

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES  
DE CHIAPAS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL

**TESIS**

**TRATAMIENTO DEL AGUA DEL RÍO SABINAL POR  
MEDIO DE UN BIORREACTOR EMPACADO CON  
MATERIALES ESTABILIZADOS (BEME)**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA:

**SARAH CAROLINA ORDÓÑEZ PÉREZ**

DIRECTOR:

**DR. HUGO ALEJANDRO NÁJERA AGUILAR**



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Mayo de 2019

# DEDICATORIA

**AL DIOS DE ISRAEL,  
CREADOR DEL  
UNIVERSO;**

Por haberme dado la vida, por  
sus bendiciones y estar  
conmigo en todo momento,  
por guiarme y ayudarme en  
cada etapa de mi vida y poder  
alcanzar esta meta.

**A MIS HERMANAS;**

Por ser de una u otra  
forma un soporte para  
mí, al apoyarme siempre  
que necesité de ustedes.

Por creer en mí para  
culminar con mis  
estudios universitarios,  
animándome a seguir  
adelante.

**A MIS PADRES;**

Por brindarme su apoyo  
incondicional, dándome  
estabilidad emocional y  
económica, para lograr  
cumplir esta meta.

Por hacer de mí una buena  
persona, inculcándome  
valores, conocimientos,  
experiencias, que han  
permitido desarrollarme en  
todos los ámbitos de la vida.

Porque me han motivado  
con el ejemplo, a ser una  
profesionista aprovechando  
las oportunidades que se  
nos presentan sin tener  
miedo a nada.

# AGRADECIMIENTOS

**A LA UNIVERSIDAD DE  
CIENCIAS Y ARTES DE  
CHIAPAS (UNICACH);**

Por abrir sus puertas y dar la  
oportunidad a jóvenes como  
nosotros de formarnos  
Profesionalmente.

**A MIS MAESTROS;**  
Quienes nos brindaron  
conocimientos y consejos a lo  
largo de esta etapa para ser  
mejores profesionistas.

**A LA ESCUELA DE  
INGENIERÍA AMBIENTAL;**

Por formarme profesionalmente  
como ingeniero ambiental, para  
obtener conocimientos y apoyarme  
con equipo de laboratorio para la  
realización del proyecto.

**A MIS AMIGOS;**  
Que directa o indirectamente,  
participaron en esta etapa de  
estudios, aportando  
conocimientos y  
recomendaciones, dando  
consejos y apoyando con su  
ánimo y con su grata amistad.

**A MI DIRECTOR;  
DR. HUGO ALEJANDRO NÁJERA  
AGUILAR;**

Por su dedicación, guía y apoyo durante  
todo el trabajo de investigación y  
mientras han durado mis estudios en la  
UNICACH.

# ÍNDICE GENERAL

	Páginas
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	8
2.3 Aguas residuales.....	8
2.3.1 Origen de las aguas residuales.....	8
2.3.2 Composición de las aguas residuales .....	9
2.3.3 Estado de las aguas residuales .....	11
2.3.4 Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales .....	12
2.4 Tratamiento de las aguas residuales .....	16
2.4.1 Tratamientos biológicos .....	17
2.5 Residuos sólidos .....	19
2.6 Materiales estabilizados.....	21
CAPÍTULO III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	22
3.1 Objetivo general .....	22
3.2 Objetivos específicos.....	22
3.3 Hipótesis.....	22
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA .....	23
4.1 Obtención del material estabilizado (ME).....	23
4.2 Definición del agua problema.....	25
4.3 Dimensionamiento y empacado del reactor.....	26
4.4 Monitoreo del funcionamiento del biorreactor .....	27

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN...	29
5.1 Resultados .....	29
5.1.1 Caracterización del agua problema .....	29
5.1.2 Resultados de color .....	29
5.1.3 Evaluación de la remoción de la DQO .....	30
5.1.4 Resultados de turbiedad .....	31
5.2 Discusión de resultados .....	32
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES .....	34
CAPÍTULO VII. REFERENCIAS Y ANEXOS.....	35
7.1 Referencias .....	35
7.2 Anexos.....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del diseño, configuración y distribución del oxígeno en el SAARB .....	6
Figura 2. Zona clausurada del relleno sanitario .....	23
Figura 3. Área de excavación de ME.....	24
Figura 4. Cribado de residuos estabilizados.....	24
Figura 5. Distribución del ME para facilitar el proceso de secado.....	24
Figura 6. Punto de muestreo en el Parque del Oriente, Tuxtla Gutiérrez Chiapas. Coordenadas: Latitud: 16°45'33.44"N y Longitud 93° 5'17.20"O.....	25
Figura 7. Biorreactor para el tratamiento de muestras de agua del río Sabinal 1) Influyente, 2) ME, 3) material de soporte, 4) depósito para efluente.....	26
Figura 8. Biorreactor construido con las especificaciones antes mencionadas.....	27
Figura 9. Obtención de muestra en el río Sabinal, lado Oriente, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.....	27
Figura 10. Caldo nutritivo.....	28
Figura 11. Apariencia del agua residual antes y después del tratamiento .....	29
Figura 12. Evaluación de color .....	30
Figura 13. Evaluación de la DQO .....	31
Figura 14. Evaluación de turbiedad.....	31
Figura 15. Alimentación del biorreactor con muestras de agua del río Sabinal .....	40
Figura 16. Determinación de turbiedad .....	40
Figura 17. Determinación de color verdadero... ..	40
Figura 18. Preparación de tubos de digestión para la determinación de DQO .....	40

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica de aguas residuales domésticas no tratadas.....	10
Tabla 2. Procesos de descomposición de los residuos en un sitio de Disposición final .....	20
Tabla 3. Características de los residuos estabilizados .....	21
Tabla 4. Parámetros medidos y normas aplicadas .....	25
Tabla 5. Características del influente.....	29

## RESUMEN

Las aguas residuales sin un adecuado manejo implican graves problemas de contaminación cuando se descargan en los cuerpos de agua y de salud pública cuando llegan a las fuentes de abastecimiento, por lo que es necesario la implementación de tecnologías adecuadas que ayuden a tratar las aguas residuales. Para el presente estudio se tomaron residuos sólidos con edad superior a 8 años (materiales estabilizados), extraídos de la zona clausurada del relleno sanitario de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Posteriormente, estos residuos fueron utilizados como material de empaque dentro de un biorreactor semiaeróbico debido a su alta riqueza biológica, con el objetivo de evaluar la eficiencia de remoción de carga orgánica de las aguas residuales del río Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. La operación del biorreactor fue monitoreada durante 22 semanas ensayando con dos cargas hidráulicas de 50 y 100 L/m<sup>3</sup> d, teniendo como variables respuesta la DQO, color y turbiedad. El influente presentó bajos valores promedio en DQO (25 mg/L), color (90 Pt-Co) y turbiedad (3.0 UNT), con valores mayores en los parámetros a la salida del sistema. Los resultados obtenidos reflejaron que no es recomendable utilizar el sistema BEME para tratar aguas residuales con baja carga orgánica medida como DQO, color y turbiedad.

**Palabras clave:** *Materiales estabilizados; tratamiento de aguas residuales; biorreactor; demanda química de oxígeno.*

# INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios son una de las técnicas más comunes para la gestión de los residuos sólidos producidos por las ciudades del mundo. El relleno sanitario es una obra de infraestructura que controla los impactos ambientales para la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU).

Sólo en Chiapas existen 34 rellenos sanitarios (Tiempo y forma, 2017), pero aún hay muchos municipios del estado que cuentan con un Tiradero a Cielo Abierto (TCA), y que no es para nada la mejor opción para disponer los RSU. El estado también protege su patrimonio natural en materia de aguas. En Tuxtla Gutiérrez existen dos Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR): Paso Limón y Tuchtlán, el tratamiento de aguas residuales tiene como objetivos disminuir las cargas contaminantes de aguas tratadas y que cumplan con la normatividad aplicable para ser vertidas en cauces federales; y producir agua de reúso para actividades agrícolas y de servicios municipales (SMAPA, 2013). Un problema con las PTAR son los lodos que generan, que representan alrededor del 50% del costo total del tratamiento de las aguas residuales (Water Environment Federation, 2000).

En la actualidad, los estudios se han enfocado en alternativas de tratamiento para las aguas residuales más amigables y de menores costos en su operación.

Un estudio reciente es el realizado por Bautista *et al.* (2018) en donde extrajeron residuos sólidos de 8 años del relleno sanitario de Tuxtla Gutiérrez, más específicamente, en la zona clausurada. Utilizaron este material como empaque en un sistema denominado Biorreactor Empacado con Material Estabilizado (BEME) o SAARB por sus siglas en inglés, para evaluar el tratamiento de lixiviados. El sistema BEME es una novedosa técnica de tratamiento de lixiviados, en el cual se utilizan residuos sólidos de edad avanzada, mismos que contienen largas y diversas poblaciones de microorganismos que se han aclimatado a altas concentraciones de contaminantes por años, lo que les confiere una gran capacidad para descomponer materia orgánica refractaria (Li *et al.*, 2009). Derivado con lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica de las aguas residuales provenientes del río Sabinal de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, utilizando un biorreactor empacado con material estabilizado (BEME).

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo demográfico, la urbanización, la industria y la agricultura han incrementado el uso del agua. Lo cual, ha llevado a la escasez de este recurso. Sin embargo, a pesar de las condiciones en que se presenta, algunos usuarios no toman en cuenta el impacto al medio ambiente que se genera al satisfacer sus necesidades. Puesto que las diferentes actividades realizadas generan diversos desechos, los cuales son la principal causa de las alteraciones a los cuerpos de agua. Ocasionando pérdida de biodiversidad y afectaciones a la salud pública.

La descarga de aguas residuales de origen urbano proviene de viviendas, edificios públicos y de la escorrentía urbana que se colecta en el drenaje. Sus principales contaminantes son el nitrógeno y fósforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales, materia orgánica, entre muchos otros (Jiménez, *et al.*, 2010).

Las aguas residuales, antes de ser vertidas en los cuerpos de agua, deben recibir un tratamiento adecuado, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, para evitar que su disposición cause los problemas antes mencionados y pueda reutilizarse. El grado de tratamiento requerido en cada caso para las aguas residuales deberá responder a las condiciones de los influentes.

Los principales desafíos para las tecnologías de tratamiento de aguas residuales son la eliminación de nitrógeno y fósforo totales. Se consideran el foco en el desarrollo de una nueva tecnología de tratamiento de aguas residuales (Zhao *et al.*, 2007). En México los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales incluyen lodos activados, lagunas de estabilización, lagunas aireadas, filtros biológicos, reactor anaerobio de flujo ascendente y otros. Durante el año 2015, las 2 477 plantas en operación a lo largo del país trataron 120.9 m<sup>3</sup>/s, es decir el 57.0% de los 212.0 m<sup>3</sup>/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2016). A nivel nacional, menos de una tercera parte de la carga contaminante es removida de las aguas negras (Reforma, 2014).

En particular, en el estado de Chiapas, en todas las corrientes de esta región existe algún grado de contaminación. Generalmente se deben a las descargas de aguas residuales de origen doméstico y a la utilización de agroquímicos diversos en la producción agrícola y ganadera

(Instituto Estatal de Agua del Estado de Chiapas, 2013). Existen 135 puntos de descargas de aguas residuales sin tratamiento y el 79% de estos puntos se localiza en ríos y arroyos. Esto debido a que sólo en 9 municipios o en una fracción de ella, las aguas residuales reciben tratamiento (INEGI, 2010).

El Programa Nacional Hídrico 2013-2018, señala que los principales problemas en múltiples lugares del país son: falta de recursos financieros para la construcción, rehabilitación y mantenimiento de la infraestructura para el tratamiento; altos costos de energía eléctrica y reactivos químicos para la operación; falta de capacitación del personal operativo; y deficiente cultura de pago del usuario por los servicios de saneamiento. A lo anterior, también debe sumarse la falta de voluntad política en la atención y seguimiento a las obras de saneamiento en general.

Existen técnicas de tratamiento de aguas residuales a las que se les puede denominar alternativas, debido a que no son consideradas convencionalmente por los órganos de gobierno, pero que pueden ser parte de la respuesta para el tratamiento, y en particular para aquellas áreas dispersas, que no cuentan ni con la cultura, ni con los recursos financieros para ello, pero sobretodo, este tipo de técnicas siguen la dinámica de la naturaleza (Díaz *et al.*, 2012).

En la última década se ha evaluado un mecanismo para la descontaminación de lixiviados utilizando biofiltros de residuos viejos o residuos estabilizados, como es al caso de Zhi *et al.* (2013), quienes desarrollaron un biofiltro semi-aeróbico con residuos estabilizados para eliminar la materia orgánica y los contaminantes nitrogenados. También se ha evaluado para el tratamiento de otros tipos de aguas residuales. Los residuos viejos contienen un amplio espectro y una gran cantidad de microorganismos, que han demostrado tener una fuerte capacidad de descomposición para la materia orgánica biodegradable y refractaria presente en algunas aguas residuales (Zhao *et al.*, 2007).

Es evidente las implicaciones que con llevan las descargas directas de aguas residuales debido a la disminución de la calidad del agua. Es por esto por lo que el grado de importancia del uso de técnicas y métodos de tratamiento de aguas ha aumentado. Ya que en diversas naciones se han establecido normas que rigen los límites máximos permisibles de dichas descargas.

# CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

En la última década se han desarrollado y evaluado biofiltros de basura vieja o residuo estabilizado para la descontaminación de lixiviados como es el caso de Zhi-Yong *et al.* (2011), quien desarrolló un biofiltro semi aeróbico con residuos estabilizados (semi-aerobic aged refuse biofilter: SAARB). Como se muestra en la Figura 1.

Se evaluó la capacidad de rendimiento, la capacidad de tratamiento, los mecanismos de descontaminación y los parámetros óptimos de rendimiento, en un experimento de periodo único. El SAARB mejoró notablemente la capacidad de tratamiento y la eficiencia de la eliminación de la materia orgánica y los contaminantes nitrogenados debido a la alternación de las zonas aeróbico-anóxico-anaeróbica in situ.

La reducción de la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) y el nitrógeno total (NT) superó el 98, 94 y 80%, respectivamente. Después de que el lixiviado se distribuyó en la superficie SAARB, la velocidad del efluente disminuyó como una función logarítmica, y hubo una reducción concomitante en el volumen de efluente de lixiviado.

La altura efectiva de los residuos estabilizados en un SAARB fue suficiente con 900 mm. Se podría lograr una excelente eficiencia de tratamiento a 20-35 °C, con una distribución de lixiviados de 1 h, una vez cada período de 2-3 días, carga hidráulica de 11-30 L /m<sup>3</sup>-día. Este nuevo sistema SAARB demuestra una eficacia superior para el biofiltro en comparación con otros sistemas (ARB, por sus siglas en inglés), especialmente para la eliminación de nitrógeno en lixiviados.

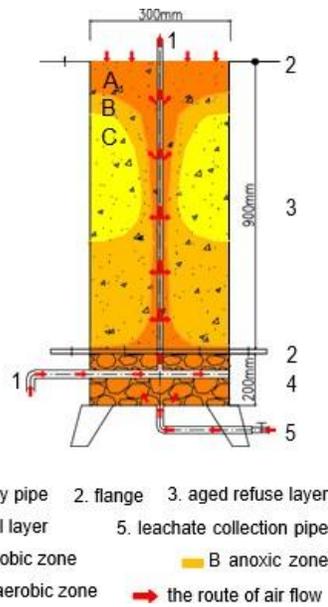


Figura 1. Esquema del diseño, configuración y distribución del oxígeno en el SAARB (Zhi-Yong *et al.*, 2011).

Otros trabajos son los reportados por He *et al.* (2006) y Long *et al.* (2008), donde se usó un ARB para el tratamiento de lixiviados. Este sistema eliminó la materia orgánica de manera efectiva, pero el nitrógeno amoniacal disminuyó solo ligeramente debido a las condiciones anaeróbicas dentro del ARB sellado. Con el fin de resolver este problema, He *et al.* (2007) diseñaron un biofiltro de basura envejecido en torre (TARB) con tres vías respiratorias para mejorar la tasa de eliminación de contaminantes, especialmente  $\text{NH}_4\text{-N}$ , y lograron tasas de eliminación de contaminantes que van desde 88.8 a 98.3%. La tasa de eliminación de NT, sin embargo, se mantuvo baja (21.5-65.2%).

Estudios posteriores (Tao *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2009) combinaron dos o tres biofiltros de residuos estabilizados en serie para formar un biofiltro de residuos de varias etapas (MARB) que podría tratar el lixiviado con mayor eficacia que el TARB. Sin embargo, la eficiencia de remoción TN del TARB aún no alcanzó los requisitos de protección ambiental debido a la ausencia de circulación de aire. Además de las deficiencias del TARB, una gran superficie también restringió la aplicación de MARB. Turgut *et al.* (1998) instalaron una bomba de aire en la parte inferior del reactor para formar zonas aeróbicas, anaeróbicas y anóxicas de abajo hacia arriba, y lograron una conversión de nitrógeno del 95% pero con un mayor consumo de energía.

El sistema SAARB presenta una condición favorable para el crecimiento y la reproducción de diversos microorganismos, lo que lleva a una mayor eficiencia de degradación de la materia orgánica y de contaminantes a base de nitrógeno. El aire ingresa naturalmente al SAARB desde la tubería de recolección de lixiviado y la tubería de la vía aérea, debido a que fueron ampliados y también a través de la superficie superior del SAARB, en una trayectoria circular, formando zonas aerobias, anóxicas y anaerobias (Zhi-Yong *et al.*, 2011).

Por otro lado, se ha desarrollado y evaluado este sistema biológico para el tratamiento de aguas residuales de alcantarillas como es el caso de Zhao *et al.* (2007), quienes ensayaron con aguas residuales tomadas de los sistemas de tuberías de alcantarillado en las áreas del centro de Shanghai. Típicamente usaron 120 kg de residuos estabilizados con un diámetro inferior a 15 mm en un biorreactor de forma redonda con un diámetro interno de 80 cm y una altura de 150 cm. Las aguas residuales con concentraciones iniciales de DQO, DBO y NH<sub>3</sub>-N de 400-500, 240-300 y 45-50 mg/L, respectivamente, se introdujeron en el biorreactor. Las concentraciones correspondientes en el efluente se redujeron a menos de 80-100, 10-20 y 10-15 mg/L, respectivamente, a una carga hidráulica de 1000-1200 L/m<sup>3</sup> de desechos / día, y las eficiencias del tratamiento disminuyeron al aumentar la carga hidráulica.

El mecanismo de tratamiento también fue estudiado. Se encontró que las eficiencias de eliminación de contaminantes disminuyeron drásticamente cuando los residuos estabilizados en el biorreactor se desinfectaron preliminarmente usando soluciones de NaClO, lo que indica que los contaminantes en las aguas residuales se eliminaron biológicamente.

Este mismo sistema también ha comenzado a ensayarse en países como México, tal es el caso del trabajo reportado por Bautista *et al.* (2018), quienes evaluaron la operación de dos biorreactores dispuestos en serie a lo largo de un año bajo cuatro cargas hidráulicas de lixiviados (10.5, 18, 26 y 41 L/ m<sup>3</sup>-d). La máxima eficiencia promedio alcanzada por el sistema fue del 80% tanto en DQO como en color, esto se logró cuando el sistema fue operado con una carga hidráulica de 18 L/m<sup>3</sup>-d (Bautista *et al.*, 2018).

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.3 Aguas residuales

Por aguas residuales se entiende a la acción y efecto en la que el hombre introduce materias contaminantes, formas de energía o inducir condiciones en el agua de modo directo o indirecto; implica alteraciones perjudiciales de su calidad con relación a los usos posteriores o con su función ecológica. Estas aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias. El agua residual está compuesta de componentes físicos, químicos y biológicos; es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos (Díaz *et al.*, 2012).

#### 2.3.1 Origen de las aguas residuales

Aguas residuales industriales: Son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras.

Aguas residuales municipales: Son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado.

Aguas residuales domésticas: Son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente (OEFA, 2014).

Las aguas residuales domésticas contienen los productos de las actividades hogareñas tales como materias fecales, residuos y productos de la limpieza (partículas y sales eliminadas con el agua; los productos de limpieza como detergentes y jabones) y de la cocina (diversos productos orgánicos). Dando como resultado una variedad de agua residual doméstica la cual podemos clasificar de la siguiente manera:

- Aguas Negras. Proceden de los inodoros, son aguas con sólidos, elementos en suspensión y elevada carga orgánica.
- Aguas Grises. Proceden de lavamanos, duchas y bañeras, son aguas con carga orgánica media.
- Aguas Pluviales. Proceden del agua de lluvia recogida en los tejados y cubiertas de las edificaciones, poseen baja carga orgánica, pero deben ser depuradas para su vertido o reutilización (Covarrubias *et al.*, 2011).

### 2.3.2 Composición de las aguas residuales

La composición de las aguas residuales es muy variable debido a los diversos factores que lo afectan. Entre éstos se tiene el consumo promedio de agua por habitante y por día que afecta su concentración (cantidad) y los hábitos alimenticios de la población que caracteriza su composición química (calidad).

En general, las aguas residuales contienen aproximadamente un 99.9% de agua y el resto está constituido por materia sólida. Los residuos sólidos están conformados por materia mineral y materia orgánica. La materia mineral proviene de los subproductos desechados durante la vida cotidiana y de la calidad de las aguas de abastecimiento. La materia orgánica proviene exclusivamente de la actividad humana y está compuesta por materia carbonácea, proteínas y grasas (Covarrubias *et al.*, 2011). Ver Tabla 1.

Tabla 1. Composición típica de aguas residuales domésticas no tratadas (Spellman, 2014).

<b>Característica</b>	<b>Concentración</b>
<b>Color</b>	Gris
<b>Olor</b>	Rancio
<b>Oxígeno disuelto</b>	>1.0 mg/L
<b>pH</b>	6.5–9.0
<b>SST</b>	100–350 mg/L
<b>DBO<sub>5</sub></b>	100–300 mg/L
<b>DQO</b>	200–500 mg/L
<b>Caudal</b>	100–200 galones por persona por día
<b>Nitrógeno total</b>	20–85 mg/L
<b>Fósforo total</b>	6–20 mg/L
<b>Coliformes fecales</b>	500,000–3,000,000 NMP/100 mL

### 2.3.3 Estado de las aguas residuales

La extensión y la naturaleza de la descomposición bacteriana de los sólidos en las aguas residuales, ha dado origen a ciertos términos que describen las condiciones o estado de las aguas residuales.

#### Aguas residuales frescas

Como su nombre lo indica, son las aguas residuales en su estado inicial, inmediatamente después de que se han agregado los sólidos al agua. Contienen el oxígeno disuelto presente en el agua del abastecimiento y permanecen frescas mientras haya oxígeno suficiente para mantener la descomposición aeróbica. Tales aguas residuales son turbias, con sólidos en suspensión o flotando, de color grisáceo y tienen un olor mohoso no desagradable.

#### Aguas residuales sépticas

El término describe a las aguas negras en las que se ha agotado completamente el oxígeno disuelto, de manera que han entrado en descomposición anaerobia los sólidos con la consiguiente producción de ácido sulfhídrico y de otros gases. Tales aguas residuales se caracterizan por su color negruzco, su olor fétido y desagradable, y por tener sólidos suspendidos y flotantes de color negro.

#### Aguas residuales estabilizadas

Son las aguas residuales en las que los sólidos han sido descompuestos hasta sólidos relativamente inertes que no están sujetos a descomposiciones ulteriores, o que son descompuestos muy lentamente. El oxígeno disuelto está nuevamente presente por haber sido absorbido de la atmósfera; su olor es ligero o nulo, y tiene pocos sólidos suspendidos (Bautista, 2011).

## 2.3.4 Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales

Las aguas residuales tienen propiedades Físicas, Químicas y Biológicas, y cada una de estas propiedades está relacionada entre sí, una interactúa con la otra, una propiedad física tan variable como es la temperatura puede afectar la actividad biológica y también a la cantidad de gases disueltos (Bautista, 2011).

### Características físicas

#### Temperatura

El valor de temperatura es un criterio de calidad del agua para la protección de la vida acuática y para las fuentes de abastecimiento de agua potable (NMX-AA-007-SCFI-2000). Si bien el líquido cloacal doméstico tiene una temperatura un poco más elevada que el agua suministrada, encontrar líquidos con temperaturas muy elevadas nos indica que se está produciendo una descarga industrial o comercial. El líquido en tales condiciones produce el deterioro de la red cloacal y en caso de llegar sin modificación al sitio de disposición final, provocaría alteraciones en el medio ambiente (Orellana, 2005).

#### Turbidez

La turbiedad en agua se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas. La determinación de la turbiedad es muy útil como indicador de la calidad del agua, y juega un papel muy importante en el desempeño de las plantas de tratamiento de agua, formando como parte del control de los procesos para conocer cómo y cuándo el agua debe ser tratada (NMX-AA-038-SCFI-2001). Si la turbidez del agua es alta, las plantas producen menos oxígeno y con ello bajan los niveles de Oxígeno Disuelto (OD).

#### Color

El color en el agua puede deberse a la presencia del contenido natural de metales o iones metálicos en disolución, humus o residuos orgánicos, plancton o desechos industriales. Por lo general se elimina el color para cualquier propósito de uso del agua (NMX-AA-045-SCFI-2001).

Los efluentes domiciliarios tienen color gris cuando es fresco y al envejecer toman un color negro brillante. Cualquier variante indica la presencia de residuos industriales y su color nos puede indicar de qué producto se trata (Orellana, 2005).

## Olor

El olor de las aguas residuales domésticas se debe principalmente a los gases producidos en la descomposición de la materia orgánica (Sepellman, 2014). El olor es indicativo de su vejez, pues cuando es fresco es ligeramente pútrido, pero cuando es viejo se septiza y produce hidrógeno sulfurado que le confiere un olor fuertemente pútrido (Orellana, 2005).

## Sólidos

La mayoría de los contaminantes que se encuentran en las aguas residuales se pueden clasificar como sólidos. El tratamiento de aguas residuales generalmente está diseñado para eliminar sólidos o convertir los sólidos a una forma que sea más estable o que pueda eliminarse. Los sólidos se pueden clasificar por su composición química (orgánica o inorgánica) o por sus características físicas (sedimentables, flotantes y coloidales) (Spellman, 2014).

## Características químicas

### Alcalinidad

La alcalinidad es una medida de la capacidad de las aguas residuales para neutralizar los ácidos. Se mide en términos de alcalinidad de bicarbonato, carbonato e hidróxido. La alcalinidad es esencial para amortiguar (mantener el pH neutro) de las aguas residuales durante los procesos de tratamiento biológico (Spellman, 2014).

### Materia orgánica

Dentro de la materia orgánica se pueden encontrar proteínas (restos de origen animal y vegetal), hidratos de carbono (restos de origen vegetal), las grasas y aceites (residuos de cocina e industria). Estas van en aumento cada año, y este hecho ha complicado notablemente los procesos de tratamiento de aguas residuales debido a la dificultad o la extrema lentitud de los procesos de descomposición biológica de estos compuestos (Bautista, 2011).

## Materia inorgánica

Las concentraciones de sustancias inorgánicas incrementan en el agua al tener contacto con los minerales y las rocas, ya que parte de estas se disuelven al entrar en contacto; la evaporación de los ríos trae como consecuencia la exposición del material sedimentado, que debilita su constitución y facilita su arrastre, dejando material inorgánico en el agua (Bautista, 2011).

## Cloruros

La cantidad de cloruros por habitante es constante y aproximadamente de 15 gr. /día, por lo que son un indicio de la concentración del efluente. Cuando encontramos mayor concentración en el efluente, esto puede deberse a volcados no domiciliarios y si esta es mucho menos, es indicativo de infiltraciones provenientes de la capa freática.

## Potencial de hidrógeno (pH)

En un efluente doméstico alcanza un valor aproximado de 7 u 8 de pH. Cuando es más bajo indica la existencia de volcamientos ácidos y si es alto, estos son alcalinos y ambos provienen de comercios o industrias. En cualquier caso, son perjudiciales para las cañerías, equipos de bombeo e impactan en los sitios de disposición final (Orellana, 2005).

## Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Se define como la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar por acción bacteriana aeróbica, la materia orgánica degradable en un lapso de 5 días, a la temperatura de 20 °C. El ensayo de DBO es el que mejor permite apreciar cual será la cantidad de oxígeno que probablemente consumirán las bacterias de un curso de agua al recibir la descarga contaminante (Orellana, 2005).

## Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO o Demanda Química de Oxígeno es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica y oxidable presente en un agua residual. Es por tanto una medida representativa de la contaminación orgánica de un efluente siendo un parámetro para controlar dentro de las distintas normativas de vertidos y que nos da una idea muy real del grado de toxicidad del vertido. Existen distintas formas de disminuir la DQO como los tratamientos físico-químicos, la electrocoagulación y el ozono (Hidritec, 2016).

## Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno que está presente en el agua, puede ser un indicador de cuan contaminada está el agua (Peña, 2007).

En un cuerpo de agua se produce y a la vez se consume oxígeno. La producción de oxígeno está relacionada con la fotosíntesis, mientras el consumo dependerá de la respiración, descomposición de sustancias orgánicas y otras reacciones químicas. También puede intercambiarse oxígeno con la atmósfera por difusión o mezcla turbulenta. La concentración total de oxígeno disuelto (OD) depende del balance entre todos estos fenómenos (Goyenola, 2007).

## Características biológicas

Las aguas negras contienen también incontables organismos vivos, la mayoría de los cuales son demasiado pequeños para ser visibles, excepto bajo el microscopio. Son la parte viva natural de la materia orgánica que se encuentra en las aguas negras y su presencia es de suma importancia porque son uno de los motivos para el tratamiento de estas aguas, incluyendo la degradación y descomposición también dependen de sus actividades. Puede decirse, que ellos son los trabajadores que emplea un operador de plantas de tratamiento de aguas negras y que su éxito puede medirse por su conocimiento, atención a los gustos y aversiones de sus hábitos nutritivos y ambientales (Bautista, 2011).

Los microorganismos de interés en la contaminación del agua son los virus, las bacterias, los protozoarios y los huevos de helminto. Estos agentes microbiológicos representan uno de los mayores problemas para la salud pública en México ya que las enfermedades gastrointestinales ocupan un lugar importante en las causas de mortandad en el país. Para controlar la incidencia de las enfermedades gastrointestinales hay que eliminarlos del agua para consumo humano, y reducir su presencia en usos recreativos y en el agua para riego de vegetales que se consumen crudos (Arce *et al.*, s. f.).

## 2.4 Tratamiento de las aguas residuales

El propósito principal del tratamiento del agua residual es remover el material contaminante, orgánico e inorgánico, el cual puede estar en forma de partículas en suspensión y/o disueltas, con objeto de alcanzar una calidad de agua requerida por la normativa de descarga o por el tipo de reutilización a la que se destinará. El objetivo de depurar un agua residual se logra mediante la integración de operaciones (físicas) y procesos (químicos y biológicos) unitarios. Los primeros hacen uso, como su nombre lo indica, de procesos físicos (uso de la gravedad, filtración por retención física, atracción electrostática, etc.) y de procesos químicos (coagulación, absorción, oxidación, precipitación, etc.). El segundo tipo involucra la degradación o transformación del material orgánico por medio de microorganismos. Dentro de los sistemas biológicos existen los sistemas aerobios (requieren oxígeno molecular disuelto) y los anaerobios (funcionan sin oxígeno). Rubro aparte merecen los sistemas naturales construidos, los cuales aprovechan las transformaciones que se llevan a cabo en el medio natural, solamente que en estas unidades se busca incrementar su capacidad de tratamiento en unidades de proceso controladas. Tal es el caso de los humedales artificiales o el tratamiento mediante descargas directas a suelo (Noyola *et al.*, 2013).

El tratamiento de aguas residuales es una serie de pasos. Cada uno de los pasos se puede llevar a cabo utilizando uno o más procesos de tratamiento o tipos de equipos. Las principales categorías de pasos de tratamiento son las siguientes:

1. Tratamiento preliminar: elimina los materiales que podrían dañar el equipo de la planta o que ocuparían la capacidad de tratamiento sin ser tratado.
2. Tratamiento primario: elimina los sólidos sedimentables y sedimentables (puede no estar presente en todas las plantas de tratamiento).
3. Tratamiento secundario: elimina el  $\text{DBO}_5$  y se disuelve y Materia orgánica en suspensión coloidal por acción biológica; los orgánicos se convierten en sólidos estables, dióxido de carbono y más organismos.

4. Tratamiento avanzado de aguas residuales: utiliza procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar la DBO<sub>5</sub>, los sólidos y los nutrientes adicionales (no están presentes en todas las plantas de tratamiento).

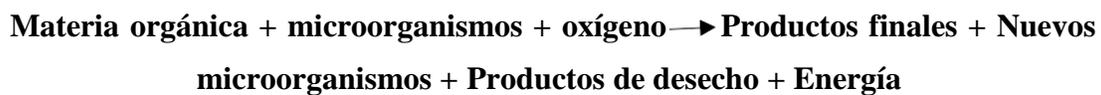
5. Desinfección: elimina microorganismos para excluir o reducir la posibilidad de enfermedad cuando se descarga el flujo.

6. Tratamiento de lodos: estabiliza los sólidos extraídos de las aguas residuales durante el tratamiento, desactiva los organismos patógenos y reduce el volumen de los lodos al eliminar el agua (Spellman, 2014).

## 2.4.1 Tratamientos biológicos

Los procesos biológicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales reducen contaminantes complejos (materia orgánica) a elementos básicos tales como bióxido de carbono, agua, gases de nitrógeno y otros que no son perjudiciales para el ambiente; de manera que se utilizan para convertir la materia orgánica que se encuentra finamente dividida y disuelta en el agua residual a sólidos sedimentables floculentos que puedan separarse en lances de sedimentación. El objetivo principal que persigue el tratamiento biológico del agua residual doméstica es disminuir el contenido orgánico (López, 2010). La remoción de materia orgánica soluble puede llevarse a cabo a través de procesos biológicos aerobios o anaerobios. En ambos casos, los microorganismos utilizan la materia orgánica como fuente de energía y carbono, y generan nueva biomasa, además de productos de oxidación (Díaz *et al.*, 2002).

El mecanismo de oxidación biológica se encarga de degradar la materia orgánica presente en el agua residual de la siguiente forma:



Pérez (2012), menciona que algunos sistemas de tratamiento secundario son:

A. Sistemas de lecho fijo:

En este tipo de procesos se emplea un soporte fijo donde se desarrolla el crecimiento microbiano. Por lo general se emplea un reactor cilíndrico relleno de un material de gran

superficie específica sobre el que se crea una biopelícula. Se realiza una aireación, bien natural o forzada, para así mantener la actividad biológica. Las sustancias contaminantes se difunden junto con el oxígeno presente en el aire a través de la biopelícula hasta los microorganismos asimiladores. Los lechos bacterianos (o filtro biológico) reduce el índice de  $DBO_5$  hasta un 80%. El agua penetra al filtro y mediante una serie de tubos u orificios se distribuye a lo largo de toda la superficie soporte. Conforme el agua discurre, la película va siendo arrastrada, creándose nueva película en estas zonas.

#### B. Tecnologías blandas:

Fundamentalmente se emplean lagunas, reduciendo el coste de las operaciones y basándose en la actividad natural del medio. El tratamiento consiste en almacenar las aguas residuales durante un tiempo y favorecer el crecimiento y la actividad microbiana en ellas. Según el mecanismo que actúe las lagunas pueden ser aerobias, facultativas o anaerobias, pudiendo combinarse y realizar un tratamiento completo del agua.

#### C. Fangos Activados:

Se trata del proceso que se emplea mayoritariamente fundamentada en dos operaciones: la oxidación y la separación sólido-líquido. La oxidación tiene lugar en el tanque de aireación o reactor biológico, donde la población microbiana entra en contacto con el agua residual. El cultivo biológico o licor mezcla se agrupa con la materia orgánica en flóculos. Una vez que la materia orgánica ha sido oxidada, el licor mezcla se traslada a un decantador donde se produce la separación sólido-líquido. Parte de los fangos obtenidos son recirculados al reactor biológico para mantener la concentración de microorganismos. Por otro lado, el exceso de fangos es conducido hasta otra zona donde son tratados.

## 2.5 Residuos sólidos

Los residuos sólidos, también llamados basura o desechos, son el remanente del metabolismo de los organismos vivos y de la utilización o descomposición de los materiales vivos o inertes mediante la transformación de energía. Se le considera un contaminante cuando por su cantidad, composición o particular naturaleza sea de difícil integración a los ciclos, flujos y procesos ecológicos normales. Los residuos sólidos cada vez aumentan más y cada vez tiene menos contenidos biodegradables y más contaminantes peligrosos (Jiménez, 2006).

La ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (2003), clasifica a los residuos en: residuos peligrosos, residuos sólidos urbanos (RSU) y de manejo especial; los RSU los define como los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole.

El manejo adecuado de los RSU tiene como objetivo final, además proteger la salud de la población, reduciendo su exposición a lesiones, accidentes, molestias y enfermedades causadas por el contacto con los desperdicios, evitar el impacto potencial que podrían ocasionar sobre los ecosistemas. Sin embargo, la situación del manejo de estos residuos dista mucho de ser la adecuada a lo largo del país. Aún a la fecha es relativamente común que los residuos se depositen en espacios cercanos a las vías de comunicación o en depresiones naturales del terreno como cañadas, barrancas y cauces de arroyos. En el ciclo de vida de los residuos, después de su generación existen diversas etapas importantes para su manejo, entre las que destacan su recolección, reciclaje y disposición final.

La disposición final de los residuos se refiere a su depósito o confinamiento permanente en sitios e instalaciones que permitan evitar su presencia en el ambiente y las posibles afectaciones a la salud de la población y de los ecosistemas. En el país se cuenta con dos tipos de sitios de disposición final: los rellenos sanitarios y los rellenos de tierra controlados (SEMARNAT, s.f).

En cuanto a los procesos de descomposición de los residuos, su carácter aerobio o anaerobio es determinado por la existencia o falta de oxígeno dentro del relleno. En caso de suficiente oxígeno los microorganismos presentes en los residuos contribuyen a la descomposición aerobia de la materia orgánica. El proceso es fomentado parcialmente por el aire atrapado en el relleno, mientras las capas superficiales reciben cierta aireación incluso desde la atmósfera. En la descomposición anaeróbica de los residuos, algunos organismos anaerobios trabajan juntos para llevar a cabo la conversión de la fracción orgánica de los residuos en un producto final estable (Tchobanoglous, 1998).

Los productos de la descomposición aeróbica generalmente son: bióxido de carbono, amoníaco y agua, así como productos de oxidación, en menor proporción. Cabe mencionar que en sitios de disposición final pueden existir condiciones mixtas o bacterias facultativas que respondan a ambos ambientes, favoreciendo al mismo tiempo la descomposición aerobia y anaerobia. En la Tabla 2 se presenta un resumen de las condiciones y resultados de los procesos de descomposición de los residuos en un sitio de disposición final (Kiss & Encarnación, 2006).

Tabla 2. Procesos de descomposición de los residuos en un sitio de Disposición final (Kiss & Encarnación, 2006).

<b>Procesos</b>	<b>Descomposición aerobia</b>	<b>Descomposición anaerobia</b>	<b>Lixiviación</b>
<b>Requisitos</b>	<b>Oxígeno disponible, menos humedad.</b>	<b>Falta de oxígeno, más humedad.</b>	<b>Gran volumen de agua, cubierta permeable.</b>
<b>Temperatura</b>	<b>50-70°C</b>	<b>35-50°C</b>	<b>-----</b>
<b>Reacciones</b>	<b>Oxidación, nitrificación.</b>	<b>Reducción, desnitrificación.</b>	<b>Disolución, hidrolisis</b>
<b>Consecuencias</b>	<b>Mineralización, esponjamiento.</b>	<b>Consolidación, Solidificación</b>	<b>Aumento de la permeabilidad, acumulación de contaminantes.</b>
<b>Productos</b>	<b>CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, productos de oxidación.</b>	<b>Ácidos orgánicos, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, lixiviado.</b>	<b>Lixiviado</b>

## 2.6 Materiales estabilizados

Los desechos en vertederos pueden alcanzar un estado de estabilización después de años de degradación, y los desechos resultantes parcial o totalmente estabilizados así obtenidos se conocen como "residuos viejos" (Zhao *et al.*, 2007) o "materiales estabilizados" (Bautista *et al.*, 2018), este último término será utilizado para el resto del documento. Los materiales estabilizados, tienen la característica de poco peso volumétrico, alta porosidad, alto contenido orgánico y capacidad de intercambio catiónico, así como una buena capacidad de adsorción. Además, gracias a la gran población bacteriana que existe en ellos, es un tipo de medio biológico con un rendimiento excelente. Por lo tanto, los materiales estabilizados pueden usarse para tratar aguas residuales, siempre que las condiciones sean apropiadas (Fangfang *et al.*, 2012). En la Tabla 3 se muestran las características de los residuos sólidos estabilizados.

Tabla 3. Características de los residuos estabilizados (Zhi *et al.*, 2013).

<b>Parámetros</b>	<b>Residuo estabilizado</b>
<b>Humedad (%)</b>	31.84
<b>Cenizas (%)</b>	54.42
<b>Materia combustible (%)</b>	13.74
<b>Materia biodegradable (%)</b>	11.08
<b>Materia orgánica (g/kg)</b>	65.57
<b>Nitrógeno Total (g/kg)</b>	5.38
<b>Nitrógeno amoniacal (mg/kg)</b>	22.40

## CAPÍTULO III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### 3.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción de carga orgánica en muestras de agua del río Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, por medio de un biorreactor empacado con materiales estabilizados (BEME).

### 3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el agua del río Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, midiendo los parámetros fisicoquímicos de DQO, Color, turbiedad y pH, de acuerdo con las normas técnicas mexicanas correspondientes.
- Construir un biorreactor empacado con materiales estabilizados (BEME) para el tratamiento de las muestras de agua del río Sabinal.
- Monitorear el funcionamiento del sistema BEME a través de la remoción de carga orgánica (DQO, color y turbiedad) a diferentes cargas hidráulicas.

### 3.3 Hipótesis

El agua que corre por el río Sabinal es agua contaminada que puede ser tratada eficientemente por medio de un biorreactor empacado con materiales estabilizados (BEME).

## CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

### 4. 1 Obtención del material estabilizado (ME)

El ME utilizado como empaque del biorreactor fue obtenido de la extracción de muestras simples tomadas del área clausurada del relleno sanitario de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México (Figura 2); con una edad mínima estimada de 8 años.



Figura 2. Zona clausurada del relleno sanitario.

Se llevó a cabo la excavación en el relleno sanitario antes mencionado, después de consultar con el personal del lugar, acerca de las zonas de mayor edad dentro de las 12 Has, se determinó el punto para llevar a cabo la excavación. Con la ayuda de una excavadora, se obtuvieron las muestras de residuos estabilizados, se estimó que estos residuos contaban con una edad mínima de ocho años (Figura 3).

En el punto de muestreo, los residuos fueron extraídos a una profundidad de 3 metros, con la finalidad de tener certeza que se tomaba el material con las características requeridas. Durante el proceso se procuró evitar el material de excesivo tamaño, por medio del proceso de cribado, obteniendo un tamaño de partícula de 2 a 40 mm, previo al cual se retiró tela, vidrio, cartón, fragmentos de roca, metales, plásticos, y en general materiales voluminosos que pudieran entorpecer el proceso (Figura 4).



Figura 3. Área de excavación de ME.



Figura 4. Cribado de residuos estabilizados.

Los residuos estabilizados se transportaron a las instalaciones de la escuela de Ingeniería Ambiental con los cuidados correspondientes. Posteriormente, se adecuó una pequeña área, en donde el material fue distribuido en una lona para realizar el proceso de secado a temperatura ambiente y de esta manera facilitar la clasificación del material (Figura 5). Este material se utilizó como empaque del biorreactor.



Figura 5. Distribución del ME para facilitar el proceso de secado.

## 4.2 Definición del agua problema

Las aguas residuales para tratar fueron tomadas de un punto del río Sabinal, lado Oriente, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Figura 6). Estas muestras se caracterizaron con los siguientes parámetros: Demanda química de oxígeno (DQO), color, turbiedad y pH, siguiendo las normas mexicanas correspondientes, como se muestra en la Tabla 4.



Figura 6. Punto de muestreo en el Parque del Oriente, Tuxtla Gutiérrez Chiapas.  
Coordenadas: Latitud: 16°45'33.44"N y Longitud: 93° 5'17.20"O.

Tabla 4. Parámetros medidos y normas aplicadas.

Parámetros	Normas aplicadas
<b>DQO</b>	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
<b>Color</b>	NMX-AA-045-SCFI-2001
<b>Turbiedad</b>	NMX-AA-038-SCFI.2001
<b>pH</b>	NMX-AA-008-SFCI-2011

### 4.3 Dimensionamiento y empacado del reactor

Basándonos en el biorreactor construido por Zhi-Yong *et al.* (2011), se construyó un biorreactor con un tubo de pvc de 15.24 cm de diámetro y 156 cm de altura. En el fondo del biorreactor se colocó una capa de material de soporte (grava) de 10 cm. La tapa del tubo colocada en el extremo inferior fue perforada para permitir la salida del efluente. Se cubrió el material de soporte con malla sombra, para evitar el exceso en el arrastre de las partículas finas y estas pudieran obstruir los orificios de la tapa, dificultando la salida del efluente. En el volumen restante del tubo se agregó el material estabilizado. Teniendo un lecho filtrante de 140 cm de altura. Una vez construido, se adicionó una base para sostener al biorreactor. Como se muestra en la Figura 7.

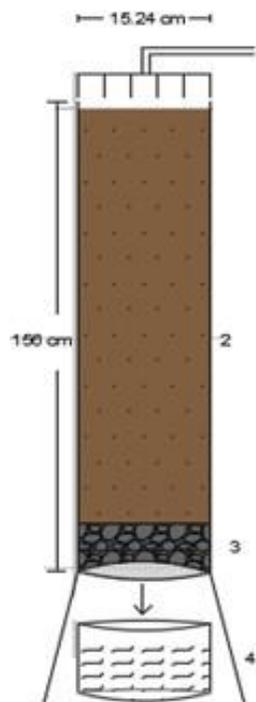


Figura 7. Biorreactor empacado para el tratamiento del agua del río Sabinal. 1) Influyente, 2) ME, 3) material de soporte, 4) depósito para efluente.

Se empacó el biorreactor con el ME para evaluar el tratamiento del agua que corre por el río Sabinal (Figura 8).



Figura 8. Biorreactor construido con las especificaciones antes mencionadas.

#### 4.4 Monitoreo del funcionamiento del biorreactor

El biorreactor fue alimentado diariamente y el monitoreo de la calidad del influente y efluente fueron realizados una vez por semana; determinando los parámetros de DQO, color y turbiedad, de acuerdo con las normas y métodos correspondientes. Durante las 22 semanas de monitoreo, el sistema fue evaluado con dos cargas hidráulicas, 50 y 100 L/m<sup>3</sup> d (Figura 9).



Figura 9. Obtención de muestra en el río Sabinal, lado Oriente, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Para la carga del influente se utilizó un recipiente simulador de una regadera, para favorecer la distribución del agua problema sobre el área superficial y su descenso por el material filtrante. Antes de empezar con el monitoreo del biorreactor, se aplicó un caldo nutritivo como medio rico para el cultivo de microorganismos (Figura 10). Posteriormente, previo a la alimentación del biorreactor, la muestra recolectada fue filtrada a través de malla sombra, para retener parte de los sólidos de mayor tamaño que pudiera influir en la salida del efluente y posteriormente se dejó sedimentar por una hora, la zona clarificada fue utilizada en la alimentación.



Figura 10. Caldo nutritivo.

La eficiencia del sistema BEME se determinó mediante la estimación del porcentaje de remoción de los parámetros medidos del influente (DQO, color y turbiedad) en el periodo de tiempo de 22 semanas (Ec.2).

$$\% \text{ De remoción} = [(C_i - C_f) / C_i] \times 100 \quad 2)$$

Dónde:  $C_i$ : Concentración inicial.  $C_f$ : Concentración final.

# CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 5.1 Resultados

### 5.1.1 Caracterización del agua problema

En la Tabla 5, se presenta la caracterización de la corriente del agua en el punto de muestreo considerado (Latitud: 16°45'33.44"N y Longitud: 93° 5'17.20"O) del río Sabinal, lado Oriente de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, durante la tercera semana de mayo.

Tabla 5. Características del influente.

Parámetro	Resultado (semana 1)
pH	7.44
Color (Pt-Co)	82
Turbiedad (UTN)	1.46
DQO (mg/L)	20

### 5.1.2 Resultados de color

En la Figura 11, se muestra la apariencia del color del influente antes de haber aplicado el tratamiento y el del efluente una vez pasado por el sistema BEME.



Figura 11. Apariencia del agua residual antes y después del tratamiento.

En tanto que en la Figura 12, se observa la evaluación de color en el efluente durante 22 semanas de monitoreo, en temporada de lluvia (junio - octubre) y de estiaje (marzo - abril), en el cual se aprecia un aumento en las unidades de color en los efluentes obtenidos. Sin embargo, a partir de la semana 3 el color de éste fue disminuyendo considerablemente en el transcurso de las semanas de monitoreo, hasta igualarse con los valores del influente.

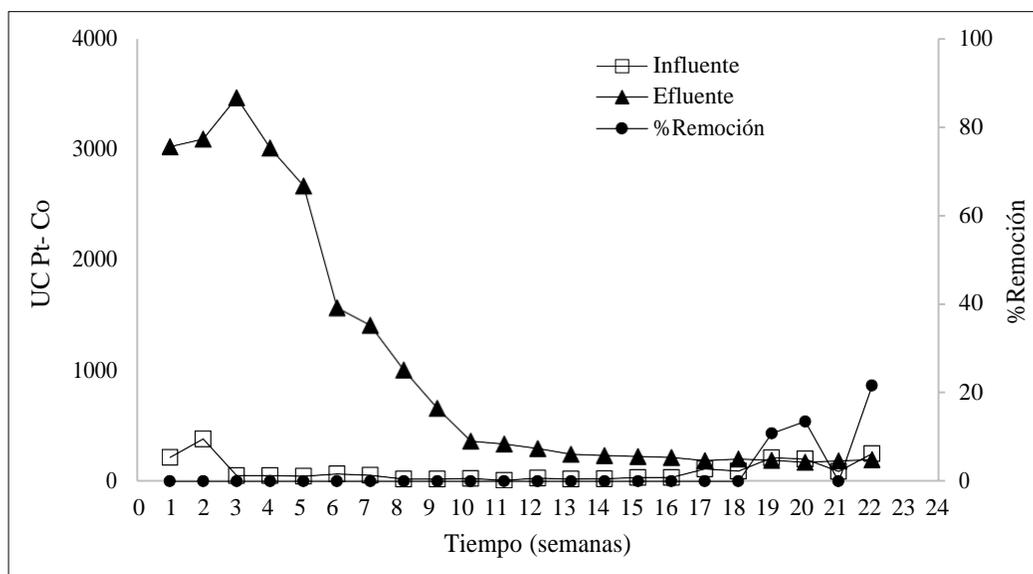


Figura 12. Evaluación de color.

### 5.1.3 Evaluación de la remoción de la DQO

En la Figura 13, se observan los resultados de la evaluación de la DQO en el efluente, una vez pasado por el biorreactor durante 22 semanas de monitoreo, en el cual no se aprecia remoción de este parámetro, aunque para las últimas semanas de monitoreo, los valores de influente y efluente se asemejaron.

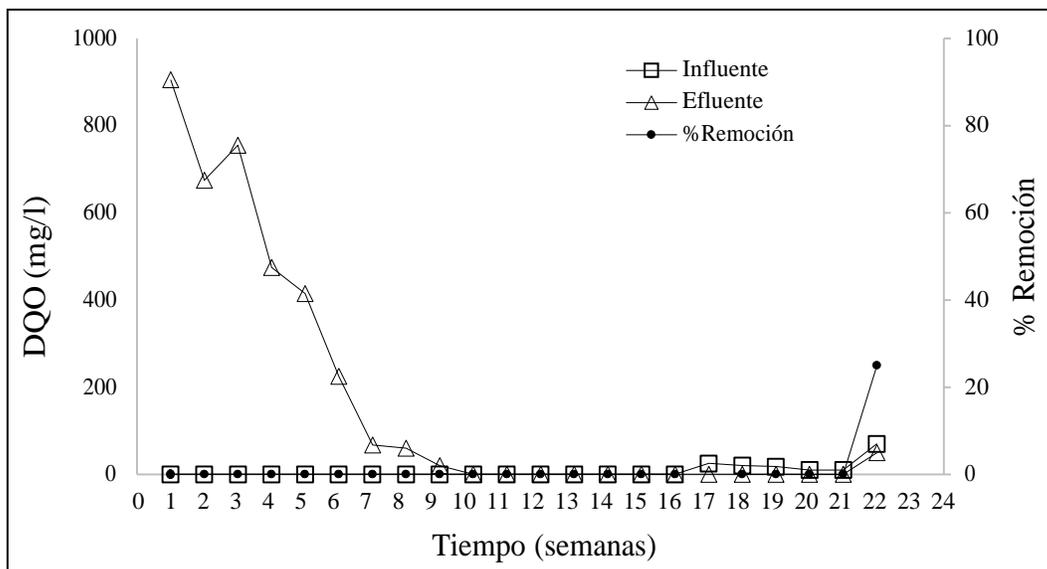


Figura 13. Evaluación de la DQO.

### 5.1.4 Resultados de turbiedad

En la Figura 14, se observa la evaluación de turbiedad en el efluente durante 16 semanas. El primer periodo de evaluación de este parámetro, se llevó a cabo de la tercera semana de junio a la cuarta semana de agosto y el segundo periodo de evaluación fue de la primera semana de marzo a la segunda semana de abril. En la Figura 14 se aprecia remoción de este parámetro en las últimas semanas.

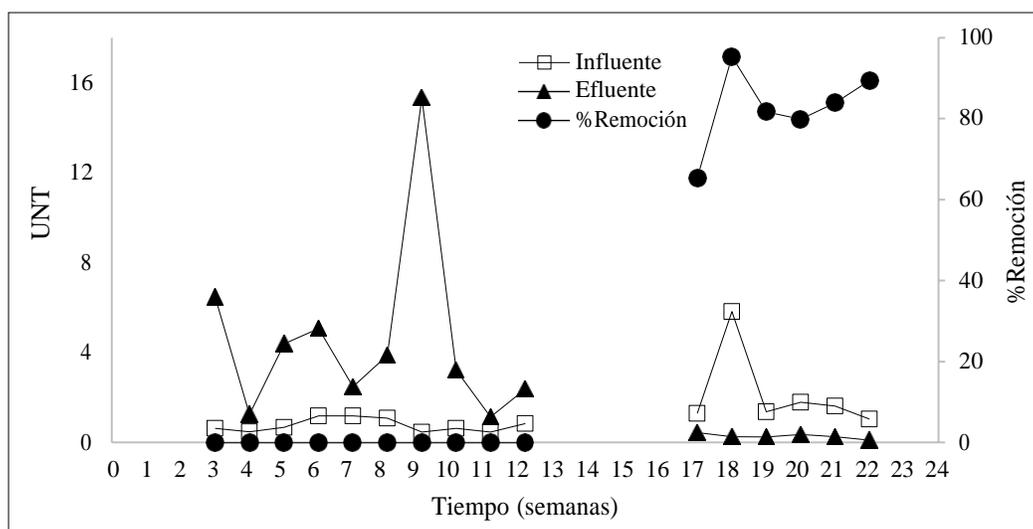


Figura 14. Evaluación de turbiedad.

## 5.2 Discusión de resultados

Los residuos estabilizados presentaron un ligero olor al ser extraídos y tendidos, pero durante el proceso de secado a temperatura ambiente, estos presentaron un olor nulo, sin que hubiera presencia de moscas en los alrededores ni de lixiviados. Estas observaciones coinciden con lo reportado por Zhao *et al.* (2007).

Las muestras analizadas tuvieron una coloración ligeramente amarilla, olor desagradable, de aspecto ligeramente turbio y con un pH que osciló de 7.0 – 8.5, lo cual no fue un inconveniente al alimentar el biorreactor, ya que este puede operar adecuadamente con valores de pH en el influente en el rango de 6.0 a 9.5 (Bautista, 2018). Por lo que toca a la DQO, el agua a tratar, presentó concentraciones muy bajas, la mayoría de ellos no brindaron la absorbancia suficiente para ser leídas en la ecuación de la curva de calibración, teniendo como valores más altos 70 mg/L, que al compararlos con los valores de DQO dados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010) para definir la calidad para cuerpos de agua superficiales, se encuentra en la clasificación de ligeramente contaminada, para sus valores más críticos.

De la Figura 13, se observa que los valores de DQO en el efluente para las primeras ocho semanas de monitoreo, fueron superiores a los registrados en el influente, sin embargo, para las siguientes semanas se tuvieron valores similares de DQO en ambos casos, influente y efluente, lográndose apreciar como máxima remoción un 25%, durante la última semana de monitoreo, en comparación al estudio realizado por Zhao *et al.* (2007), quienes obtuvieron remociones de al menos 80% después de someterse al proceso de tratamiento por el sistema (BEME), sin embargo, la calidad del influente en dicho estudio tuvo una DQO mayor (400-500 mg/L) que los valores registrados en el presente estudio (0 - 70 mg/L).

Respecto a la Figura 12, se observa que el color en el efluente fue casi siempre superior al del influente, mostrando el efluente un color oscuro, con un valor que osciló entre los 170 – 3500 unidades de color (Pt-Co). Las unidades de color en el influente estuvieron alrededor de 20 - 250 unidades de color, por lo que se presentó una remoción de color mínima del 20% durante el tiempo de monitoreo. Se puede observar que las unidades de color del efluente disminuyeron en el transcurso del tiempo de monitoreo, hasta igualarse con los valores del influente.

En tanto que en la Figura 14, se observa que la turbiedad en el efluente durante las primeras 10 semanas de monitoreo, fueron superiores a los registrados en el influente, sin embargo, para las siguientes semanas, se tuvieron valores más bajos en el efluente (0.11 – 0.45 UNT) que en el influente (1.5 – 6.0 UNT). Logrando apreciarse una remoción de hasta el 95 % en la semana 18.

Por otro lado, se pudo apreciar a simple vista que el efluente presentó un color ámbar, olor nulo y que no hubo presencia de lodos en el efluente, como lo reportado por Lozano *et al.* (2016), siendo este, un sistema semiaeróbico. La zona aeróbica se encuentra en las superficies superior e inferior del biorreactor y la zona anaeróbica se encuentra en medio del biorreactor, facilitando la biodegradación de la materia orgánica (Zhao *et al.*, 2007) al coexistir ambas poblaciones. Los tratamientos aerobios, en general, tienen el inconveniente de la generación de un volumen apreciable de lodos de difícil degradación, mismos que requieren la aplicación de un pretratamiento antes cualquier alternativa de solución. La combinación de tratamiento anaerobio-aerobio garantiza la reducción de la carga orgánica contaminante, amortizándose con ello los efectos de la producción de lodo y los consumos energéticos que las variantes de tratamiento aerobio imponen (Pellón *et al.*, 2009).

Por lo que, no obtener la remoción esperada se puede deber a diversos factores, entre los más importantes se menciona que durante el tiempo de monitoreo el agua problema se encontró muy diluida por la época de lluvias, lo que provocó que no se apreciara remoción alguna de la carga orgánica, dado que el sistema por la naturaleza del material de empaque, tiende a aportar color al efluente, al contener ácidos húmicos y fúlvicos, los cuales se caracterizan por proporcionar un color café oscuro al medio (Payeras, 2018) y ser biorecalcitrantes, por lo que sí pudieron influir en las lecturas de los efluentes tanto de Color como de DQO. Lo anterior considerando que los ácidos húmicos y fúlvicos son complejas agrupaciones macromoleculares en las que las unidades fundamentales son compuestos aromáticos de carácter fenólico procedentes de la descomposición de la materia orgánica y compuestos nitrogenados, tanto cíclicos como alifáticos sintetizados por ciertos microorganismos presentes en el suelo (Castañeda, 2010). Estos compuestos son capaces de mejorar la calidad del suelo y fomentar el crecimiento de las plantas (Fernández, 2018).

## CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de caracterización, el agua tomada del río Sabinal resultó ligeramente contaminada. Asimismo, en el monitoreo del biorreactor se logró evaluar la remoción en DQO, color y turbiedad de las aguas superficiales que corren por el río Sabinal de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, sin embargo, en las variables de respuesta no se tuvieron eficiencias de remoción, lo que se atribuyó a que el influente estaba muy diluido y por la naturaleza del empaque (material estabilizado), el acarreo de ácidos húmicos y fúlvicos incrementaron las lecturas a la salida en los efluentes monitoreados.

Debido a lo anterior, este estudio es importante en la toma de decisiones, al momento de utilizar el sistema BEME, ya que no será recomendable tratar aguas residuales con valores bajos en DQO, color y turbiedad, por lo que este sistema no debe ser utilizado como una etapa de depuración final dentro de un tren de tratamiento, cuando el influente presente concentraciones alrededor de los 100 mg/L o menos en términos de DQO. Por otro lado, estos resultados también revelan que el acarreo en el efluente de compuestos propios del material de empaque (ácidos húmicos y fúlvicos), pueden detenerse después de 4 meses de operación continua, bajo una carga hidráulica de 100 L/m<sup>3</sup> d, pudiendo alcanzar el sistema en ese momento, una mayor estabilización.

## CAPÍTULO VII. REFERENCIAS Y ANEXOS

### 7.1 Referencias

Arce, A. L., Calderón, C. G., & Tomasini, A. C. (S.F.). Fundamentos técnicos para el muestreo y análisis de aguas residuales. Recuperado el 19 de mayo de 2018 de: [http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd67/fundamentos\\_tecnicos.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd67/fundamentos_tecnicos.pdf)

Bautista, J. A. (2011). Estabilización de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Tuxtla Gutiérrez, México.

Bautista, J. A., Gutiérrez, R. F., Nájera, H. A., Martínez, R. I., Vera, P., Araiza, J. A., Méndez, R., & Rojas, M. N. (2018). Biorreactor empacado con materiales estabilizados (BEME), como pretratamiento para lixiviados de rellenos sanitarios. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17 (2), 561-571.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). Estadísticas del Agua en México. Recuperado el 30 de mayo de 2018 de: [http://201.116.60.25/publicaciones/EAM\\_2016.pdf](http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf)

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010). Estadísticas del Agua en México. Recuperado el 21 de mayo de 2019 de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2010-16Junio2010.pdf>

Covarrubias, Y., De la Garza, I. M., Colunga, E. M. (2011). Manejo de aguas residuales domésticas descargadas a fosas sépticas. *CIENCIACIERTA*, 28. Recuperado el 27 de mayo de 2018 de: <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/CienciaCierta/CC28/articulos.html>.

Diario Oficial (DOF). (2003). Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos. Díaz, E., Alvarado, A. R., & Camacho, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento

de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera*, 14 (1), 78-97.

Díaz, M. C., Espitia, S. E., & Molina, F. (2002). Digestión anaerobia. Recuperado el 19 de mayo de 2018 de: [http://www.uneditorial.net/uflip/Digestion\\_Anaerobia\\_una\\_aproximacion\\_a\\_la\\_tecnologia/pubData/source/Digestion\\_anaerobia\\_unal.pdf](http://www.uneditorial.net/uflip/Digestion_Anaerobia_una_aproximacion_a_la_tecnologia/pubData/source/Digestion_anaerobia_unal.pdf)

Fangfang, W., Sun, Y., & Ruofan, Z. (2012). Experimental study on the treatment of chromium-containing wastewater by aged refuse. *Procedia Environmental Sciences* 16, 598 – 605.

Fernández, X. (2018). El potencial de los ácidos húmicos y fúlvicos. Recuperado el 07 de octubre de 2018 de: <http://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Noticias/2017/08/03/El-potencial-de-los-acidos-humicos-y-fulvicos.aspx>

Goyenola, G. (2007). Guía para la utilización de las Valijas Viajeras. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos RED MAPSA. Recuperado el 19 de mayo de 2018 de: [http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso\\_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf](http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf)

He, P.J., Shao, L.M., Guo, H.D., et al. (2006). Nitrogen removal from recycled landfill leachate by ex situ nitrification and in situ denitrification. *Waste Management* 26, 838–845.

Hidritec. (2016). Tratamiento de aguas residuales y disminución de DQO. Recuperado el 19 de mayo de 2018 de: <http://www.hidritec.com/hidritec/tratamiento-de-aguas-residuales-y-disminucion-de-dqo>

Instituto Estatal del Estado de Chiapas. (2013). Problemática principal. Recuperado el 30 de mayo de 2018 de: <http://www.institutodelagua.chiapas.gob.mx/problematika-cch>

Jiménez, B., Toregrosa, M., & Aboites, L. (2010). *El agua en México: cauces y encauces* (1era edición). México. Recuperado el 30 de mayo de 2018 de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf>

- Kiss, G. & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta ecológica* 79 (2006): 39-51.
- Li, H.J., Zhao, Y.C., Shi, L. (2009) Three-stage aged refuse biofilter for the treatment of landfill leachate. *Journal of Environmental Sciences* 21, 70–75.
- Long, Y., Lao, H.M., Hu, L.F. (2008). Effects of in situ nitrogen removal on degradation/stabilization of MSW in bioreactor landfill. *Bioresource Technology* 99, 2787–2794
- López, M. (2010). Aguas residuales. Recuperado el 19 de mayo de 2018 de: <http://gellylop.blogspot.mx/>
- Lozano, G., Bautista, J., Díaz, M., Gutiérrez, R. F., Martínez, R. I., & Nájera, H. A. (2016). Remoción de carga orgánica en lixiviados por medio de un biofiltro empacado con residuos estabilizados. *ESPACIO I+D, innovación más desarrollo*, 12.
- NMX-AA-007-SCFI-2000. Análisis de agua - determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la nmx-aa007-1980).
- NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua - determinación del pH - método de prueba.
- NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba - parte 2 - determinación del índice de la demanda química de oxígeno – método de tubo sellado a pequeña escala.
- NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
- NMX-AA-045-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la nmx-aa-045-1981).

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

Noyola, A., Morgan, J. M., & Güereca, L. P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales* (1era edición). México. Recuperado el 1 de abril de 2018 de: [http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia\\_Aguas\\_Residuales.pdf](http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf)

Orellana, J. A. (2005). CARACTERÍSTICAS DE LOS LIQUIDOS RESIDUALES. Recuperado el 19 de mayo de 2018 de: [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing\\_sanitaria/Ingenieria\\_Sanitaria\\_A4\\_Capitulo\\_08\\_Caracteristicas\\_de\\_Liquidos\\_Residuales.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_08_Caracteristicas_de_Liquidos_Residuales.pdf)

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2014). La fiscalización ambiental en aguas residuales. Recuperado el 1 de abril de 2018 de: [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827)

Payeras, A. (2018). Ácidos húmicos y Ácidos Fúlvicos. Recuperado el 07 de octubre de 2018 de: <http://www.bonsaimenorca.com/articulos/articulos-tecnicos/acidos-humicos-y-acidos-fulvicos/>

Pellón, A., López, M., Espinoza, M., & Escobedo, R. (2009). Tecnología para el tratamiento de lixiviados provenientes de vertederos de residuos sólidos urbanos. Departamento de Estudios sobre Contaminación Ambiental (DECA), Centro de Investigaciones del Ozono (CIO), Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC). Tecnología química. Edición especial.

Peña, E. (2007). Calidad del agua. Recuperado el 19 de mayo de 2018 de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6162/5/Investigacion.pdf>

Pérez, C. (2012). Diseño y cálculo del tratamiento secundario mediante aireación prolongada de una edaru. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior.

Reforma. (2014). Sin tratar el 60% de aguas negras en México. *Nacional*. Recuperado el 30 de mayo de 2018 de: [http://diario.mx/Nacional/2014-03-22\\_38c6a777/sin-tratar-el-60-de-aguas-negras-en-mexico/](http://diario.mx/Nacional/2014-03-22_38c6a777/sin-tratar-el-60-de-aguas-negras-en-mexico/)

- SEMARNAT. (s.f). Residuos. Consultado el 16 de octubre de [https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe\\_12/pdf/Cap7\\_residuos.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf)
- SMAPA (2013). Saneamiento Integral de Tuxtla Gutiérrez. Recuperado de <http://www.smapa.gob.mx/index.php/component/content/article/9-smapa/27-saneamiento-integral-de-tuxtla-gutierrez>
- Spellman, F. R. (2014). Water and Wastewater Treatment Plant Operations. ISBN-13:978-1-4665-5338-5.
- Tao, Z.W., Xia, L.J., Wang, J.A., (2009). Effects of waste leachate treatment using aged refuse bioreactors. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 25 (1), 213–216.
- Tiempo y forma (2017). Rellenos sanitarios en Chiapas. Consultado de <http://tiempoyforma.com/publicacion/hay-34-rellenos-sanitarios-en-todo-chiapas/>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. (1998) Gestión integral de residuos sólidos. Ciudad de México. McGraw-Hill Interamericana de España S.A.
- Turgut, T., Onay, Frederick., & Pohland, G., (1998). In site nitrogen management in Controlled bioreactor landfills. Water Research 32 (5), 1383–1392.
- Water Environment Federation (2000). Biosolids Success Stories [online]. WEF, 2000. [Cited: 15 february 2003]. Available from the World Wide Web: <<http://www.biosolids.org/docs/source/contents.pdf>>.
- Zhao, Y., Lou, Z., Guo, Y., & Xu, D. (2007). Treatment of sewage using an aged-refuse-based bioreactor. *Environmental Management*, 82, 32–38
- Zhi, H., Dan, L., & Qi, L. (2013). A removal mechanism for organics and nitrogen in treating leachate using a semi-aerobic aged refuse biofilter. *Environmental Management*, 114, 336-342.
- Zhi-Yong Han, Dan Liu, Qi-Bin Li, Gui-Zhi Li, Zhao-Yang Yin, Xin Chen & Jian-Nan Chen (2011). A novel technique of semi-aerobic aged refuse biofilter for leachate treatment, *Waste Management*, 31, 1827-1832.

## 7.2 Anexos



Figura 15. Alimentación del biorreactor con muestras de agua del río Sabinal.



Figura 16. Determinación de turbiedad.



Figura 17. Determinación de color verdadero.



Figura 18. Preparación de tubos de digestión para la determinación de DQO.