5. Discusión de resultados

5.1. Determinación de la eficiencia luego de cinco años de funcionamiento del biodigestor comercial

La eficiencia de la unidad se estableció con la medición de cada una de las variables definidas en los objetivos, estableciendo la relación entre los periodos inicial y a cinco años de funcionamiento del biodigestor. El comportamiento de cada una de las variables es discutido a continuación.

5.1.1. Variación de caudal

Debido a que el abastecimiento a la unidad se realizaba por medio de rebalse, existió una variación del caudal influenciado por el comportamiento del afluente, así como una regulación inadecuada, presentando una variación en el abastecimiento de la unidad del 33 % (362,28 litros/día) a un caudal medio de 1 100 litros/día, por lo que se procedió a las mejoras en el abastecimiento y regulación de caudal por medio del vertedero de regulación descrito anteriormente, pasando de una desviación estándar del 33 % a una mejora en la desviación estándar del 7 % y 4 % de variación de caudal regulado.

5.1.2. Sólidos sedimentables

Se tiene una eficiencia media del 92 % en la remoción de sólidos sedimentables, observando en los muestreos 4 y 5 una disminución de su eficiencia, debida al desprendimiento de “costras de capa biológica formadas a través de los aros del filtro”, tal como lo indica el fabricante. La apariencia de este material no sedimentado presente en los datos del afluente de los

muestras 4 y 5 es de un material aglutinado, flotante, de color blanquecino, similar al contenido en los aros PET del filtro. Esta materia orgánica desprendida afecta no solamente a este parámetro, sino también tiene repercusiones en la eficiencia de remoción de todos los parámetros evaluados.

5.1.3. Sólidos totales en suspensión

En este parámetro se determinó una eficiencia media de remoción del 75 % con una desviación estándar del 14 %. Esta eficiencia presenta una carga de sólidos en suspensión media de 38 mg/l, cumpliendo la normativa vigente de 100 mg/l.

5.1.4. Remoción de DBO₅

La reducción en la demanda biológica de oxígeno a cinco días, en el efluente de la unidad de tratamiento presenta una eficiencia media de remoción del 47 % (DBO₅ de efluente: 126,86 mg/l) con 9 % de desviación estándar, quedando por debajo del 60 % de remoción ofertado por el fabricante.

5.1.5. Remoción de DQO

Respecto a la remoción de demanda química de oxígeno, esta se estableció en 57 % (DQO de efluente: 175.86 mg/l) con una desviación estándar de 11 %, la normativa guatemalteca contempla el valor máximo en 250 mg/l para la primera etapa, cuya fecha máxima de cumplimiento se establece el 2 de mayo del 2015, incumpliendo para la etapa dos que establece un valor máximo de 100 mg/l.

5.1.6. Comparación de eficiencia teórica y práctica

De acuerdo a la tabla VIII Eficiencia teórica de unidades de tratamiento y Eficiencia inicial del biodigestor. El biodigestor comercial presenta una similitud con las eficiencias máximas teóricas de una fosa séptica, quedando por debajo de lo indicado por el fabricante.

5.2. Eficiencia inicial y eficiencia a cinco años de funcionamiento

La eficiencia inicial y a cinco años de funcionamiento presenta un comportamiento similar la DBO₅, los sólidos sedimentables presenta una leve disminución en su eficiencia media, debido a que existen desprendimientos ocasionales de la capa biológica adherida sobre los anillos PET, modificando su eficiencia media. Hay un mejor comportamiento a cinco años plazo de la remoción de sólidos totales en suspensión, pasando de un 41 % a 75 %, esto puede atribuirse al crecimiento de la capa biológica en el filtro percolador, que atrapa los sólidos en suspensión. Respecto a la DQO, existe una disminución en su remoción del 10 %, sin embargo, este parámetro queda dentro de la desviación estándar del 11 %, puede estar dentro de la variación normal de su eficiencia.

5.3. Eficiencia de la unidad de tratamiento a diversos periodos de retención

La eficiencia de la unidad sometida a distintos caudales (tabla XVII *Caudal, periodo de retención y muestreos*) presenta un comportamiento de eficiencia, distinto en cada caudal analizado.

De acuerdo con la normativa vigente para la República de Guatemala y para los distintos caudales estudiados, se establece que el tratamiento de las

aguas residuales por medio del biodigestor cumple con los límites permisibles, exceptuando la DQO, en donde la unidad de tratamiento analizada cumple únicamente con la primera fase (menor a 250 mg/l) en el caudal de diseño, no así en los caudales modificados, por tanto si no existe una unidad de tratamiento posterior a la unidad evaluada que permita la remoción de carga orgánica, el biodigestor no puede ser operado a un periodo de retención inferior a doce horas.

5.4. Determinación de lodos generados

El proceso realizado fue durante un periodo de una hora, extrayendo en los primeros 15 minutos un volumen no mayor a dos litros, con lodos de una viscosidad moderada. Se inició la acción de fluidificación con un rodillo de madera mediante acción de inmersión y sustracción, de esta manera los lodos viscosos que se encuentran en la tubería y en el fondo de la unidad empezaron a ser arrojados y no es hasta después de 30 minutos de realizada ésta acción, que se puede observar la expulsión del lodo fluidificado.

Los resultados obtenidos pueden presentar variación, debido a que la unidad, como ya se ha mencionado antes, presentaba condiciones de funcionamiento intermitente y tamizaje previo no deseado, por lo que no puede tomarse como un hecho concluyente luego de cinco años de funcionamiento.

Conclusiones

1. Luego de cinco años de funcionamiento (sin extracción de lodos) el biodigestor comercial presenta una eficiente remoción de contaminantes, con una remoción de sólidos y materia orgánica (SST del 75 % y DBO₅ con el 57 % de eficiencia), esto a un caudal tratado de 1,100 litros/día.
2. La unidad de tratamiento, pese a no contar con una extracción de lodos durante los cinco años de funcionamiento, presenta tasas de eficiencia similares a las de su etapa inicial, de tal manera que el volumen ocupado por los lodos digeridos, y la disminución de tiempo de retención (por disminución de volumen útil) afecta de manera residual y es compensado por el crecimiento de microorganismos en el filtro de la unidad.
3. La unidad de tratamiento luego de cinco años de funcionamiento, demuestra que la eficiencia de remoción de contaminantes no es constante, se ve interrumpida por el desprendimiento del exceso de la capa biológica del filtro percolador.
4. El efecto de la adecuación de tubería de abastecimiento y regulación de caudal mediante el vertedero instalado es eficiente y mejora sensiblemente la continuidad del caudal regulado, ya que permite pasar de una desviación estándar del 33 % al 7 % y 4 %.

5. Los componentes del biodigestor comercial, luego de cinco años de funcionamiento continuo, presentan condiciones adecuadas para su operación previendo una durabilidad adecuada.

6. Las características físicas y la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domiciliarias, hacen del biodigestor comercial un sistema viable y sostenible para el saneamiento descentralizado, en especial en zonas periurbanas y áreas rurales, en donde los sistemas de centralización de las aguas residuales por medio de red de drenaje y posterior tratamiento son inviables.

Recomendaciones

1. La eficiencia del biodigestor comercial, en la remoción de carga contaminante de las aguas residuales, se ve afectada por el desprendimiento del exceso de la capa biológica del filtro anaerobio, situación que disminuye de manera puntual su eficiencia, por tanto se debería dotar a la unidad de un sedimentador secundario que permita la retención de este material desprendido.
2. La unidad de tratamiento respecto a la remoción de fósforo es residual, sin embargo, si se requiere la eliminación de nutrientes, debe complementarse el tratamiento de aguas residuales con unidades de tratamiento que cumplan con estos propósitos.
3. La densidad de elemento filtrante (envase PET) puede mejorarse mediante arreglos geométricos tal como lo sugiere *Implementación de material de desecho pet como elemento filtrante en filtros biológicos*, para poder aumentar su eficiencia.
4. Al evaluar el biodigestor luego de cinco años de funcionamiento, la acción de extracción de lodos se tiene como la menos eficiente, por lo tanto se debe indicar o proporcionar una herramienta de diámetro y longitud adecuada para la realización de esta tarea.

Bibliografía

1. AWWA; APHA; WPCF. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid, España: Díaz de Santos, 1992, 1816 p.
2. CÁCERES, Obdulio Jimmy. *Implementación de material de desecho pet como elemento filtrante en filtros biológicos*. Estudio especial de maestría en Ingeniería Sanitaria, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala: 2010. 94 p.
3. CEPIS OPS et al. *Especificaciones técnicas para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización*. Lima: CEPIS OPS 2005. 40 p.
4. COLLADO LARA, Ramon. *La depuración de las aguas residuales en pequeños núcleos. Situación actual, compromisos y alternativas*. Universidad de Cantabria: 1992. 11 p.
5. CRITES, Ron, *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Colombia: McGraw-Hill. 2000. 1082 p.
6. GRAJEDA, Celia *Utilización de biodigestor clarificador de resina de polietileno de alta durabilidad para tratamiento de aguas residuales*. Inédito.

7. Instituto Nacional de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Datos meteorológicos de estación INSIVUMEH Guatemala zona 13, periodo de análisis 1990 – 2011*. Guatemala: INSIVUMEH, 2012.
8. METCALF & EDDY. *Ingeniería de las aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. México: McGraw-Hill 1996, Tomo I. 461 p.
9. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Acuerdo Gubernativo 236-2 006, Guatemala: Tipografía Nacional, 24 p.
10. MUCH SANTOS, Zenon. *Química y microbiología sanitaria. Manual de Laboratorio. Curso de maestría en Ingeniería Sanitaria*. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala: 2005. 25 p.
11. ORTIZ CASTILLO, Edwin. *Evaluación del tratamiento primario, secundario e investigación del tratamiento terciario por fitodepuración en la remoción de nutrientes y descarga microbiológica en la planta piloto de tratamiento de agua residual domestica Aurora II, "Ingeniero Arturo Pazos Sosa" posterior a la Rehabilitación*. Estudio especial de Maestría en ingeniería Sanitaria, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala: 2003,.

12. ROJAS, Ricardo, *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales, Curso internacional de Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*. Brasil: CEPIS/OPS-OMS 1 999, 2002, 19 P.
13. SANTIZO BARRIOS, Celestino F. *Determinación del caudal de aguas servidas de la colonia Militar Aurora, zona 13*. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1990.
14. SOLARES CASTILLO, Marvin. *Certificación de la norma ISO 14000 para una planta de tratamiento de aguas negras*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 75 p.