



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Tecnología de la Construcción

Monografía

**EVALUACIÓN OPERACIONAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE LA URBANIZACIÓN GRUTA XAVIER, CIUDAD SANDINO,
MANAGUA.**

Para optar al título de Ingeniero Civil

Elaborado por

Br. Milton Alexander Rivera Torres

Tutor

MSc. Ing. María Elena Baldizón Aguilar

Managua, septiembre 2018

El presente documento está especialmente dedicado a mi familia, la cual me ha apoyado incondicionalmente en todos los proyectos que he llevado a cabo a lo largo de mi vida. Todos mis logros se los debo a ellos, por su respaldo en todo momento y confianza en mis capacidades.

Ofrezco asimismo un especial agradecimiento al Ing. Luis Rivera, Ing. Roland Montenegro e Ing. Edwing Sandoval, por haberme brindado conocimientos técnicos de mucha importancia para el presente documento.

Nicaragua

*Madre, que dar pudiste de tu vientre pequeño
tantas rubias bellezas y tropical tesoro,
tanto lago de azules, tanta rosa de oro,
tanta paloma dulce, tanto tigre zahareño.*

*Yo te ofrezco el acero en que forjé mi empeño,
la caja de armonía que guarda mi tesoro,
La peaña de diamantes del Ídolo que adoro
y te ofrezco mi esfuerzo, y mi nombre y mi sueño.*

De: Rubén Darío,

Obras poéticas completas

RESUMEN EJECUTIVO

La investigación desarrollada en el presente documento es la evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la urbanización Gruta Xavier, que se encuentra ubicada en el municipio de Ciudad Sandino, Managua, tanto desde el punto de vista operacional (Eficiencias de remoción de DBO, DQO SST y coliformes fecales), como desde el punto de vista hidráulico (Períodos de retención y cargas aplicadas de los parámetros anteriores) , el cual está estrechamente relacionado a la eficiencia operacional de la planta.

Las unidades de tratamiento de las cuales se compone la planta de tratamiento Gruta Xavier son: Reactores UASB de geometría cilíndrica y empaque de grava como separador GSL (Gas – Sólido – Líquido) y Humedal artificial de flujo superficial con paredes deflectoras.

Para el desarrollo de este proyecto se calcularon los caudales en la salida del desarenador, donde se realizaron (12) doce mediciones por día, una vez por semana, desde las 8:00 a.m. a las 7:00 p.m. por un período de 5 semanas, y se utilizó el historial de muestras compuestas de los afluentes y efluentes en cinco estaciones de muestreo de la planta de tratamiento (en la entrada general, salida general, dos reactores UASB que trabajan en paralelo y un humedal artificial de flujo superficial que se encuentra posterior al efluente de los reactores). La determinación de los análisis se hizo por medio de Laboratorio de ENACAL CENTRAL, en la ciudad de Managua, como complemento del trabajo de campo se tomaron datos in situ de temperatura del agua y ambiente y pH.

Se investigó qué tan eficientes son estas tecnologías de tratamiento cuando trabajan en serie (el efluente de los reactores UASB, que conforman el tratamiento primario, es descargado al humedal artificial de flujo superficial, que conforma el tratamiento secundario), no perdiendo de vista que el principal objetivo de una planta de tratamiento es cumplir con la normativa nacional establecida para el vertido del efluente de aguas residuales domésticas, que es, para Nicaragua, el

decreto 33 – 95. Con los resultados de este proyecto se está aportando valiosa información sobre la eficiencia de remoción de DBO, DQO SST y coliformes fecales en este sistema de tratamiento y servirá para tener en cuenta en el diseño y construcción de nuevos sistemas de tratamiento en el país.

CONTENIDO

CAPÍTULO I:	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y SISTEMA ACTUAL	6
2.1 Ubicación.....	7
2.2 Área de estudio	8
2.3 Descripción y esquema de la planta de tratamiento	8
2.3.1 Unidad de pretratamiento	8
2.3.2 Unidad de tratamiento primario	9
2.3.3 Unidad de tratamiento secundario.....	10
2.3.4 Lecho de secado para lodos	10
2.3.5 Disposición final.....	10
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	13
3.1 Las aguas residuales domésticas	14
3.2 Reactores anaerobios híbridos de flujo ascendente (RAHFA)	15
3.2.1 Ventajas y desventajas.....	16
3.3 Lecho de secado de lodos.....	16
3.4 Humedales artificiales	17
3.4.1 Tipos de humedales artificiales	18
3.4.2 Componentes de un humedal artificial	19
3.4.3 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales	23
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	27
4.1 Medición de caudal de entrada a la planta	28
4.2 Evaluación de cada uno de los elementos que componen la planta de tratamiento	28
4.2.1 Reactores UASB	28
4.2.2 Evaluación del humedal artificial de flujo superficial	31

4.2.3 Evaluación del lecho de secado de lodos.....	34
4.2.4 Análisis de eficiencia del sistema	35
CAPÍTULO V: CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	36
5.1 Cálculo del caudal de entrada a la planta.....	37
5.2 Historial de análisis de laboratorio realizados en la planta	37
5.2.1 Demanda bioquímica de oxígeno	38
5.2.2 Demanda química de oxígeno.....	39
5.2.3 Relación DQO/DBO ₅	40
5.2.4 Sólidos suspendidos totales	41
5.2.5 Coliformes fecales	42
5.2.6 Potencial de hidrogeno.....	43
5.2.7 Temperatura del agua	44
5.3 Análisis del diseño y la operación actual del sistema	45
5.3.1 Afluente	45
5.3.2 Reactores anaerobios de flujo ascendente	46
5.3.3 Lecho de secado de lodos.....	48
5.3.4 Humedal artificial de flujo superficial	49
CAPÍTULO VI: OBRAS PROPUESTAS PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO.....	52
6.1 Medidor de caudal.....	53
6.1.1 Dimensionamiento.....	53
6.1.2 Punto de medición.....	55
6.1.3 Cálculo del caudal	55
6.2 Ampliación del lecho de secado de lodos.....	56
CONCLUSIONES.....	58
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Macro localización del área de estudio: Ciudad Sandino, Managua... 7	7
Ilustración 2 Micro localización del área de estudio: Urbanización Gruta Xavier..... 8	8
Ilustración 3 Diagrama de procesos de la planta de tratamiento de Gruta Xavier.. 11	11
Ilustración 4 Detalle de medio de drenaje en lecho de secado de lodos 17	17
Ilustración 5 Ilustración 5 Humedal artificial de flujo superficial de Gruta Xavier (Con lirios acuáticos)..... 19	19
Ilustración 6 Microorganismos presentes en humedales artificiales 22	22
Ilustración 7 Remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)..... 39	39
Ilustración 8 Remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) 40	40
Ilustración 9 Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)..... 42	42
Ilustración 10 Remoción de coliformes fecales (CF) 43	43
Ilustración 11 Geometría de la Canaleta Parshall propuesta 54	54
Ilustración 12 Configuración del medio filtrante del lecho de secado propuesto ... 56	56
Ilustración 13 Arreglo de ladrillos a utilizar en la parte superior del lecho de secado 57	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Dimensiones y características de los principales componentes del sistema de Tratamiento existente.....	12
Tabla 2 Ventajas y desventajas de los tratamientos anaerobios.....	16
Tabla 3 Mecanismos de depuración predominantes en los humedales artificiales.....	23
Tabla 4 Área de influencia de mangueras de distribución en reactores UASB que operan eficientemente.....	30
Tabla 5 Parámetros de evaluación y eficiencia esperada de reactores UASB.....	31
Tabla 6 Principales parámetros de diseño y evaluación de humedales artificiales de flujo superficial.....	33
Tabla 7 Parámetros de diseño y evaluación de lechos de secado de lodos.....	34
Tabla 8 Rangos y límites máximos permisibles de efluentes de sistemas de tratamiento de alcantarillado sanitario descargado directa o indirectamente a los cuerpos receptores.....	35
Tabla 9 Caudales medidos en la PTAR Gruta Xavier.....	37
Tabla 10 Resultados históricos de DBO5.....	38
Tabla 11 Resultados históricos de DQO.....	39
Tabla 12 Resultados históricos del coeficiente de biodegradación.....	40
Tabla 13 Resultados históricos SST.....	41
Tabla 14 Resultados históricos CF.....	42
Tabla 15 Resultados históricos PH.....	43
Tabla 16 Resultados históricos temperatura del agua.....	44
Tabla 17 Características del afluente y datos iniciales de análisis.....	45
Tabla 18 Resultados de análisis hidráulico – operacional de reactores UASB de Gruta Xavier.....	47
Tabla 19 Resultados de análisis del lecho de secado de lodos de Gruta Xavier ..	48
Tabla 20 Resultados de análisis del humedal de Gruta Xavier.....	49
Tabla 21 Selección de ancho de garganta de medidor Parshall.....	53
Tabla 22 Dimensiones de la canaleta Parshall.....	53
Tabla 23 Constantes a utilizar para medir el caudal en la canaleta Parshall.....	55

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La presión que se ejerce sobre los recursos hídricos es cada vez mayor, esta se produce como consecuencia del acelerado crecimiento en los últimos años de la población y de los sectores agrícola e industrial, los cuales demandan grandes cantidades de agua para el desarrollo de sus actividades. El agua utilizada retorna a las fuentes hídricas como agua residual sin tratar en la mayoría de los casos, generando contaminación y disminuyendo la calidad de vida de las comunidades con sus consiguientes impactos, sociales y ambientales (Galvis *et al.*, 2005).

A nivel global se han desarrollado distintas alternativas de tratamiento de aguas residuales con el fin de solucionar los problemas asociados a sus descargas no tratadas, la falta de información acerca del funcionamiento, operatividad y mantenimiento de dichos sistemas; la ineficaz adaptación de éstos al entorno; y la capacidad local deficiente para su manejo, conducen a la implementación de sistemas inoperantes y al abandono de los existentes por parte de la comunidad (Villegas y Vidal, 2009).

Lo anterior ha estimulado la realización de investigaciones a partir de procesos observados en la naturaleza, que permitan diseñar proyectos alternativos para el tratamiento de aguas con menores costos de construcción, energía y explotación. Uno de estos son los humedales artificiales o “wetlands”, que replican las características y la capacidad de reciclaje de los pantanos naturales (Ñique, 2000).

Estos humedales usualmente se utilizan como tratamiento secundario, es decir, funcionan como un pulimiento del tratamiento de las aguas residuales. Se tienen registros de remoción de materia orgánica de hasta un 85% y de coliformes fecales de alrededor de un 90%.

Asimismo, el reactor UASB es una tecnología muy común en el tratamiento de aguas residuales, es utilizado como tratamiento anaerobio primario y registra

eficiencias de remoción de materia orgánica de hasta un 90% y de coliformes fecales de alrededor de un 70%.

La combinación de ambas tecnologías de tratamiento es interesante desde varios puntos de vista, principalmente la relación eficiencia – economía, ya que no son tecnologías costosas y con eficiencias bastante altas de remoción.

1.2 Antecedentes

Si bien el uso de reactores UASB y humedales artificiales de flujo superficial convencionales es bastante común para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas y medias comunidades en general en Nicaragua (Se utilizan reactores UASB en las plantas de Boaco, Jalapa, Ciudad Sandino, Granada y San Juan del Sur. Asimismo se utilizan humedales de flujo superficial en la planta de El Cocal, León), sin embargo, la combinación de ambos sistemas en específico no ha sido tan utilizado, y, considerando que los reactores UASB y el humedal artificial de flujo superficial de la urbanización Gruta Xavier presentan variantes técnicas en su dimensionamiento (Los reactores UASB de la planta de Gruta Xavier poseen una malla filtrante que funciona como separador Gas – Sólido – Líquido y además tiene forma cilíndrica, mientras que el humedal de flujo superficial posee paredes deflectoras que hacen que el recorrido del flujo sea como en un laberinto), entonces se tiene que actualmente sólo se cuenta con cuatro de este tipo en el país:

- PTAR Valle Sandino.
- PTAR Belén #1.
- PTAR Belén #2.
- ***PTAR Gruta Xavier.***

La PTAR Gruta Xavier inició operaciones en el 2013, y a partir de ese momento no se han realizado intervenciones en ella, salvo la toma de muestras para el control de calidad del efluente de la planta por el laboratorio central de ENACAL y las actividades de operación y mantenimiento, es decir, no se ha realizado ningún proceso investigativo ni ampliación al sistema.

1.3 Justificación

Una de las principales responsabilidades de todo gobierno es proveer el agua potable y el tratamiento del agua a todos los habitantes de cierta región, el servicio de agua ha aumentado con el paso de los años, pues la escasez de ésta y la sobrepoblación hacen que el vital líquido sea cada vez más caro.

Ante esta problemática el gobierno y sus municipios han adoptado nuevas formas para tratar el agua por lo que han recurrido a utilizar diversas plantas de tratamiento de agua. La finalidad de estas operaciones es obtener agua con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final. Es de vital importancia que la planta de tratamiento de aguas residuales esté trabajando en óptimas condiciones, ya que lo contrario repercutiría en el ambiente y la salud.

En las últimas décadas los sistemas naturales se han venido utilizando de forma creciente gracias a sus características de construcción y funcionamiento: su coste de inversión suele ser competitivo, requieren de poco personal para su tratamiento, no presentan consumo energético o muy reducido, y no generan grandes cantidades de lodos de forma continuada.

Al ser este país en vías de desarrollo y que cuenta con recursos limitados, se ha considerado una buena alternativa para tratar las aguas residuales. Sin embargo, actualmente sólo se tienen cuatro de este tipo, todas en la ciudad de Managua. No se cuenta con análisis de eficiencia de estas plantas de tratamiento, sin embargo, una de estas se evaluará en la presente investigación, y es muy importante conocer su comportamiento al tratarse de una atractiva tecnología potencial para la futura construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales en Nicaragua.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Analizar la eficiencia operacional de la planta de tratamiento de aguas residuales de la urbanización Gruta Xavier, Managua.

Objetivos específicos

1. Detallar el cálculo de los diferentes parámetros utilizados en el análisis de la planta de tratamiento de aguas residuales en la urbanización Gruta Xavier.
2. Comparar los parámetros calculados con los recomendados por la literatura relativa al tema.
3. Estimar una eficiencia de remoción tanto de materia orgánica (DBO₅, DQO y SST) como de coliformes fecales (CF) en base a los parámetros calculados y a la configuración geométrica de los componentes del sistema.
4. Contrastar la eficiencia esperada de remoción de materia orgánica y coliformes fecales con la normativa nacional (decreto 33 – 95).
5. Identificar fortalezas y deficiencias en el funcionamiento de la planta de tratamiento.

CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y SISTEMA ACTUAL

2.1 Ubicación

La planta de tratamiento de aguas residuales de Gruta Xavier se encuentra ubicada en el municipio de Ciudad Sandino, departamento de Managua. (Figura 1 y 2).

Ilustración 1 Macro localización del área de estudio: Ciudad Sandino, Managua.



Fuente: Google Earth

Ilustración 2 Micro localización del área de estudio: Urbanización Gruta Xavier.



Fuente: Google Earth

2.2 Área de estudio

El área de estudio está conformada por la urbanización Gruta Xavier, la cual actualmente tiene un total de 200 conexiones domiciliarias, y no se prevén ampliaciones. La urbanización cuenta con un 100% de conexiones conectadas a la red de agua potable. La distribución de tuberías de alcantarillado sanitario en la urbanización también cubre el cien por ciento de las conexiones.

2.3 Descripción y esquema de la planta de tratamiento

El proceso por el cual se tratan las aguas residuales está compuesto (figura 3) por lo siguiente:

2.3.1 Unidad de pretratamiento

Dos desarenadores en paralelo y dos sistemas de rejillas que están uno anterior y uno posterior a los desarenadores. Ambos sistemas se encargan de evitar el paso

de materiales que puedan obstruir los conductos hidráulicos, como arena, bolsas de plástico, papeles, piedras, etc.

Es importante mencionar que la planta no cuenta con un medidor de flujo construido, por lo que la medición de caudales deberá ser realizada manualmente.

2.3.2 Unidad de tratamiento primario

a) Tanque distribuidor que recibe el agua desde el desarenador y reparte el agua a los reactores.

b) Variante de reactores UASB (Reactores Anaerobios Híbridos de Flujo Ascendente “RAHFA”):

Dos variantes de reactores UASB de forma cilíndrica - cónica que funcionan en paralelo y conforman el tratamiento primario del agua residual, removiendo hasta un 90% de materia orgánica y alrededor de un 70% de coliformes fecales (menos de una unidad logarítmica). Los planos del Reactor UASB se muestra en Anexo 1.

El agua residual es introducida en la parte superior de cada reactor a través de 24 orificios, los cuales la conducen por tubos de 1 pulgada de diámetro hacia el inferior de cada reactor. Luego, el flujo asciende hasta llegar a una malla que soporta un empaque de grava, la cual esta graduada de tal manera que funcione como un filtro anaerobio y como el separador GSL de los reactores UASB convencionales, permitiendo que los lodos se asienten y sean evacuados en la parte inferior del reactor hacia el lecho de secado y el gas metano producido por los procesos anaerobios ascienda hacia la parte superior cónica donde es atrapado y conducido a través de una tubería de 1.5 plg hacia el gasómetro, donde se comprime y es dirigido hacia una antorcha donde es quemado periódicamente para así mitigar el efecto invernadero producido por estos gases (cabe mencionar que en el caso de la Planta de tratamiento de aguas residuales Gruta Xavier, el caudal tratado es pequeño, por lo tanto la cantidad de gas metano producido no es viable económicamente para ser convertido a energía eléctrica y utilizado de esa forma). El agua tratada es evacuada en la parte superior y conducida a un canal, en donde

se intercepta con el agua tratada en el reactor que está en paralelo y es conducida al humedal artificial de flujo superficial.

2.3.3 Unidad de tratamiento secundario

Ciénaga construida (o Humedal artificial de flujo superficial): Actúa como pos-tratamiento, reduciendo las concentraciones de materia orgánica hasta un 85% y coliformes fecales hasta un 90%. La variante de este humedal artificial de flujo superficial respecto de los convencionales es que este posee paredes deflectoras las cuales hacen que el flujo sea en forma de laberinto, permitiendo la existencia de un flujo pistón y remociones más altas.

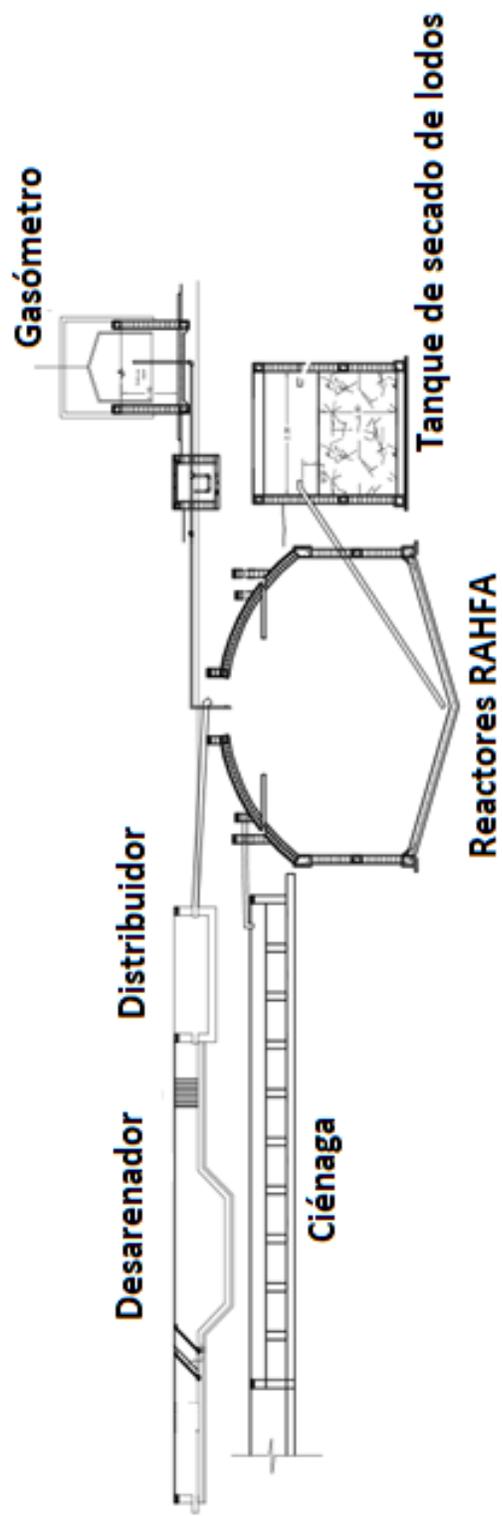
2.3.4 Lecho de secado para lodos

El lecho de secado de lodos de la urbanización Gruta Xavier se compone de dos cámaras: la cámara de lodos y la cámara de lixiviados, ambas expuestas a los rayos solares. La cámara de lodos posee un filtro de material granular de 1.50 m que permite lixiviar el agua residual, que es conducida a un tanque de lixiviados, en donde se secan por acción de los rayos solares. Asimismo, los lodos que se quedan en la parte superior de la cámara de lodos son extraídos periódicamente y pueden ser utilizados como abono orgánico.

2.3.5 Disposición final

Un emisor que conduce el agua tratada hasta el canal de descarga hacia 5 pozos de absorción.

Ilustración 3 Diagrama de procesos de la planta de tratamiento de Gruta Xavier



Fuente: Planos de la PTAR Urbanización Gruta Xavier

Las dimensiones y características de los principales componentes del sistema de tratamiento se muestran en la tabla 1:

Tabla 1 Dimensiones y características de los principales componentes del sistema de Tratamiento existente

Dimensiones y características de los principales componentes del sistema			
Componente	Característica	Unidad	Magnitud/descripción
Reactores UASB (RAHFA)	Número de reactores	-	2
	Forma general	-	Cilíndrica - Cónica
	Diámetro	m	5.54
	Área mayor (manto de lodos)	m ²	24.10
	Tirante	m	4.29
	Profundidad de la zona de sedimentación	m	0.63
	Profundidad de la zona de digestión	m	2.91
	Número de mangueras de distribución	u	24
	Volumen total de c/u	m ³	75
	Volumen útil de c/u	m ³	72
Tanque de secado de lodos	Profundidad de la capa filtrante	m	1.50
	Longitud	m	2.30
	Ancho	m	2.35
	Altura libre	m	0.31
Humedal artificial de flujo superficial	Tipo de planta	-	Lirios acuáticos
	Área superficial	m ²	150
	Tirante	m	0.35
	Volumen total	m ³	52.50
	Volumen libre de muros	m ³	44.625

Fuente: Planos de la PTAR Gruta Xavier. ENACAL.

Ver Planos de la planta de tratamiento en Anexo B y fotos en Anexo C.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 Las aguas residuales domésticas

Aguas residuales domésticas son las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades en el hogar. Los principales parámetros a través de los cuales se cuantifica el grado de contaminación de las aguas residuales domésticas (y que serán evaluados en la presente investigación) son:

- Sólidos suspendidos totales (SST): Indica la cantidad de sólidos (medidos habitualmente en miligramos por litro - mg/L), presentes, en suspensión y que pueden ser separados por medios mecánicos, como por ejemplo la filtración en vacío, o la centrifugación del líquido. Algunas veces se asocia a la turbidez del agua.
- Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO): Es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar totalmente la materia orgánica biodegradable que se encuentre en la muestra (se mide en miligramos por litro - mg/L).
- Demanda química de Oxígeno (DQO): Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente (generalmente con permanganato potásico o con dicromato potásico en medio ácido) toda la materia orgánica que se pueda encontrar presente en la muestra (se mide en miligramos por litro – mg/L)
- Coliformes fecales (CF): Tradicionalmente se los ha considerado como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua destinada al consumo humano en razón de que, en los medios acuáticos, los coliformes son más resistentes que las bacterias patógenas intestinales y porque su origen es principalmente fecal. Por tanto, su ausencia indica que el agua es bacteriológicamente segura.

Asimismo, su número en el agua es directamente proporcional al grado de contaminación fecal; mientras más coliformes se aíslan del agua, mayor es la gravedad de la descarga de heces.

3.2 Reactores anaerobios híbridos de flujo ascendente (RAHFA)

El RAHFA es un reactor semi-empacado que combina las características y ventajas de dos de los procesos de digestión anaerobia: el manto de lodos (UASB) y el filtro anaerobio, pero principalmente funciona hidráulicamente como una variante del UASB.

. En este digester existen 3 zonas bien definidas. Las zonas son:

- Zona de lecho de lodos, en la cual se concentran los microorganismos que van a biodegradar el material orgánico presente en el agua residual a tratar.
- Zona donde se encuentran dispersos los microorganismos a lo largo del reactor.
- Zona de separación gas - líquido - sólido.
- Zona de sedimentación, en donde se produce el asentamiento de los sólidos nuevamente hacia el fondo del reactor y el agua tratada es sacada por la parte superior del reactor, así como el gas metano es atrapado en la parte superior para ser conducido hacia el gasómetro, ser comprimido y quemado.

En este proceso, el residuo que se quiere tratar se introduce por la parte inferior del reactor. El agua residual fluye en sentido ascendente a través de un manto de lodos constituido por gránulos o partículas formadas biológicamente. El tratamiento se produce al entrar en contacto el agua residual y el lodo microbiológico. Los gases producidos en condiciones anaeróbicas (principalmente metano y dióxido de carbono) provocan una circulación interior, que colabora en la formación y mantenimiento de los gránulos. Parte del gas generado dentro del manto de lodos se adhiere a las partículas biológicas. Tanto el gas libre como las partículas a las que se ha adherido gas, ascienden hacia la parte superior del reactor. Allí se produce la liberación del gas adherido a las partículas, al entrar éstas en contacto con una parrilla que soporta un empaque de piedra. El agua al golpear con el lecho de piedra inicia un cambio de fase, los lodos se sedimentan de nuevo, y el gas producido pasa al sistema de recolección.

3.2.1 Ventajas y desventajas

En la tabla 2 se resumen tanto las ventajas como las desventajas del tratamiento anaerobio.

Tabla 2 Ventajas y desventajas de los tratamientos anaerobios.

		Ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio
Ventajas	<input type="checkbox"/>	Se requiere menor energía.
	<input type="checkbox"/>	Menor producción de lodos.
	<input type="checkbox"/>	Menor cantidad de nutrientes requeridos.
	<input type="checkbox"/>	Producción de metano, fuente potencial de energía.
	<input type="checkbox"/>	Menor volumen de los reactores.
	<input type="checkbox"/>	Con aclimatación, se pueden transformar una mayor cantidad de compuestos.
	<input type="checkbox"/>	Rápida respuesta a la adición de sustrato después de largos períodos sin alimentarse.
Desventajas	<input type="checkbox"/>	Largos períodos de arranque.
	<input type="checkbox"/>	Puede requerir tratamientos posteriores para alcanzar la normatividad.
	<input type="checkbox"/>	No es posible la remoción de fósforo y nitrógeno.
	<input type="checkbox"/>	Son más sensibles a los efectos adversos de las bajas temperaturas en las tasas de reacción.
	<input type="checkbox"/>	Son susceptibles de perturbarse debido a sustancias tóxicas.
	<input type="checkbox"/>	Potencial producción de olores y gases corrosivos.

Fuente: Metcalf & Eddy (2003)

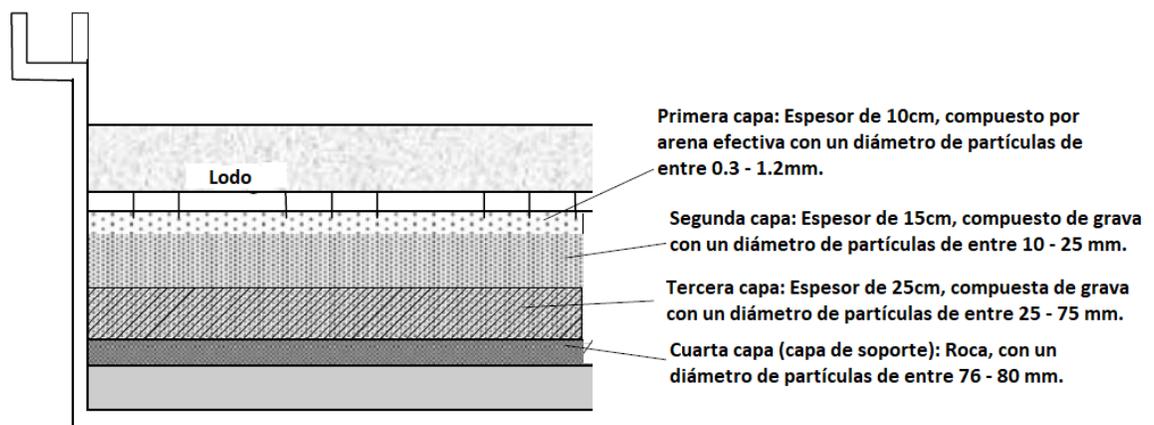
3.3 Lecho de secado de lodos

Los lechos de secado de lodos se utilizan para estabilizar los lodos producidos por el tratamiento anaerobio, en él, el agua es removida por evaporación y percolación. El proceso consiste en un tanque, usualmente de paredes de mampostería o concreto y piso de concreto. Dentro del tanque los siguientes elementos permiten el drenaje del agua presente en la masa sólida:

- Medio de drenaje
- Sistema de drenaje

- Medio de drenaje: Permite la percolación del líquido presente en el lodo a través de capas superiores de arena y capas inferiores de grava. Las capas están puestas de menor a mayor diámetro, en el rango de un diámetro de partículas de 0.3 mm en la parte superior (arena) y 76 mm en la parte inferior (grava). La profundidad total de las capas es alrededor de 0.50 m (Ver figura 4)
- Sistema de drenaje: Está compuesto por tuberías de alrededor de 100 mm en el fondo del tanque, perforadas, permitiendo drenar todo el líquido percolado a través del medio de drenaje. La distancia entre tuberías no debe exceder 3 m y el piso debe ser impermeable con una pendiente de alrededor de 1% para permitir el drenaje.

Ilustración 4 Detalle de medio de drenaje en lecho de secado de lodos



Fuente: Referencia bibliográfica 3

3.4 Humedales artificiales

Los humedales son medios con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial autodepurador. Los humedales naturales pueden alcanzar gran complejidad, con un mosaico de lámina de agua, vegetación

sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie (Llagas y Guadalupe, 2006).

Los humedales artificiales logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, adsorción y metabolismo bacterial. Además, interactúan con la atmósfera. Los humedales operan casi a velocidades de flujo y caudal constante y están sujetos a drásticos cambios en la remoción de DBO, debido a los cambios en la temperatura del agua (Llagas y Guadalupe, 2006).

3.4.1 Tipos de humedales artificiales

Existen dos tipos de humedales diseñados para el tratamiento de aguas residuales, humedales de flujo subsuperficial (SFS) y superficial (FWS). En el denominado de flujo superficial, el agua circula por sobre la superficie del substrato y, en el de flujo subsuperficial, el agua circula a nivel de la superficie del lecho o por debajo del substrato (Llagas y Guadalupe, 2006).

3.4.1.1 Sistema de agua superficial libre (FWS)

Estos sistemas consisten típicamente de estanques o canales, con alguna clase de barrera subterránea para prevenir la filtración, suelo u otro medio conveniente a fin de soportar la vegetación emergente, y agua en una profundidad relativamente baja (0,1 a 0,6 m) que atraviesa la unidad. La baja profundidad del agua, la baja velocidad del flujo y la presencia de tallos de planta regulan el flujo del agua. Se aplica agua residual pre tratada a estos sistemas y el tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación emergente (Llagas y Guadalupe, 2006).

Ilustración 5 Ilustración 5 Humedal artificial de flujo superficial de Gruta Xavier (Con lirios acuáticos)



3.4.1.2 Sistemas de flujo bajo la superficie (SFBS)

Estos sistemas son similares a los filtros horizontales por goteo en las plantas de tratamiento convencionales. Dentro del lecho los microbios facultativos atacan al medio y las raíces de las plantas, contactando de este modo el agua residual que fluye horizontalmente a través del lecho; mientras que el sobrante baja a la superficie del medio. Estos sistemas de SFBS son diseñados con el propósito de obtener niveles de tratamiento secundarios, son llamados «la zona de raíces» o «filtros de piedras de junco y caña» desarrollado en Alemania Oriental (Llagas y Guadalupe, 2006).

3.4.2 Componentes de un humedal artificial

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial están constituidos básicamente por tres elementos: plantas acuáticas, sustrato y microorganismos.

3.4.2.1 Plantas acuáticas

Las especies de plantas que se introducen para crear un humedal dependen del tipo de humedal que se desea establecer. En este sentido, el clima, salinidad, profundidad y régimen de uso son los factores que van a definir las especies que serán introducidas. Dentro de estas especies las más utilizadas en los humedales artificiales son las plantas macrófitas emergentes, subemergentes y flotantes, ya que son capaces de soportar variaciones en el nivel de agua y, además, poseen la cualidad de poder reproducirse en condiciones con bajos niveles de oxígeno disuelto (Ñique, 2000).

La función de mayor importancia de las macrófitas en relación con el proceso de tratamiento de las aguas residuales es el efecto físico que ellas producen. Las macrófitas estabilizan la superficie del lecho, proporcionando buenas condiciones para la filtración, la transferencia de oxígeno a través de las raíces y rizomas, absorción de nutrientes y eliminan contaminantes por asimilación directa en sus tejidos (Ingeniería hidráulica y ambiental, 2003).

Las plantas acuáticas flotantes y sumergidas están en los sistemas de tratamiento poco profundos. Los sistemas más completamente estudiados son aquellos que usan el Jacinto de agua o la lenteja de agua. Estos sistemas incluyen dos tipos basados en tipos de plantas dominantes. El primer tipo usa plantas flotantes y se distingue por la habilidad de estas plantas para derivar el dióxido de carbono y las necesidades de oxígeno de la atmósfera directamente. Las plantas reciben sus nutrientes minerales desde el agua. El segundo tipo de sistema consiste en plantas sumergidas. Se distingue por la habilidad de estas plantas para absorber oxígeno, dióxido de carbono y minerales de la columna de agua. Las plantas sumergidas se inhiben fácilmente por la turbiedad alta en el agua porque sus partes fotosintéticas están debajo del agua (Llagas y Guadalupe, 2006).

3.4.2.2 Medios de soporte

En los humedales el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico (Lara, 1999).

El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal (Lara, 1999).

La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos (Delgadillo, *et al.*, 2010).

3.4.2.3 Microorganismos

Muchas transformaciones de los nutrientes y del carbono orgánico en humedales son debidas al metabolismo microbiano y están directamente relacionadas con el crecimiento de los microorganismos. Éstos incluyen principalmente bacterias, hongos y protozoarios (Figura 4) (Mena *et al.*, 2008).

Ilustración 6 Microorganismos presentes en humedales artificiales



Los microorganismos utilizan los nutrientes y el carbono tanto como fuente de energía como para la formación de nueva biomasa microbiana. La velocidad de crecimiento de esta nueva biomasa dependerá tanto de las condiciones ambientales como de la disponibilidad del sustrato. La energía es obtenida por la oxidación de compuestos reducidos (dador de electrones) con un oxidante (aceptor de electrones) a través de la cadena respiratoria (Mena *et al.*, 2008).

3.4.2.4 Biopelícula

Las biopelículas son conglomerados de grupos complejos de microorganismos donde predominan las bacterias heterótrofas, impartiendo al conjunto adhesión gracias a la producción de polímeros extracelulares. La mayor eficiencia en la remoción de sustratos depende en gran medida de la obtención de la cantidad adecuada de biopelícula adherida al material de soporte. Conforme se incrementa la cantidad de microorganismos, mayor es la tasa de remoción del sustrato de acuerdo con la ecuación de Monod, pero existe un nivel crítico en el que la difusión de sustrato, nutrientes u oxígeno puede ser un factor limitante que afecta la tasa de biodegradación (Tchobanoglous, 2003).

3.4.3 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS), así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos. La eliminación de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo. Los mecanismos básicos de tratamiento son tamizados, sedimentación, precipitación química, adsorción y degradación microbológica de la DBO₅ y del nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación. En la Tabla 3 se pueden ver los principales procesos que se llevan a cabo en un humedal y que permiten la depuración del agua residual (Mena *et al.*, 2008).

Tabla 3 Mecanismos de depuración predominantes en los humedales artificiales.

Contaminantes	Mecanismos de eliminación
Sólidos suspendidos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación • Filtración
Materia orgánica	<ul style="list-style-type: none"> • Degradación microbiana aerobia • Degradación microbiana anaerobia
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Amonificación seguido por nitrificación microbiana y desnitrificación. • Asimilación por parte de las plantas • Adsorción principal • Volatilización del amoniaco
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Adsorción por parte del lecho • Asimilación por parte de las plantas
Metales	<ul style="list-style-type: none"> • Asimilación por parte de las plantas • Intercambio iónico
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación • Filtración • Radiación ultravioleta

Fuente: Mena *et al.*, 2008

3.4.3.1 Remoción de DBO₅

La eliminación de la materia orgánica en los humedales es compleja ya que es el resultado de la interacción de numerosos procesos físicos, químicos y bióticos que suceden de forma simultánea (García y Corzo, 2008).

La degradación de la materia orgánica por vía aeróbica en los humedales de flujo horizontal sucede cerca de la superficie del agua (en los primeros 0,05 m de profundidad) y en las zonas cercanas a las raíces. El oxígeno liberado por las raíces no es suficiente para degradar completamente de forma aeróbica la materia orgánica. Estimaciones realizadas a través de balances de masa y emisiones de gases, indican que la degradación aeróbica es una vía poco importante con respecto a vías anaeróbicas en sistemas de flujo horizontal (García y Corzo, 2008).

En el efluente de los humedales la DBO se incrementa debido a la degradación de la materia orgánica de las plantas que trae consigo que al agua pasen una serie de sustancias solubles principalmente aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y otras sustancias que son fácilmente degradados por los microorganismos. Se ha observado incluso que en humedales en los que no se suministra agua residual, sus efluentes mantienen una concentración de DBO variables que puede estar entre 2 y 10 mg/L, siendo el valor típico entre 3 y 5 mg/L. Lo anterior demuestra que la DBO en los efluentes de los humedales está compuesta por la DBO remanente del residual afluente y de la DBO aportada por las plantas al ser degradadas (García y Corzo, 2008).

Es importante considerar el periodo de operación del sistema para la obtención de las eficiencias esperadas. Rivera *et al.* (1997), encontró que en países como México, el tiempo mínimo para que el sistema de humedales se estabilice es de un año, a diferencia de países como Alemania y el Reino Unido en los que el sistema se estabiliza en más tiempo debido a que la temperatura ambiental es menor.

3.4.3.2 Remoción de sólidos suspendidos

La remoción de los sólidos suspendidos y sedimentables presentes en las aguas residuales ocurre fundamentalmente en las unidades de pretratamiento, las cuales se instalan previamente a los humedales. Los sólidos suspendidos que permanecen en el agua residual después del pretratamiento son removidos por sedimentación y filtración. Estos procesos que son puramente físicos también eliminan una porción significativa de otros contaminantes presentes en las aguas residuales (DBO, nutrientes, patógenos) (García y Corzo, 2008).

En los humedales horizontales la mayor parte de la eliminación de la materia en suspensión sucede cerca de la zona de entrada y su concentración va disminuyendo de forma aproximadamente exponencial a lo largo del lecho.

Se determinó que la retención de sólidos en un humedal de flujo subsuperficial debida a las raíces y rizomas es muy eficiente, ocurriendo desde los primeros 5 m de distancia desde la entrada. La eficiencia de retención de sólidos depende de la naturaleza del agua recibida. En la mayoría de los casos se consiguen valores en el efluente inferiores a 20 mg/l de SST (Lahora, 2003).

3.4.3.3 Remoción de patógenos

Los patógenos pueden encontrarse en la fracción de sólidos del afluente o en suspensión en el agua. Los patógenos pueden separarse del agua por los procedimientos asociados con la remoción de sólidos, es decir, por sedimentación, intercepción y adsorción/absorción. Una vez separados pueden quedar retenidos en las biopelículas o en el sedimento, o bien volver a incorporarse al flujo. Otros patógenos como virus y protozoos que se dispersan por esporas son más resistentes. Por ello, en función del destino del efluente del humedal puede ser necesario hacer un tratamiento de desinfección antes de su descarga (García y Corzo, 2008).

Las bacterias patógenas y los virus son removidos, fundamentalmente, por adsorción, sedimentación y filtración. En el caso de los humedales con flujo libre, la

radiación ultravioleta también puede provocar la muerte de los patógenos (García, 2004).

Para evaluar la eficiencia de eliminación de los patógenos se suele estudiar la eliminación de microorganismos indicadores de la contaminación fecal, como son los coliformes fecales. El grado de eliminación obtenido en sistemas horizontales y verticales es similar y oscila entre uno o dos órdenes logarítmicos. También los humedales artificiales son capaces de reducir otros patógenos como protozoos o helmintos (Lahora, 2003).

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

4.1 Medición de caudal de entrada a la planta

Para el cálculo del caudal, se realizaron mediciones de velocidades del flujo y de tirante de agua de 8 AM a 7 PM (una vez cada hora) semanal, durante cinco semanas en el canal que está posterior al desarenador, antes de que el flujo llegue a la caja de distribución de caudal hacia los reactores UASB, para así ocupar la ecuación de continuidad de la hidráulica ($Q = VA$).

No se realizaron mediciones de caudal en los tratamientos posteriores ya que el período de retención de todo el sistema es pequeño y se consideran despreciables las pérdidas por evapotranspiración.

4.2 Evaluación de cada uno de los elementos que componen la planta de tratamiento

4.2.1 Reactores UASB

Los principales parámetros hidráulicos evaluados en el dimensionamiento de reactores UASB fueron el período de retención hidráulica, la carga superficial y la velocidad de ascenso y también a través de eficiencia de remoción de la DBO_5 , DQO y SST y de los coliformes fecales, además del área de influencia de las mangueras y la producción de lodos.

4.2.1.1 Período de retención hidráulico

Se calculó como la relación entre el Volumen entre el caudal.

Según la literatura, en reactor UASB el valor óptimo está entre 6 -10 horas para el caudal medio, luego de este valor, la eficiencia del reactor se espera que sea casi constante en la zona de sedimentación el valor óptimo de referencia es entre 1.5 – 2 horas para el caudal medio, para así permitir una buena sedimentación, y un retorno del lodo retenido hacia la zona de digestión.

Tiempos de retención hidráulicos pequeños podrían tener como consecuencia:

- a) Excesiva pérdida de biomasa, la cual es retirada en el efluente, debido a velocidades de ascenso altas en las zonas de sedimentación y de digestión.
- b) Reduce el tiempo de retención de sólidos (edad del lodo), y un consecuente decaimiento en el grado de estabilización de los sólidos.
- c) Posibilidad de fallo en el sistema, debido a que el tiempo de residencia de la biomasa se hace menor que su tasa de crecimiento.

4.2.1.2 Carga superficial en la zona de sedimentación

Se calculó como la relación del Caudal entre el Área del sedimentador ($q=Q/A_s$). Se recomienda entre $0.6 - 1 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hora}$, esto para generar una óptima sedimentación y así los sólidos puedan regresar al digestor.

4.2.1.3 Velocidad de ascenso del flujo

Es la velocidad con la cual el flujo asciende dentro del reactor, se calculó como la relación del caudal entre el área transversal ($V_{as}=Q/A_t$) mayor (manto de lodos) del reactor. No se recomienda que sea mayor a 1 m/h y está estrechamente relacionado con el período de retención hidráulico en el sistema.

4.2.1.4 Eficiencia de remoción teórica de materia orgánica

La eficiencia de remoción de materia orgánica en reactores UASB (DBO, DQO y SST) se estima en función del período de retención hidráulico a través de ecuaciones empíricas, que están en función a experimentos a escala piloto realizados por la AWWA en los Estados Unidos. Los resultados arrojaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{DBO: Eficiencia de remoción (\%)} = 100 \cdot (1 - 0.68 \cdot t^{0.35})$$

$$\text{DQO: Eficiencia de remoción (\%)} = 100 \cdot (1 - 0.7 \cdot t^{0.50})$$

$$\text{SST: Efluente (mg/L)} = (250/t) + 10$$

Donde "t" es el período de retención hidráulico en el reactor UASB.

4.2.1.5 Eficiencia de remoción de coliformes fecales

La eficiencia de remoción de coliformes fecales en reactores UASB se estima de alrededor de un 70%.

4.2.1.6 Área de influencia de mangueras de distribución

Es el área sobre la cual cada una de las mangueras de distribución ejerce una influencia de dispersión del flujo dentro del reactor. Se calcula como el número de mangueras de distribución entre el área transversal mayor (manto de lodos) del reactor.

Plantas que funcionan adecuadamente en distintas partes del mundo muestran las siguientes áreas de influencia de mangueras de distribución:

Tabla 4 Área de influencia de mangueras de distribución en reactores UASB que operan eficientemente

Sistema	Área de influencia (m²)
Itamina (Minas Gerais, Brasil)	2.3 – 3
Pereigal (Paraiba, Brasil)	2 – 4
Sao Pablo (Cetesb, Brasil)	2
Bucaramanga (Colombia)	2.9
Cali (Colombia)	1 – 4
Kampur (India)	3.7

⁴ Fuente: Referencia bibliográfica 3

Como se puede observar, al área de influencia de las mangueras varía entre 1 – 4 m². Por lógica, mientras el área de influencia sea menor, la distribución del flujo será más uniforme, pero también debe tomarse en cuenta el aspecto económico.

4.2.1.7 Producción per cápita de lodo

A través de la experiencia en Nicaragua en estudios realizados por la cooperación alemana, se estima una producción per cápita de lodos en reactores UASB de 35 L/hab*año.

Un resumen de los parámetros de evaluación y eficiencia esperada de reactores UASB se presenta en la tabla 6:

Tabla 5 Parámetros de evaluación y eficiencia esperada de reactores UASB

Parámetro	Valor típico – recomendado
Período de retención hidráulico	6 – 10 horas
Período de retención en el sedimentador	1.5 – 2 horas
Carga superficial en el sedimentador	0.6 – 1 m ³ /m ² .hora
Velocidad de ascenso	< 1 m/hora
Eficiencia de remoción de DBO	≈ 90%
Eficiencia de remoción de DQO	≈ 80%
Efluente de SST	50 – 40 mg/L
Eficiencia de remoción de CF	≈ 70%
Área de influencia de mangueras de distribución	1 – 4 m ²
Producción per cápita de lodos	35 L/hab.año

Fuente: Referencia bibliográfica 3

4.2.2 Evaluación del humedal artificial de flujo superficial

Los principales parámetros de evaluados en los humedales fueron el período de retención hidráulico, Carga hidráulica, eficiencia de remoción de DBO₅ y SST, de coliformes fecales:

4.2.2.1 Período de retención hidráulico.

El tiempo en que el agua residual pasa dentro del humedal, se calculó como Volumen del humedal / Caudal, y se recomienda valores entre 2 – 5 días.

4.2.2.2 Carga hidráulica

Se calculó como la cantidad de agua residual (caudal) aplicada sobre la unidad de área superficial del humedal (Caudal / Área) y se expresó en unidades de cm/día, y se recomiendan valores entre 40 – 75 cm/día.

4.2.2.3 Eficiencia de remoción de materia orgánica

La eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo superficial se expresa como un porcentaje de la remoción de DBO₅ y SST (para la DQO no existen modelos teóricos, ya que se asocia a la remoción de DBO₅). Para una estimación teórica, se utilizó el modelo de flujo pistón (referencia bibliográfica 4), el cual se calculó de la siguiente manera:

- Constante de remoción de DBO (k_{DBO_5}) = $0.678 (1.06)^{T-20}$, donde t= temperatura del agua. Esta constante está en unidades de 1/tiempo.
- Efluente de DBO (en mg/L) esperado (C_e) = $C_o \cdot e^{-k_{\text{DBO}_5} \cdot t}$.

Donde:

C_o : Afluente de DBO en mg/L.

e = Número de Euler.

t = Período de retención hidráulico.

- Efluente de SST (en mg/L) esperado (C_e) = $C_o (0.1139+0.00213 \cdot \text{CH})$
(Referencia bibliográfica 5)

Donde:

CH = Carga hidráulica, en cm/día.

4.2.2.4 Eficiencia de remoción de coliformes fecales.

La eficiencia de remoción de coliformes fecales también se estimó mediante el modelo de mezcla completa (referencia bibliográfica 4), siguiendo la siguiente secuencia de cálculo:

- Constante de remoción de coliformes (K_b) = $2.6 * 1.19^{t-20}$, donde t = temperatura del agua. Esta constante está expresada en unidades de 1/tiempo.

- Efluente de coliformes fecales (en NMP/100mL) esperado (C_e) = $C_o * (1/(1+t*k_b))$, donde:

t = Período de retención hidráulico.

C_o = Afluente de coliformes fecales (en NMP/100mL).

Un resumen de los principales parámetros de diseño y evaluación de humedales artificiales de flujo superficial se muestran en la siguiente tabla 8:

Tabla 6 Principales parámetros de diseño y evaluación de humedales artificiales de flujo superficial

Parámetro	Dimensión	Magnitud esperada/recomendada
Tiempo de retención hidráulico	días	2 - 5
Carga hidráulica	cm/día	40 – 75
Eficiencia de remoción de DBO_5	%	≈80
Eficiencia de remoción de SST	%	≈75
Eficiencia de remoción de coliformes fecales	%	≈85

Fuente: Referencias bibliográficas 4, 5 y 8

4.2.3 Evaluación del lecho de secado de lodos

Existen principalmente tres parámetros al momento de evaluar lechos de secado de lodos, los cuales son los siguientes:

- Tasa de carga superficial de sólidos por ciclo.

Se calculó como la cantidad de Sólidos suspendidos totales expresados en Kg, aplicados a un área unitaria en cada período de purga. No se recomienda que este parámetro exceda los 15 kgSST/m² (referencia bibliográfica 3).

- Número de lechos de secado.

Se recomienda que siempre se construyan al menos 2 lechos, para así permitir que, en caso de mantenimiento, se inhabilite uno el otro quede en funcionamiento en el tiempo en que se le da mantenimiento al otro.

- Capacidad volumétrica: Es la capacidad que tiene el lecho de soportar descargas de caudales sobre él. Se define como el borde libre, multiplicado por la sección transversal del lecho, y está expresado en m³. Se debe asegurar que sea mayor al volumen de lodos descargados al lecho por tiempo de purga.

“Brazililian Standards” (ABNT, 1999) recomienda como un resumen los siguientes parámetros para diseño y evaluación de lechos de secado de lodos:

Tabla 7 Parámetros de diseño y evaluación de lechos de secado de lodos

Parámetro	Magnitud	Valor recomendado
Tasa de carga superficial de sólidos (SLR) por ciclo	kgSST/m ²	15
Cantidad de lechos construidos	-	2 mínimo
Capacidad volumétrica	m ³	> Volumen producido por ciclo

Fuente: Referencia bibliográfica 3

4.2.4 Análisis de eficiencia del sistema

Para el análisis del comportamiento total de la planta se comparó el efluente con el decreto 33 – 95, dicha normativa nacional vigente establece los valores máximos permisibles de los parámetros vinculados al vertido de aguas residuales que descargan directa o indirectamente a cuerpos receptores. La eficiencia del sistema se calcula:

$$\% \text{Remoción} = \frac{\text{Concentración}_{\text{inicial}} - \text{Concentración}_{\text{final}}}{\text{Concentración}_{\text{inicial}}} * 100$$

La tabla 4. informa sobre los valores indicados en el Arto.23 para las PTAR con poblaciones contribuyente hasta 75,000 habitantes.

En el anexo 1 del Decreto 33-95, la frecuencia de muestreo para la descarga de plantas de tratamiento a cuerpos receptores se establece muestreo mensual.

Tabla 8 Rangos y límites máximos permisibles de efluentes de sistemas de tratamiento de alcantarillado sanitario descargado directa o indirectamente a los cuerpos receptores

Parámetro	Rangos y límites máximo permisibles
pH	6-9
Demanda bioquímica de oxígeno	110 mg/L
Demanda química de oxígeno	220 mg/L
S. Suspendidos totales	100 mg/L
S. Sedimentables	1 mg/L
Grasas y aceites	20 mg/L
Sustancias activas al azul de metileno	3 mg/L
Coliformes fecales	1000 NMP/100mL

Fuente: Decreto 33-95, artículo No. 23

Cabe mencionar que en la fecha en que fue presentado este documento, el decreto 21-2017 ya estaba vigente. Este decreto establece los mismos rangos y límites máximos permisibles para la DBO, DQO y SST. Para los coliformes fecales hay una variación, permitiendo un efluente máximo de 1E+05 NMP/100mL.

CAPÍTULO V: CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Cálculo del caudal de entrada a la planta

Los resultados de los caudales promedios medidos se muestran en la tabla 9:

Tabla 9 Caudales medidos en la PTAR Gruta Xavier

Promedio del tirante y velocidades medidas						
Fechas	Q(m³/s)	V(m/s)	V(cm/s)	B_{CANAL}(m)	H_{MEDIDA}(m)	A(m²)
Lunes 13/11/17	0.00166	0.0189	1.89	0.44	0.20	0.09
Lunes 20/11/17	0.00160	0.0202	2.02	0.44	0.18	0.08
Lunes 27/11/17	0.00172	0.0178	1.78	0.44	0.22	0.10
Lunes 04/12/17	0.00169	0.0183	1.83	0.44	0.21	0.09
Lunes 11/12/17	0.00163	0.0195	1.95	0.44	0.19	0.08
Promedio	0.00166					

Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, la urbanización Gruta Xavier ya se ha terminado de construir, por lo que teóricamente se debería de estar operando con el caudal con que fue diseñado. Este caudal de diseño es de 1.56 L/s. Las variaciones entre el resultado medido de 1.66 l/s y el de diseño de 1.56 l/s no varían significativamente, por lo que el resultado obtenido se considera confiable y aplicable en los cálculos posteriores.

5.2 Historial de análisis de laboratorio realizados en la planta

El historial de resultados de análisis hechos en laboratorio para la PTAR Gruta Xavier se muestran a continuación. Para sus diferentes parámetros (es preciso mencionar que los valores utilizados para el análisis posterior de los reactores UASB fue el efluente con mayor concentración, esto para hacer el análisis más conservador). Los valores en negrita son los que fueron utilizados para realizar los análisis de los reactores UASB y el humedal de flujo superficial.

5.2.1 Demanda bioquímica de oxígeno

El grado de estabilización alcanzado en los sistemas de tratamiento biológicos se mide por la remoción de materia orgánica DBO₅ y DQO. Los resultados de carga orgánica promedio durante todo el período a la entrada general del sistema fueron de 302.00 mg/l de DBO₅. A la salida del sistema la DBO₅ descendió hasta concentración promedio de 46.00 mg/l, lo que representa una eficiencia del sistema del 84.76% (75-90 %) (Tabla 10 y figura 6)

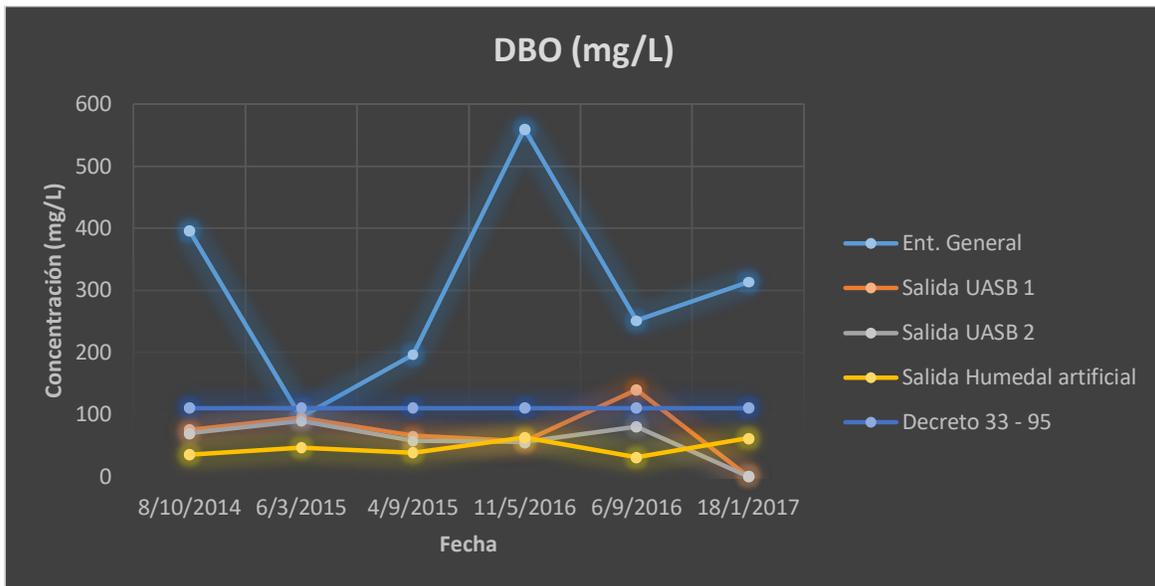
La concentración DBO₅ de las salidas en todos los casos es siempre inferior a 110 mg/l que es límite máximo de efluentes en las Normas de vertido Nacionales.

Tabla 10 Resultados históricos de DBO5

DBO (mg/L)								
Fecha	Entrada general	REACTORES UASB				HUMEDAL		Decreto 33-95
		Salida UASB #1	% de remoción UASB #1	Salida UASB #2	% de remoción UASB #2	Salida humedal	% de remoción humedal	
08/10/2014	396	75	81	69	83	35	54	110
06/03/2015	95	94	1	89	8	46	51	
04/09/2015	196	65	67	57	70	38	42	
11/05/2016	560	56	90	55	92	62	-	
06/09/2016	251	139	45	80	72	30	78	
18/01/2017	313	-	-	-	-	61	-	
Promedio	302	86	71	70	79	46	56	
Valor de diseño	350	70	80	70	80	25	65	-

Fuente: Gerencia de operaciones, ENACAL

Ilustración 7 Remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)



Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Demanda química de oxígeno

El promedio de DQO en la entrada general fue de 623 mg/l y en la salida fue de 87.00 mg/l lo que representa una eficiencia promedio del sistema del 91.97 %. (Tabla 11 y figura 7).

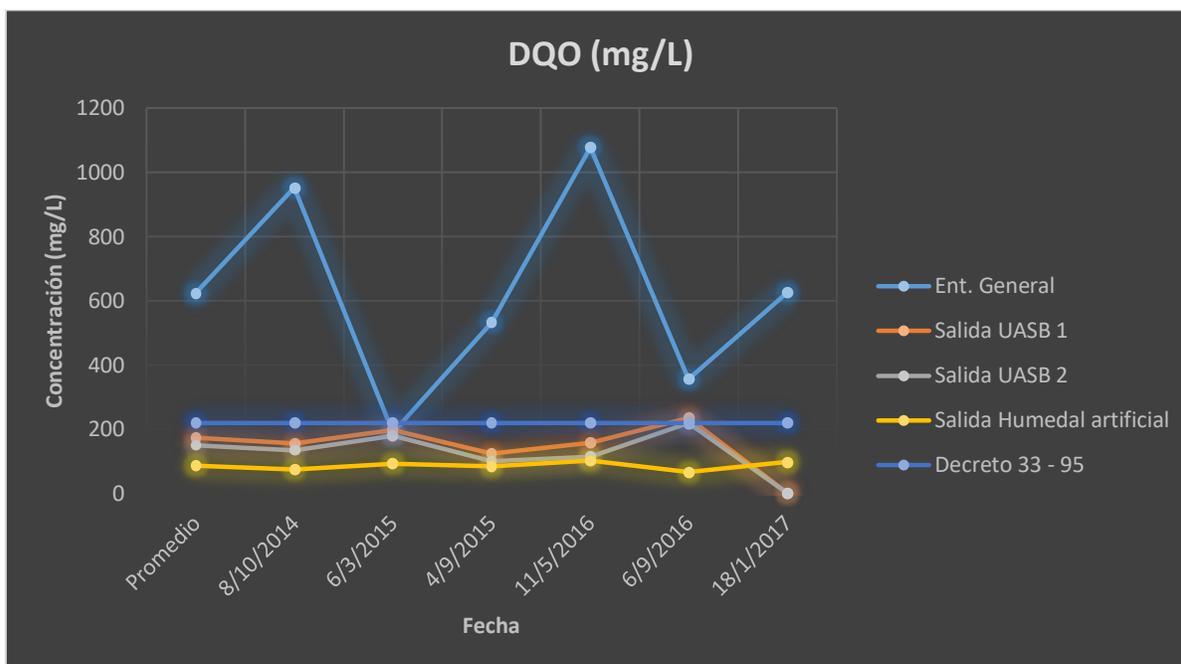
Para todas las fechas de muestreo la concentración del efluente fue siempre inferior a 220 mg/l que es límite máximo de efluentes en las Normas de vertido Nacionales.

Tabla 11 Resultados históricos de DQO

DQO (mg/L)								
Fecha	Entrada general	REACTORES UASB				HUMEDAL		Decreto 33-95
		Salida UASB #1	% de remoción UASB #1	Salida UASB #2	% de remoción UASB #2	Salida Humedal	% de remoción humedal	
08/10/2014	952	155	86	134	86	75	52	220
06/03/2015	189	198	-	180	-	93	53	
04/09/2015	533	124	77	101	81	84	33	
11/05/2016	1078	158	85	114	91	102	35	
06/09/2016	356	235	34	219	39	66	72	
18/01/2017	626	-	-	-	-	98	-	
Promedio	623	174	71	150	74	87	50	
Valor de diseño	700	187	73	187	73	66	65	

Fuente: Gerencia de operaciones, ENACAL

Ilustración 8 Remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)



Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Relación DQO/DBO₅

Los resultados de la relación promedio de la $DQO/DBO_5 = 2.08$ muestran una alta fracción de componentes biodegradables ($DQO/DBO_5 < 2.5$), significa que el agua residual doméstica puede ser tratada con tratamientos biológicos o de lechos bacterianos. (Tabla 12)

Tabla 12 Resultados históricos del coeficiente de biodegradación

Relación DQO/DBO (adimensional)	
Fecha	Entrada general
08/10/2014	2.40
06/03/2015	1.99
04/09/2015	2.72
11/05/2016	1.93
06/09/2016	1.42
18/01/2017	2
Promedio	2.08

Fuente: Gerencia de operaciones, ENACAL

5.2.4 Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos en el tiempo que duro el muestreo, presentaron un comportamiento en el cual se disminuían considerablemente en el tratamiento primario como el secundario pese a la carga alta entrante, medida en la entrada general.

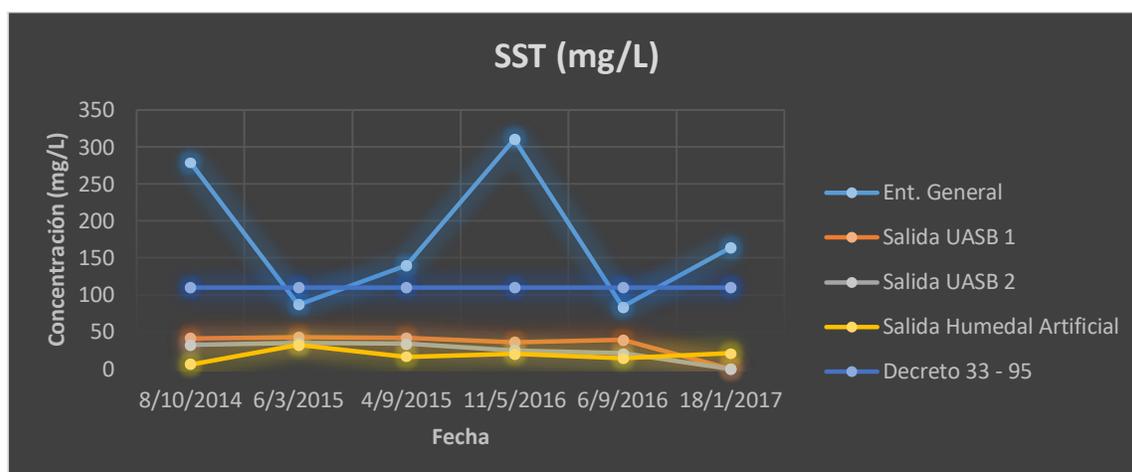
De esta forma los valores de Sólidos Suspendidos son mayores en la **Entrada General** con un promedio de 178.00 mg/l, con máximo y mínimo de 311 y 84 respectivamente. Para la salida del humedal la concentración promedio fue de 19.00 mg/l con 32 y 6 mg/l valores máximo y mínimo. (Tabla 13 y figura 8)

Tabla 13 Resultados históricos SST

SST (mg/L)								
Fecha	Entrada general	REACTORES UASB				HUMEDAL		Decreto 33-95
		Salida UASB #1	% de remoción UASB #1	Salida UASB #2	% de remoción UASB #2	Salida Humedal	% de remoción humedal	
08/10/2014	279	41	85	32	88	6	82	110
06/03/2015	87	43	50	35	60	32	-	
04/09/2015	140	42	70	34	76	16	53	
11/05/2016	311	36	88	25	92	20	20	
06/09/2016	84	39	54	21	75	14	33	
18/01/2017	164	-	-	-	-	21	-	
Promedio	178	41	77	30	83	19	47	
Valor de diseño	700	187	74	187	74	25	87	

Fuente: Gerencia de operaciones, ENACAL

Ilustración 9 Remoción de Sólidos Suspendedos Totales (SST)



Fuente: Elaboración propia

5.2.5 Coliformes fecales

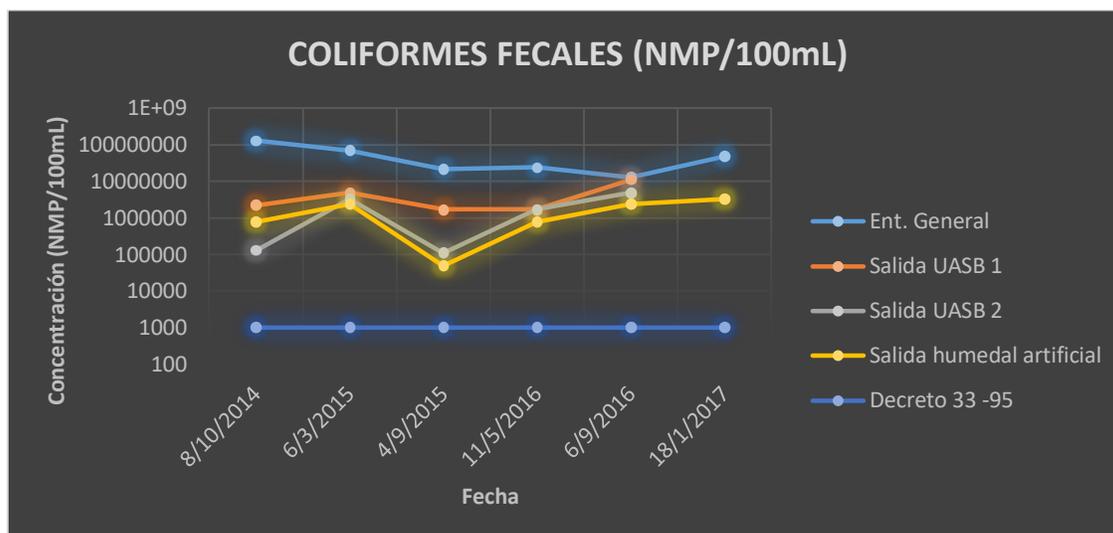
La variación de la concentración de Coliformes fecales en la entrada del sistema de tratamiento varió desde $1.30E+07$ a $1.30E+08$ NMP/100, los cuales son valores típicos de aguas residuales domésticas. La eficiencia de este sistema de tratamiento primario fue de aproximadamente un 97 % y en el Tratamiento secundario del 47.00 %. En general el sistema de tratamiento conjunto, la eficiencia promedio fue del 90%. En ninguno de los casos cumple con las Normas de Vertido Decreto 33-95 (Tabla 14 y figura 9). Asimismo, no cumpliría si se analizara respecto al decreto 21-2017, cuyo valor máximo permisible en el efluente de CF es $1E+05$ NMP/100mL.

Tabla 14 Resultados históricos CF

CF (NMP/100mL)								
Fecha	Entrada general	Reactores UASB				Humedal		Decreto 33 - 95
		Salida UASB #1	% de remoción UASB #1	Salida UASB #2	% de remoción UASB #2	Salida Humedal	% de remoción Humedal	
08/10/2014	1.3E+08	2.2E+06	99	1.3E+05	99.9	7.9E+05	-	<1E+03
06/03/2015	7E+07	4.9E+06	93	3.3E+06	96	2.4E+06	27	
04/09/2015	2.2E+07	1.7E+06	92	1.1E+05	99.5	4.9E+04	55	
11/05/2016	2.4E+07	1.7E+06	92	1.7E+06	93	7.9E+05	53	
06/09/2016	1.3E+07	1.1E+07	-	4.9E+06	63	2.4E+06	51	
18/01/2017	4.9E+07	-	-	-	-	3.3E+06	-	
Promedio	5.1E+07	4.3E+06	94	2.3E+06	97	1.6E+06	47	
Valor de diseño	-	-	-	-		<1E+03		

Fuente: Gerencia de operaciones, ENACAL

Ilustración 10 Remoción de coliformes fecales (CF)



Fuente: Elaboración propia

5.2.6 Potencial de hidrogeno

Como la mayor parte las formas de vida ecológicas son sensibles a los cambios de pH es importante mantener el control de pH de los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales dentro de un rango específico de 6-8, debido a que un rango muy alejado a estos valores puede matar la colonia activa microbológica. En este caso el pH en la entrada del sistema varió de 6.72 a 8.34 y en la salida general de 6.00 a 8.05 lo cual se mantuvo en el rango descrito. (Tabla 15).

Tabla 15 Resultados históricos PH

Fecha	pH	
	EG	SG
08/10/2014	6.72	6.47
06/03/2015	6.46	6.93
04/09/2015	8.10	7.31
11/05/2016	7.23	6.65
06/09/2016	8.34	8.05
18/01/2017	7	6
Promedio	7.31	6.90
Valor de diseño	7	7
Decreto 33-95	De 6 a 9	

Fuente: Gerencia de operaciones, ENACAL

Los resultados registrados de pH muestran valores en el rango de los permisibles en el decreto 33 – 95.

5.2.7 Temperatura del agua

La temperatura promedio del agua residual en los diferentes puntos del sistema de tratamiento, varió en todo el periodo de muestreo, como consecuencia de los distintos procesos de depuración y las condiciones climáticas imperantes en las fechas de toma de muestras.

En las aguas crudas, la temperatura promedio medida en la **Entrada General**, se encontró dentro del rango del valor de las aguas residuales domésticas siendo 30.70 °C y 26.70 °C los valores máximo y mínimo respectivamente. El promedio total de todo el período en la entrada fue de 29.50 °C y en la salida de 29.70 °C. (Tabla 16).

Tabla 16 Resultados históricos temperatura del agua

<i>Temperatura del agua (°C)</i>		
<i>Fecha</i>	EG	SG
08/10/2014	30.70	30.10
06/03/2015	29.40	29.30
04/09/2015	30.60	30
11/05/2016	30	32.30
06/09/2016	26.70	26.80
18/01/2017	-	-
Promedio	29.50	29.70
Valor de diseño	-	-
Decreto 33-95	-	

Fuente: Gerencia de operaciones, ENACAL

El valor a utilizado fue el menor registrado para ser conservadores en el análisis, ya que las bacterias que cumplen la función de depurar las aguas se ven más forzadas a trabajar conforme la temperatura decrece. Para este caso se utilizó 26.70°C ≈ **25°C**.

5.3 Análisis del diseño y la operación actual del sistema

5.3.1 Afluyente

Las características del agua residual que ingresa a la planta son los datos más importantes del análisis, ya que estos valores indicarán aspectos tan relevantes como concentraciones altas que podrían estar asociadas a vertidos industriales, caudales fuera de lo común, etc.

La tabla 17 muestra las características del afluyente de las aguas residuales de la urbanización Gruta Xavier.

Tabla 17 Características del afluyente y datos iniciales de análisis

Parámetros iniciales			
Parámetro		Unidades	Valor
Conexiones		U	200
Índice de hacinamiento		Hab/conexión	6
Población	Diseño	hab	1,200
	ENACAL	hab	-
Aporte per cápita AR de diseño		L/hab.d	112
Caudal	Diseño	L/s	1.56
		m ³ /d	134.80
	Actual	L/s	1.66
		m ³ /d	143.43
Concentración DBO afluyente	Actual	mg/L	302
		Kg/d	43.31
	Diseño	mg/L	350
		Kg/d	47.17
Aporte per cápita DBO₅ diseño		gr/hab.día	40
Aporte per cápita DBO₅ actual		gr/hab.día	36.09
Concentración DQO afluyente	Actual	mg/L	623
		Kg/d	89.35
	Diseño	mg/L	700
		kg/d	94.35
Aporte per cápita DQO diseño		gr/hab.d	79
Temperatura actual		°C	25

Fuente: ENACAL y PROATAS/GIZ

El aporte per cápita de aguas residuales presenta un valor típico para conexiones domiciliarias (112 L/hab.día). Por otra parte, tanto los valores de aporte per cápita de DBO₅ y DQO de diseño también son típicos; en el caso de la DBO₅, la literatura estima un aporte per cápita medio para aguas residuales de entre 40-54 gr/hab.d (referencia bibliográfica 7) y se consideró en diseño un valor de 40 gr/hab.d., resultando el valor actual de 36.09 mg/l. Mientras, para la DQO, la literatura estima valores medio de entre 75-90 gr/hab.día (referencia bibliográfica 7) y se consideró en diseño un valor de 79 gr/hab.día.

5.3.2 Reactores anaerobios de flujo ascendente

Los resultados de los cálculos de los diferentes parámetros de evaluación de los reactores UASB expuestos en la metodología dieron como resultado los valores mostrados en la tabla 18, asimismo, se hace una comparación respecto al valor recomendado por la literatura.

El tiempo de retención actual (tabla 18) es alto (según la literatura, el valor óptimo está entre 6 -10 h para el caudal medio), luego de este valor, la eficiencia del reactor se espera que sea casi constante (Ver Anexo A), es decir que con el resultado obtenido se esperan remociones considerablemente altas de parte de los reactores, lo cual se ve reflejado en la eficiencia teórica de materia orgánica (86% de DBO, 78% de DQO y 88% de SST).

Tabla 18 Resultados de análisis hidráulico – operacional de reactores UASB de Gruta Xavier

Parámetro		Dimensión	Valor actual	Valor de diseño	Valor recomendado / típico
Período de retención hidráulico		h	23	24.50	6 - 10
Período de retención en el sedimentador		h	4	-	1.5 - 2
Carga superficial en el sedimentador		m ³ /m ² .hora	0.123	-	0.6 - 1
Velocidad de ascenso		m/hora	0.125	-	< 1 m/h
Área de influencia mangueras		m ²	1	1	1 - 4
Remoción de DBO	Teórica	%	86	75 - 85	75 - 85
	Real	%	72		
	Afluente – Efluente promedio	mg/L	302 – 86	350 – 70	-
Remoción de DQO	Teórica	%	78	75 - 85	75 - 85
	Real	%	72		
	Afluente – Efluente promedio	mg/L	623 – 174	700 – 73	-
Remoción de SST	Teórica	%	88	74	75 - 80
	Real	%	77		
	Afluente – Efluente promedio	mg/L	178 - 41	700 – 187	-
Remoción de coliformes fecales	Real	%	92	70	70
	Afluente – Efluente promedio	NMP/100mL	5.10E+07 – 4.3E+06	-	-
Carga de sólidos		kgSST/día	5.88	-	-
Volumen de lodo producido anual		m ³ /año	42	-	-

Fuente: Elaboración propia

El resultado de un período de retención alto en el UASB, genera asimismo que el período de retención en el sedimentador sea también alto (4 horas), por lo que se tiene una buena sedimentación y un retorno efectivo del lodo retenido hacia la zona de digestión. Igualmente, la carga superficial en esta zona es baja (0.123 m / hora), debido a que el área transversal es de una magnitud alta considerando el caudal.

De igual manera, y también asociado a un período de retención alto, la velocidad de ascenso del flujo es baja (0.125 m/hora).

Se debe tener en consideración que todos estos resultados son debido a un período de retención hidráulico alto, y esto es una consecuencia de que el volumen del reactor es de una magnitud grande relativa al caudal que procesa, y esto tiene incidencias económicas que deben tenerse en cuenta.

La remoción promedio de materia orgánica es típica para reactores UASB (72% de DBO, 72% de DQO y 77% de SST). En cuanto a la remoción de coliformes, esta es alta considerando que se trata de tratamiento anaerobio, y que por lo general remueve alrededor de un 70% de coliformes fecales.

Cabe mencionar que los valores típicos/recomendados reflejados en la tabla se han tomado de la referencia bibliográfica 3.

5.3.3 Lecho de secado de lodos

Los resultados de los cálculos de los diferentes parámetros de evaluación del lecho de secado de lodos expuestos en la metodología dieron como resultado los valores mostrados en la tabla 19.

Tabla 19 Resultados de análisis del lecho de secado de lodos de Gruta Xavier

Parámetro	Dimensión	Magnitud
Tiempo de purga actual	días	90
Área superficial requerida en base a la carga de sólidos máxima (15 KgSST/m ²)	m ²	35.28
Área superficial actual	m ²	5.41
Volumen de lodo a deshidratar por ciclo de purga	m ³	10.50
Capacidad volumétrica del lecho	m ³	1.67
Número de lechos construido	U	1

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en los resultados que tanto el área superficial actual como la capacidad volumétrica del lecho no son suficientes, y esto por un gran margen.

Los resultados obtenidos coinciden con la práctica, ya que el jefe de la planta explicó que se están teniendo problemas con la purga de lodos, ya que el tanque es demasiado pequeño, por lo que se hace necesario la utilización de un hidrosuccionador al momento de la purga para vaciar el tanque.

Asimismo, cabe recalcar que no es una buena práctica construir sólo un lecho de secado de lodos, ya que, al momento de realizar un mantenimiento físico al sistema, habrá un cortocircuito en el funcionamiento de la planta y deberán detenerse las operaciones.

5.3.4 Humedal artificial de flujo superficial

Los resultados de la evaluación y análisis del humedal artificial de flujo superficial de Gruta Xavier se muestran en la tabla 20.

Tabla 20 Resultados de análisis del humedal de Gruta Xavier

Parámetro	Unidades	Valor actual	Valor de diseño	Valor recomendado / típico	
Período de retención hidráulico	horas	7.46	5 – 24	48 – 120	
Carga hidráulica	cm/día	96	-	40 – 75	
Remoción de DBO	Teórica	%	25	65	70 - 80
	Real	%	65		
	Afluente – Efluente promedio	mg/L	86 - 46	70 - 25	
Remoción de DQO	Real	%	50	65	70 - 80
	Afluente – Efluente promedio	mg/L	174 - 87	187 - 66	
	Teórica	%	69	87	75 - 85
Real	%	54			
Remoción de SST	Afluente – Efluente promedio	mg/L	41 - 19	187 - 25	-
	Teórica	%	66	99.99999	90
	Real	%	63		
Remoción de CF	Afluente – Efluente promedio	mg/L	4.3E+06 – 1.43E+06	-	-

Fuente: Elaboración propia

El período de retención hidráulico en humedales de flujo superficial se recomienda entre 2 – 5 días regularmente (referencia bibliográfica 4) para permitir que las plantas acuáticas y los rayos solares purifiquen el agua residual, por lo que actualmente el período de retención es bastante, no se está cumpliendo con los criterios. Sin embargo, en el diseño, se consideró un período de retención de entre 5 – 24 horas, debido a la existencia de las paredes deflectoras, las cuales tendrían un efecto positivo en la remoción de contaminantes debido a la provocación de un flujo pistón.

Cabe señalar también que los humedales de flujo superficial se diseñan bajo parámetros de efluente de materia orgánica, caudal y tirante de agua, para así encontrar el área superficial. Por lo que el período de retención hidráulico está en función de este resultado, y varía en base a los requerimientos del proyecto.

Respecto a la carga hidráulica, se recomiendan valores entre 40 – 75 cm/día para este parámetro (referencia bibliográfica 5), por lo que actualmente está por encima del valor recomendado. Esto es debido a un período de retención hidráulico bajo, ya que esto provoca que el humedal tenga una carga alta.

Por otra parte, los modelos de remoción teóricos de carga orgánica para humedales artificiales de flujo superficial están en función de la remoción de DBO_5 y de SST. Para la DBO_5 se utilizó el modelo de flujo pistón (referencia bibliográfica 4).

La eficiencia de remoción de DBO_5 bajo los parámetros de funcionamiento actuales es mayor que la eficiencia teórica ($65\% > 25\%$), y respecto al decreto 33-95, el sistema total está cumpliendo holgadamente ($25 \text{ mg/L} < 110 \text{ mg/L}$). Sin embargo, la eficiencia de humedales artificiales de este tipo para la DBO_5 normalmente está en el orden de entre 75 – 85% (referencia bibliográfica 5), y actualmente remueve el 65%.

En cuanto a la remoción de DQO, el sistema total también cumple holgadamente con la normativa nacional ($87 \text{ mg/L} < 220 \text{ mg/L}$), sin embargo, la eficiencia de este

tipo de humedales para la DQO normalmente está en el orden de entre 75-85 % (referencia bibliográfica 5) y actualmente está removiendo el 70%.

Respecto a la remoción de SST, la remoción esperada es mayor a la actual (69% > 54%), sin embargo, como ocurre con los parámetros anteriores, el efluente del sistema total está cumpliendo de sobremanera respecto a la normativa (19 mg/L < 100 mg/L). Las eficiencias de remoción para SST en este tipo de sistemas están en el orden de entre 70 – 80 % (referencia bibliográfica 5), y actualmente remueve el 50%.

Los resultados tanto teóricos como reales muestran eficiencias de remoción un poco bajas para humedales artificiales de flujo superficial, ya que generalmente remueven en el orden de entre 80 - 90 %, es decir, remueven alrededor de una unidad logarítmica (referencia bibliográfica 8). La eficiencia de remoción general de la planta con respecto a patógenos, en cuanto a su comparación con la normativa nacional, muestra que la planta no cumple con este parámetro ($1.6E+06$ NMP/100MI > $1E+03$ NMP/100mL).

Como se mencionó anteriormente, a la fecha de publicación del presente documento, ya se encuentra en vigencia el decreto 21-2017. La diferencia de este respecto al decreto 33-95 con relación a los parámetros que se están analizando en esta investigación (DBO, DQO, SST y CF), es que permite efluentes de CF de hasta $1E+05$ NMP/100mL. Por lo tanto, si el sistema se analizara respecto a dicho decreto, la DBO, DQO y SST cumplirían con la normativa, en tanto que los CF continuarían estando por encima del valor máximo permisible.

CAPÍTULO VI: OBRAS PROPUESTAS PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

6.1 Medidor de caudal

6.1.1 Dimensionamiento

El medidor de caudal que se diseñará consiste en una canaleta Parshall, que está formada por tres partes principales, entrada principal, la garganta o tramo angosto del canal y la salida o parte divergente.

El ancho de garganta “W” se seleccionó según el caudal que trata la planta (Tabla 21)

Tabla 21 Selección de ancho de garganta de medidor Parshall

W (pulg)	Capacidad (L/s)	
	Mínima	Máxima
3	0.85	53.8

Fuente: Manual de hidráulica, J.M. Azevedo y Guillermo Álvarez, 6ta edición

El caudal se encuentra dentro de la capacidad de un ancho de garganta “W” de 3 pulg, por lo tanto, se utilizó este valor. Y en base a este valor, se obtuvieron los valores en la tabla 22.

Tabla 22 Dimensiones de la canaleta Parshall

W	A	B	C	D	E	F	G	K	N
3	46.6	45.7	17.8	25.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7

Fuente: Manual de hidráulica, J.M. Azevedo y Guillermo Álvarez, 6ta edición

Los valores de la tabla 22 corresponden a las siguientes dimensiones de la canaleta:

W = Tamaño de la garganta (pulg).

A = Longitud de la pared lateral de la sección convergente (cm).

B = Longitud axial de la sección convergente (cm).

C = Ancho del extremo de aguas debajo de la canaleta (cm).

D = Ancho del extremo de aguas arriba de la canaleta (cm).

E = Longitud axial de la sección divergente (cm).

F = Longitud de la garganta (cm).

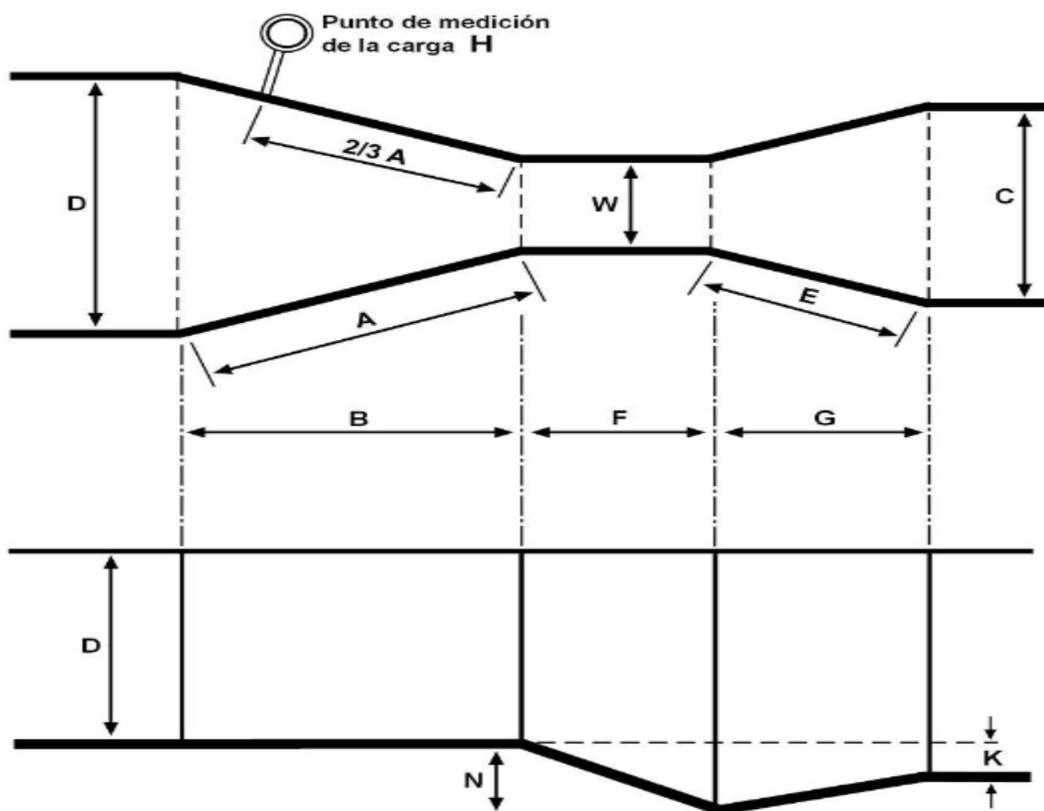
G = Longitud de la sección divergente (cm).

K = Diferencia de nivel entre el punto más bajo de la canaleta y la cresta (cm).

N = Profundidad de la depresión en la garganta debajo de la cresta (cm).

Los valores obtenidos en la tabla 22 se muestran en la figura 6.

Ilustración 11 Geometría de la Canaleta Parshall propuesta



Fuente: Manual de hidráulica, J.M. Azevedo y Guillermo Álvarez, 6ta edición

6.1.2 Punto de medición

La única medida de carga H necesaria para conocer el caudal, se hace en la sección convergente, en un punto que se localiza a 2/3 de la dimensión B o a 2/3 de A. En este punto se mide el tirante de agua con una regla o se instala junto a la pared una escala para lecturas.

6.1.3 Cálculo del caudal

Según experimentos y ensayos realizados utilizando canales Parshall se han obtenido ecuaciones para calcular el caudal de tipo potencial a través de la siguiente ecuación:

$$Q = K (H)^n$$

Donde el caudal “Q” está expresado en m³/s y el tirante de agua a medir en metros. La siguiente tabla muestra los valores de “k” y “n” en función del ancho de garganta “w” utilizado de 3 pulgadas:

Tabla 23 Constantes a utilizar para medir el caudal en la canaleta Parshall

W (pulg)	K	n
3	0.176	1.547

Fuente: Manual de hidráulica, J.M. Azevedo y Guillermo Álvarez, 6ta edición

Por lo tanto, la ecuación que se deberá utilizar para medir el caudal en la planta es:

$$Q = 0.176 (H)^{1.547}$$

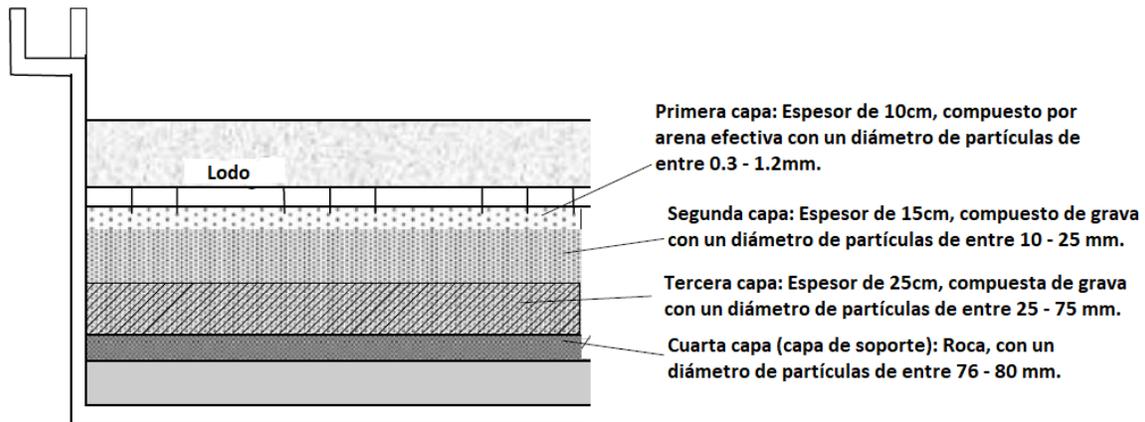
6.2 Ampliación del lecho de secado de lodos

Como se mencionó anteriormente, el volumen de lodo producido por tiempo de purga actual es de 10.50 m^3 , por lo que se necesita un lecho con una capacidad volumétrica de al menos este volumen, además que se requiere que la tasa de carga superficial de sólidos no exceda los $15\text{kgSST}/\text{m}^2$. Bajo este último requerimiento, se calculó un **área requerida de $35.28 \text{ m}^2 \approx 36 \text{ m}^2$** . La altura de la capa de lodo "Hs" al momento de la purga sería de:

$$H_s = (10.50 \text{ m}^3/\text{purga}) / 36 \text{ m}^2 = 0.29 \text{ m} = \mathbf{29 \text{ cm}}$$

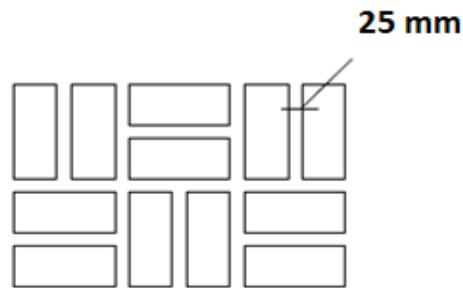
Asimismo, se propone la siguiente configuración de las capas filtrantes:

Ilustración 12 Configuración del medio filtrante del lecho de secado propuesto



En la parte superior se deberá colocar un arreglo de ladrillos, ordenados a como se muestra:

Ilustración 13 Arreglo de ladrillos a utilizar en la parte superior del lecho de secado



El sistema de drenaje se recomienda que se haga con tuberías de 100mm de diámetro (4 pulg) distribuidas en el fondo del lecho, que estén perforadas, con el objetivo de drenar todo el líquido que ha sido percolado a través de los medios filtrantes. La distancia entre tuberías debe ser no mayor que 3 metros, se propone 2 metros.

El fondo del lecho debe ser uniforme e impermeable, con una pendiente de 1% en la dirección del drenaje.

CONCLUSIONES

1. La planta de tratamiento de aguas residuales de la urbanización Gruta Xavier es eficiente operacionalmente, ya que cumple con la mayoría de los parámetros que se propusieron analizar de acuerdo a los rangos permisibles que la normativa nacional (decreto 33-95) establece, tales como demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales. El parámetro con el cual no se está cumpliendo son los coliformes fecales. Cabe mencionar que los coliformes fecales es un parámetro para los cuáles este tipo de tecnologías no son diseñados, por tanto, estos resultados no son de extrañar.

2. El período de retención hidráulico en los reactores UASB es considerablemente alto (25 horas). Como se mencionó anteriormente, los reactores UASB convencionales han ofrecido eficiencias de remoción de hasta un 85% de materia orgánica con un período de retención de entre 8 – 10 horas para el caudal medio. Esto tiene incidencias en la economía, ya que a pesar de que los reactores UASB actuales presentan eficiencias de remoción bastante buenas ($\approx 85\%$) en materia orgánica, asimismo necesitan un período de retención alto para lograr este cometido, lo que significa que el volumen del reactor debe ser mayor, y los costes de amplifican. Esto a su vez provocó velocidades de ascenso bajas (0.125m/h).

3. Demás parámetros, como la carga hidráulica, el período de retención hidráulico en el sedimentador y el área de influencia de las mangueras de distribución, están dentro de los rangos recomendados por la literatura.

4. En cuanto a la remoción de coliformes fecales de los reactores UASB, el resultado obtenido real bastante bueno (remoción de 92%), ya que estas tecnologías no son diseñadas para remover este contaminante (remueven alrededor del 70%, es decir, menos de una unidad logarítmica).

5. El tanque de secado de lodos no cumple con ninguno de los criterios de análisis, la tasa de carga superficial es demasiado alta y la capacidad volumétrica es demasiado baja. Como se mencionó, el jefe de la planta explicó que se están teniendo problemas con la purga de lodos, ya que el tanque es demasiado pequeño, por lo que se hace necesario la utilización de un hidrosuccionador al momento de la purga para vaciar el tanque, y el lodo hidrosuccionado por tanto no está secado.

6. En el Humedal artificial de flujo superficial el periodo de retención hidráulico es bastante bajo respecto a lo que recomienda la literatura relativa al tema (7.46 horas $\ll \approx 3$ días), por lo que ha sido una grata sorpresa encontrarnos con resultados de remoción de materia orgánica (DBO_5 , DQO y SST) que, si bien no son excesivos, si son bastante mayores que los teóricos esperados, y cumplen holgadamente con el decreto 33 – 95. Lo que significa que esta variante de humedales artificiales de flujo superficial con un flujo en laberinto, es decir, con paredes deflectoras, permite obtener eficiencias de remoción mayores. Asimismo, la remoción de coliformes fecales fue baja, tanto teóricamente como en la práctica, lo cual, así como en los reactores UASB, no es de sorprenderse, ya que esta tecnología no es diseñada para la remoción de patógenos, debido a que se necesitaría un área superficial con una magnitud alta.

RECOMENDACIONES

A) Es necesaria la construcción de un medidor de flujo en la entrada a la planta, ya que este parámetro es el más importante al momento de analizar el comportamiento del sistema de tratamiento.

B) Las dimensiones del lecho de secado de lodos no son las adecuadas, por tanto, es necesario realizar una ampliación del mismo, se necesita una capacidad volumétrica igual o mayor al volumen de lodos producido por los reactores en el tiempo de purga actual, es decir, al menos 10.5m^3 (actualmente se cuenta sólo con 1.67m^3).

C) Asimismo, se recomienda realizar un debido mantenimiento físico al sistema a través del protocolo de operación y mantenimiento elaborado por el Programa de Asistencia Técnica en Agua y Saneamiento – Cooperación Alemana (PROATAS – GIZ), el cual está en el presente documento en el Anexo D.

D) Se recomienda hacer un debido uso de los lirios acuáticos que se remueven diariamente del humedal de flujo superficial (sirve como comida para cerdos y ganado, abono orgánico, para hacer papel o carbón, cestos, tejas, etc.). También, se deben cosechar diariamente, de tal forma que siempre se tenga una cobertura del alrededor del 80% del área superficial.

BIBLIOGRAFÍA

1. Anaerobic sewage treatment, Van Handel, Lettinga, 1994, John Wiley & sons, Sussex, England.

2. PhD. Wolfgang Wagner. (2013). Análisis de eficiencia Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ciudad Sandino. Cooperación Alemana, 1, 20.

3. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo. (2007). Design of anaerobic reactors: Upflow anaerobic sludge blanket reactors. En Anaerobic reactors (82 – 115). Federal University of Minas Gerais, Brazil: IWA, London.

4. Ronald W. Crites, Joe Middlebrooks, Sherwood C. Reed. (2006). Free Water Surface Constructed Wetlands. En Natural Wastewater Treatment Systems (259 – 329). London: Taylor and Francis Group.

5. Msc Jaime Andrés Lara Barrero / PhD Miguel Salgot. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Barcelona, España: Instituto Catalán de Tecnología / Universidad Politécnica de Cataluña.

6. Cleverson Vitorio Andreoli, Marcos Von Sperling And Fernando Fernandes. Sludge Treatment and Disposal. En Sludge Drying Beds (92 – 96). IWA Publishing, London.

7. Metcalf and Eddy, (1995). Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. California: McGraw – Hill.

8. USA Environmental Protection Agency. (1,999). Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Cincinnati, Ohio: EPA.

9. Manuel Agustín Lux Monroy. (2010). Medidores de flujo en canales abiertos. 10/12/2017, de Universidad de San Carlos de Guatemala Sitio web: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3165_C.pdf

10. R.S. Ramalho. (1998). Tratamiento terciario de las aguas residuales. En Tratamiento de aguas residuales (636-642). Faculty of Science and Engineering, Laval University, Quebec Canadá: Reverté.

11. ENACAL. (2012). Proyecto: Ampliación de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Ciudad Sandino Fase I. 04/01/2018, de Gobierno de Nicaragua Sitio web: http://www.enacal.com.ni/noticias/Doc/DOCUMENTO2_.pdf

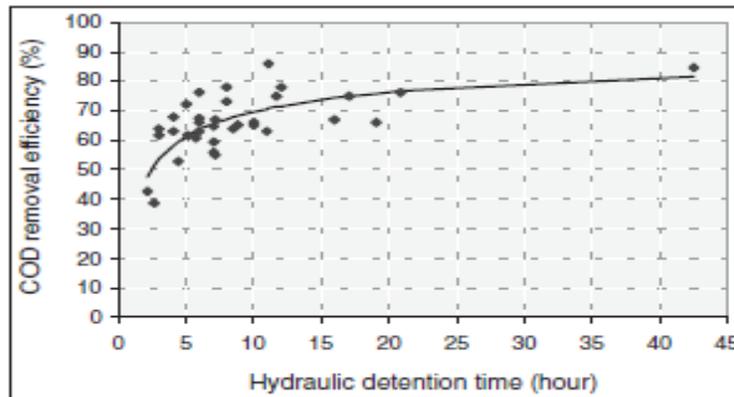
12. Instituto Nicaragüense de acueductos y alcantarillados ente regulador (INAA). (2005). Desinfección. En Guías técnicas para el diseño de alcantarillado sanitario y sistemas de tratamiento de aguas residuales (XII-1 - XII-2). Nicaragua: Gobierno de Nicaragua.

ANEXOS

ANEXO A: EFICIENCIA DE REMOCIÓN TEÓRICA DE MATERIA ORGÁNICA PARA REACTORES UASB

A.1 Demanda química de oxígeno

Eficiencia teórica de remoción de DQO de reactores UASB

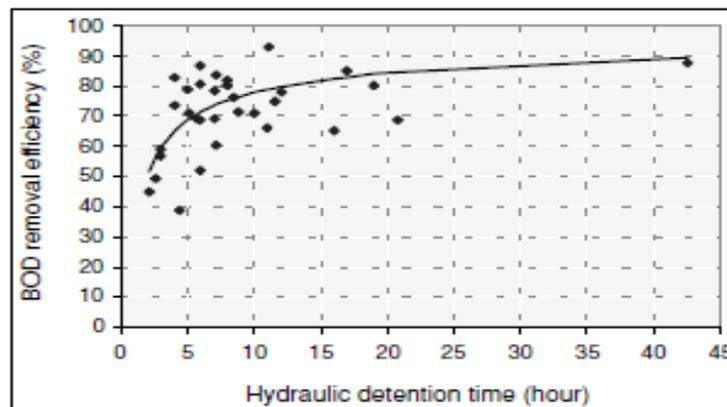


Fuente: Referencia bibliográfica 3

$$E = 100(1 - 0.68 x t^{-0.35})$$

A.2 Demanda bioquímica de oxígeno

Eficiencia de remoción teórica de DBO de reactores UASB

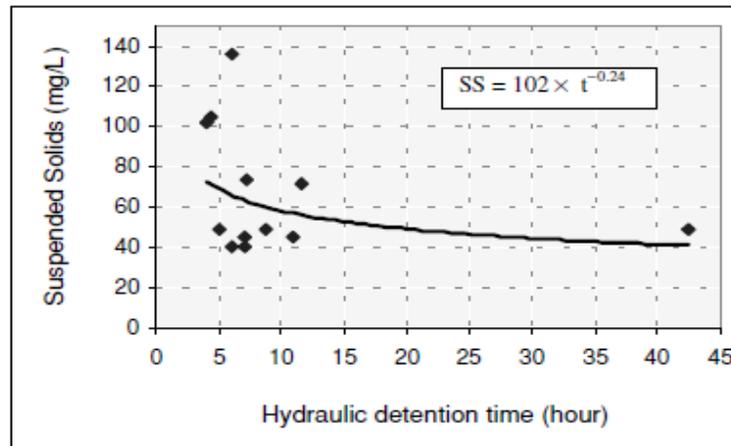


Fuente: Referencia bibliográfica 3

$$E = 100(1 - 0.7 x t^{-0.50})$$

A.3 Sólidos suspendidos totales

Efluente teórico de SST en reactores UASB

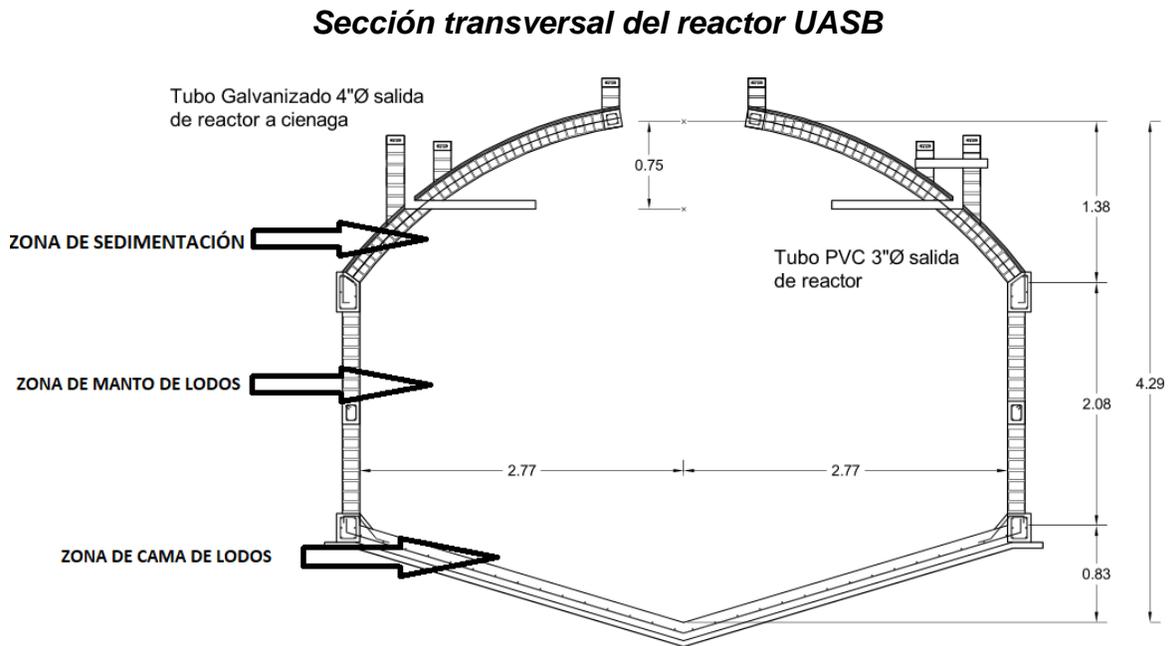


Fuente: Referencia bibliográfica 3

$$SS = 102 \times t^{-0.24}$$

ANEXO B. PLANOS

B.1 Reactores UASB

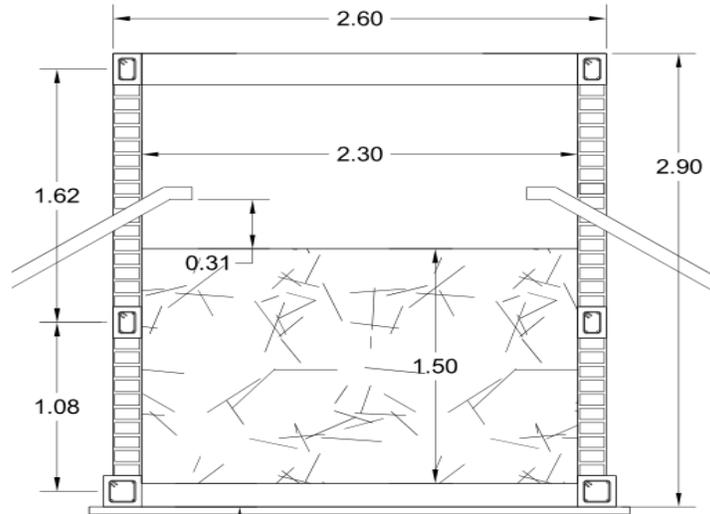


Fuente: Planos PTAR Gruta Xavier

Nota: las unidades están expresadas en metros.

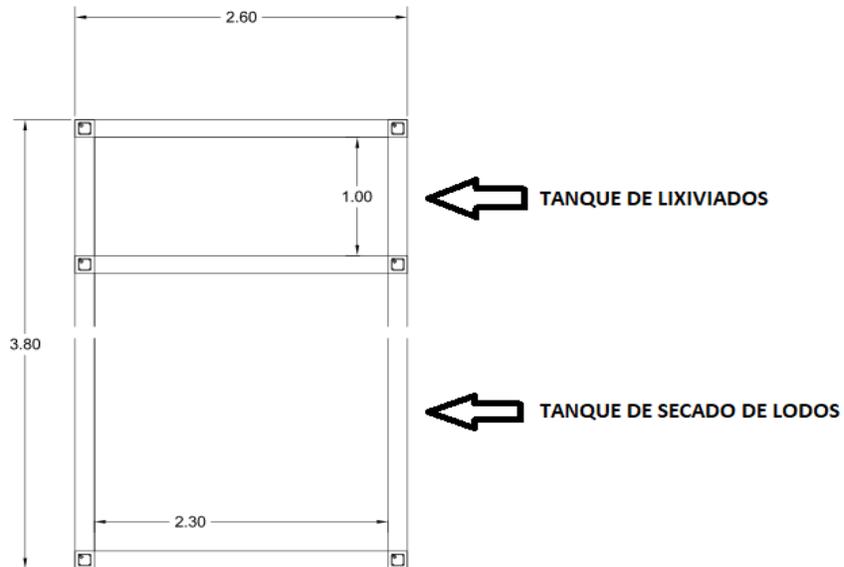
B.2 Lecho de secado de lodos

Sección transversal de lecho de secado de lodos de la PTAR Gruta Xavier



Fuente: Planos de la PTAR Gruta Xavier

Vista en planta del lecho de secado de lodos de la PTAR Gruta Xavier

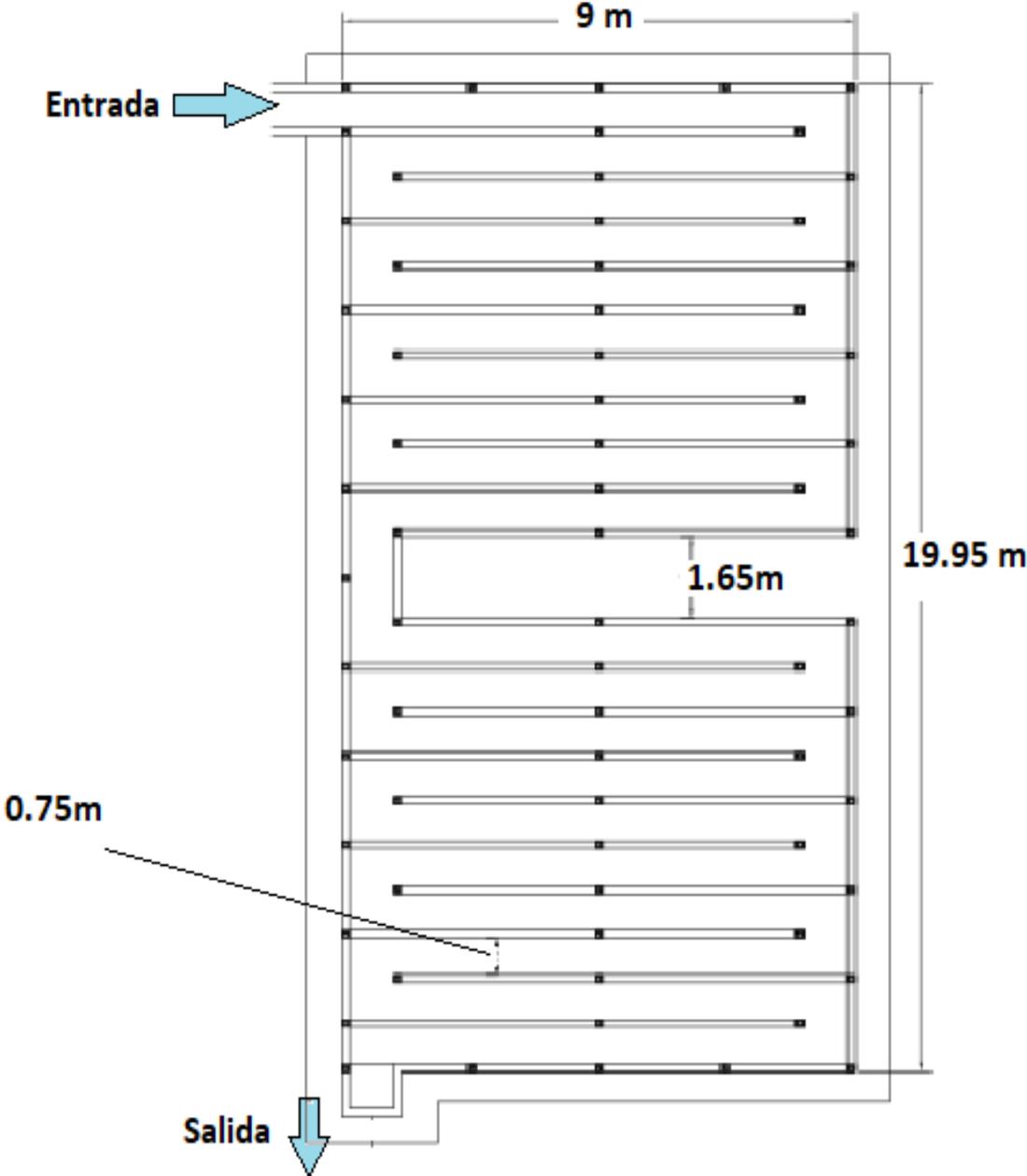


Fuente: Planos de la PTAR Gruta Xavier

Nota: las unidades están expresadas en metros.

B.4 Humedal artificial de flujo superficial

Vista en planta del humedal de la PTAR Gruta Xavier



Fuente: Planos de la PTAR Gruta Xavier

Nota: las unidades están expresadas en metros.

ANEXO C. FOTOGRAFÍAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Entrada del agua residual a la PTAR



Pre tratamiento (desarenador y rejillas)



Detalle del pre tratamiento



Canal de distribución de caudal del pre tratamiento a los reactores UASB



Reactor UASB #1



Reactor UASB #2



Lecho de secado de lodos



Tanque de lixiviados



Gasómetro



Punto de quema de gases almacenados en el gasómetro



Ingreso del agua residual proveniente de los reactores al humedal



Humedal artificial de flujo superficial



Salida del humedal



Detalle de salida del humedal



Pozos de absorción 1, 2 y 3



Pozos de absorción 4, 5 y 6

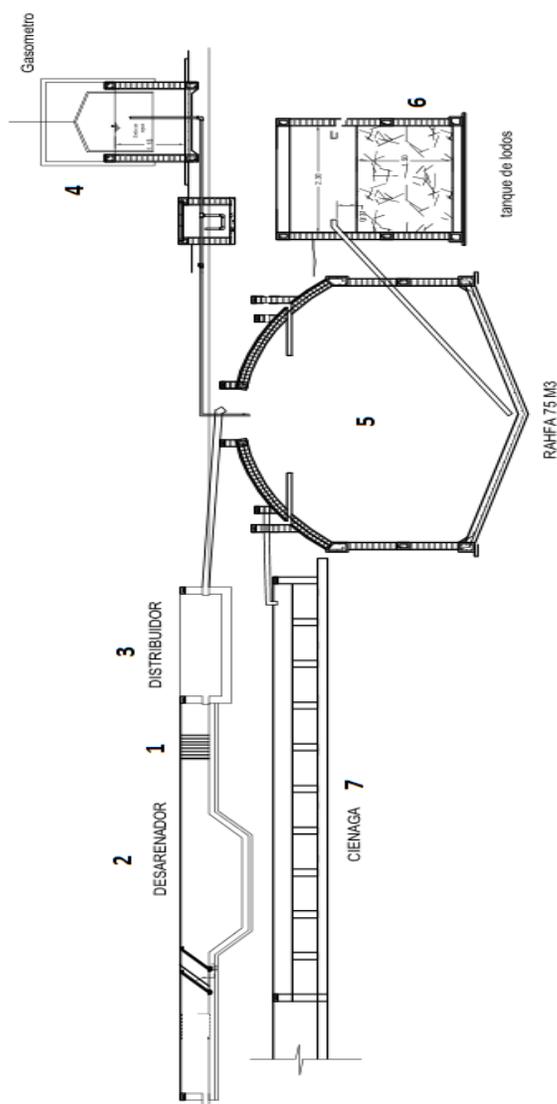


ANEXO D. PROTOCOLO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

PLANTA DE TRATAMIENTO

El siguiente esquema ideográfico muestra la ubicación de los puntos que en la tabla subsiguiente se mencionan para su debido mantenimiento:

Esquema ideográfico de la PTAR Gruta Xavier para protocolo de operación y mantenimiento



Fuente: Cooperación Alemana, PROATAS

D.1 Operación y Mantenimiento.

Manual de operación y mantenimiento de la planta Gruta Xavier

UBICACIÓN	PUNTO	MANTENIMIENTO		FRECUENCIA
Rejilla manual	1	Limpieza	Eliminar cualquier residuo sólido de gran tamaño	Diario
Desarenador	2	Operación de compuerta – Inicio	Cerrar las compuertas en la entrada y salida del canal a limpiar para evitar la llegada de agua.	Semanal
		Abrir la válvula de drenaje	Esta se ubica dentro de la caja de registro adherida al desarenador. Para ello existe una llave que permite la apertura y cierre de la válvula.	
		Limpieza de cámara de sedimentación	Desprender, remover y palear el material acumulado en el fondo y en las paredes de la cámara, utilizando rastrillo y pala. Continuar esta acción permitiendo la evacuación de arena y lodos por la tubería de drenaje.	
		Cerrar la válvula de drenaje	Una vez limpiado el canal se deberá cerrar la válvula que estaba abierta.	
		Operación de compuerta – final	Cerrar la compuerta que está a la salida del desarenador limpiado y seguidamente la compuerta que está a la entrada, para iniciar la operación de la unidad Repetir el mismo procedimiento en el otro canal desarenador.	
Caja distribuidora de caudal	3	Limpieza	Desprender y remover la arena, lodos y todo el material adherido en el fondo y en las paredes, utilizando escoba, pala y rastrillo.	Cada quince días
		Distribución	Asegurar que el agua sea distribuida equitativamente entre los reactores.	Diario
Gasómetro	4	Limpieza	De la válvula de seguridad	Mensual
			Del quemador o antorcha	Trimestral
Reactores	5	Limpieza	Caja de llegada al reactor y canal repartidor de caudal: Desprender y remover arena, lodos y todo el material adherido en el fondo y en las paredes, utilizando pala y escoba.	Semanal
			Espejo de agua: Remover natas, grasas y sólidos flotantes con un desnatador	Cada dos días
			Canal de recolección: Remover sólidos flotantes y material sedimentado en el fondo del canal.	Cada dos días
			Mangueras: Remover sólidos flotantes y material sedimentado en el compartimiento. Introducir varilla o agua a presión hasta eliminar la obstrucción.	Semanal
		Purga de lodos	Se debe verificar que el reactor a drenar esté lleno de agua. Abrir la válvula de purga para descarga de lodos del compartimiento a limpiar, cerrar las válvulas cuando el agua con lodos se observe diluida. Asegurarse de que el nivel del agua en el tanque nunca descienda a más de 70 cm.	Cada dos meses
Tanque de lodos	6	Limpieza	Extraer lodos acumulados en el fondo del lecho	Cada 3 meses
Ciénaga	7	Limpieza	Extraer todas las plantas que tengan una edad avanzada, es decir, con un color amarillento.	Diario
		Limpieza	Extraer lodos acumulados en el fondo del lecho	Semestral
Laboratorio		Registrar datos	Parámetros operacionales, PH, Temperatura y Sólidos Sedimentables a la entrada y salida de la planta	Mensual

