



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA



**EVALUACIÓN DE LODOS METANOGÉNICOS EN EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES MEDIANTE UN REACTOR UASB**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO
PRESENTA:**

PÉREZ CASTRO HENRY LEONEL

DIRECTOR:

DR. MIGUEL ÁNGEL ARELLANO GONZÁLEZ

ASESOR:

M. EN. I.Q. FRANCISCO JAVIER ALMAZÁN RUIZ

ASESOR:

I.BQ. PAULETTE TAPIA TORRES

CIUDAD DE MÉXICO

JULIO 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES

Ustedes han sido y siempre serán el motor de inspiración, crecimiento, superación y apoyo. Agradezco a la vida el tenerlos como padres y todo el ejemplo que ambos me han enseñado a través de este camino. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico este logro, como una de las muchos más por conquistar. Los amo con todo mi corazón.

A MI HERMANO

MI querido hermanito Alexis, sé que tú cariño y amor incondicional siempre estará acompañándome toda la vida. Te agradezco por tu amistad, consejos, confianza y fe que siempre has tenido en mí.

A MIS ASESORES

Gracias por todo el apoyo brindando en todo este tiempo para poder culminar con esta maravillosa etapa. Les agradezco infinitamente toda la dedicación, paciencia, determinación y enseñanza que me brindaron para concluir con este trabajo.

A MIS AMIGOS

Por todos esos hermosos recuerdos que siempre tendré presente en una de las etapas más increíbles de mí vida.

RESUMEN

En este trabajo se estudió el comportamiento de lodos metanogénicos en un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) para el tratamiento de aguas residuales. El reactor operó a una temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sin agitación ni recirculación, volumen de 3.6L y un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 48h.

Se llevó a cabo una alimentación de forma semi-continua de medio mineral sintético, se llevó un registro del potencial de hidrogeno (pH), potencial oxidación-reducción (ORP), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y volumen de biogás producido. En el proceso de estabilización del reactor el pH, presentó valores en un intervalo de 6.9 y 7.7, en el ORP de -234.6mV a -188.6mV, en los sólidos suspendidos volátiles (SSV) un valor inicial de 3.3 g/L y al trascurso de 45 días presentando un incremento a 7.1 g/L, al igual, que se presentó al final de la estabilización una producción de biogás de 1mL/h. La estabilización de pH, temperatura y alimentación del reactor permitió obtener un buen medio de crecimiento para el consorcio microbiano dentro del reactor upflow anaerobic sludge blanket (UASB), también conocido como reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA).

Terminado el periodo de estabilización, se realizó el intercambio de alimentación a agua residual sintética para analizar el comportamiento y asimilación a la nueva alimentación del consorcio microbiano presente.

Durante la operación con medio residual sintético se obtuvo un valor promedio en el pH de 7.38, de -237.6 mV para el ORP, un aumento de 10.1 g/L de SSV al cabo de 185 días y una producción máxima de biogás de 55 mL/h.

Por motivos de la contingencia sanitaria mundial (COVID-19), el presente trabajo de experimentación tuvo que finalizar al cabo de 187 días de monitoreo del reactor UASB, ya que no era posible seguir trabajando en las instalaciones de la universidad y continuar con la experimentación, por lo que se propuso una estrategia teórica con base a la estimación de remoción de carga orgánica, producción de biogás y sólidos suspendidos volátiles, tomado en cuenta estos valores de estimación como punto de comparación con los resultados obtenidos a lo largo del trabajo de experimentación realizado.

ÍNDICE

RESUMEN	3
1 INTRODUCCIÓN	9
2 MARCO TEÓRICO.	11
2.1 El agua y la problemática ambiental en la actualidad.	11
2.2 Tipos de abastecimientos de aguas	12
2.3 Contaminación y agentes que modifican la calidad del agua.	12
2.4 Aguas residuales.....	14
2.4.1 Fuentes de aguas residuales	14
2.4.2 Tratamiento de aguas residuales.....	15
2.5 Tecnologías en el tratamiento de la descontaminación del agua.	18
2.6 Proceso aerobio.....	21
2.7 Proceso anaerobio	23
2.8 Reactor UASB utilizado en el tratamiento anaerobio de aguas residuales.	25
3 JUSTIFICACIÓN	29
4 OBJETIVO	30
4.1 Objetivo general.....	30
4.2 Objetivos específicos	30
5 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL	31
5.1 Activación de lodos metanogénicos.....	31
5.2 Caracterización de lodos	32
5.3 Preparación del agua residual sintética	33
5.4 Sistema de captación de biogás.....	34
6 ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
6.1 Arranque y operación del UASB con medio mineral sintético.....	35
7 Balance de masa de la demanda química de oxígeno en el reactor UASB. ..	41
7.1 Estimación de cargas de DQO en el agua residual sintética.....	41
7.2 Estimación de la producción de biogás en el agua residual sintética.....	43
7.3 Estimación de la producción de lodo en el agua residual sintética	45
8 CONCLUSIÓN	46
BIBLIOGRAFÍA	48

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplos de integración de trenes de tratamiento de aguas residuales (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013)	16
Figura 2. Descripción del funcionamiento de una planta por fases. (CONAGUA, Sin fecha).....	18
Figura 3. Clasificación esquemática de los procesos para el tratamiento las aguas residuales (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013).....	19
Figura 4. Planta de tratamiento de agua residual (https://agua.org.mx/se-comprometio-conagua-a-terminar-planta-de-aguas-residuales-en-la-paz-el-independiente/).	20
Figura 5. Tendencias en la evolución de los procesos de tratamiento de aguas residuales.....	21
Figura 6. Tratamiento aerobio de aguas residuales (http://www.globalwe.com/es/soluciones/aguas-residuales/tratamiento-aerobio/). .	22
Figura 7. Flujo de sustrato como materia orgánica a través de una comunidad biológica anaerobia (Caicedo Messa, 2006).....	24
Figura 8. Esquema del reactor UASB (de Lemos Chernicharo, 2007).....	28
Figura 9. Reactor UASB	31
Figura 10. Separación de fases agua-lodo.....	33
Figura 11. Sistema de captación de biogás	34
Figura 12. Activación de lodos metagénicos en medio mineral sintético.	36
Figura 13. Concentración de solidos suspendidos volátiles en agua mineral sintética	37

Figura 14. Estabilización de lodos metanogénicos mediante agua residual sintética.
..... 38

Figura 15. Concentración de sólidos suspendidos volátiles en agua residual sintética.
..... 39

Figura 16. Obtención de biogás con agua residual sintética..... 40

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas proceso aerobio.	23
Tabla 2. Ventajas y desventajas proceso anaerobio	25
Tabla 3. Componentes del medio mineral sintético	32
Tabla 4. Concentración de diferentes parámetros presentes en el agua residual sintética. Fuente. ASTM 5905-D-98 (2003).....	42

1 INTRODUCCIÓN

México al no contar con la tecnología necesaria para poder realizar un tratamiento adecuado en el manejo de los lodos primarios, así como secundarios, provenientes de desechos de plantas de tratamiento de aguas residuales, en la cual se implementa una propuesta a esta problemática con la finalidad de utilizar los lodos, estabilizarlos y transformarlos a fertilizantes.

La operación del reactor anaerobio de flujo ascendente puede llegar a ser una alternativa para poder realizar un manejo adecuado para los lodos procedentes de los procesos primarios y secundarios de una planta de tratamientos de aguas residuales, ya que puede reducir significativamente la generación de la carga orgánica, sólidos suspendidos, bacterias, virus, patógenos, entre otros. Otro producto que se puede obtener mediante el tratamiento de lodos metanogénicos por medio de la digestión anaerobia, es el de biogás, en la cual se involucra la degradación de materia orgánica para la generación de energía, con una composición de 60 - 70% de CH_4 y 30 - 40% CO_2 aproximadamente.

Durante este proceso participan varios grupos de microorganismos que llevan a cabo un metabolismo coordinado en cuatro etapas: la primera es la hidrólisis, donde la materia orgánica es fermentada, produciendo compuestos sencillos (monómeros); la segunda es la acidogénesis, que produce ácidos orgánicos; la tercera es la acetogénesis, caracterizada por la formación de acetatos, propionatos y butiratos, y finalmente, la cuarta etapa es la metanogénesis, donde microorganismos producen metano a través de la ruta acetotrófica e hidrogenotrófica (Weiland, 2010).

En este trabajo se realizó la implementación de un reactor anaerobio de flujo ascendente, con la finalidad de estabilizar los lodos y obtener la producción del biogás, mediante las siguientes condiciones de operación: alimentación de sustrato semi-continua, temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y un pH neutro; implementado bajo esas condiciones con la necesidad de identificar el comportamiento del reactor a condiciones mesofílicas y la generación del biogás.

2 MARCO TEÓRICO.

2.1 El agua y la problemática ambiental en la actualidad.

Según la ley de la conservación de la materia de Lavoisier, el volumen total de agua en el planeta no ha cambiado, sin embargo, existe una percepción de incremento en la escasez del vital líquido en la mayoría de las regiones del planeta. Esta percepción tiene un sustento real, y es debido a los cambios en el ciclo hidrológico y a los problemas de contaminación que han reducido el volumen de agua dulce disponible en ciertas regiones (Monforte Garcia & Cantú Martínez, 2009).

El 40% del agua dulce disponible en el planeta se encuentra concentrada mayormente en seis países, el restante distribuido en los demás países, aunque cuentan con el recurso, lo reciben de manera estacional. La realidad es que la distribución del agua dulce es desigual entre las regiones naturales y económicas del planeta. Cerca del 75% de la población humana se concentra en países y regiones donde sólo existe el 20% de las disponibilidades del agua. Por el acelerado deterioro de los recursos acuáticos esta situación empeorará en el futuro próximo. Se espera, en efecto, que hacia el 2025, el 80% de la población de la Tierra viva bajo condiciones de alta y muy alta escasez de recursos hídricos. Para esa época, una tercera parte de la población vivirá en situaciones consideradas como altamente catastróficas por la falta de agua (Toledo, 2002).

En el agua de los ríos, arroyos y lagos se disuelven una gran cantidad de elementos y compuestos químicos; también se mantienen en suspensión diversas sustancias sólidas insolubles y líquidos no miscibles, que albergan una multitud de especies de microorganismos. En condiciones naturales existen procesos físicos, químicos y

biológicos que permiten mantener relativamente en equilibrio las concentraciones de dichas sustancias, partículas y microbiota. Sin embargo, las actividades humanas pueden modificar la composición química de muchos cuerpos de agua, debido a la descarga de aguas residuales sin tratamiento que provienen de diversas fuentes, las cuales alteran su equilibrio (Gómez, Páez, & Flores-Díaz, 2013).

Dentro de las actividades humanas en el uso del agua dulce, el riego ha sido el mayor consumidor de agua cerca del 69%, la industria con aproximadamente el 23%, y solamente el 8% se encuentra disponible para uso doméstico (Toledo, 2002).

2.2 Tipos de abastecimientos de aguas

Conforme a su origen, podemos clasificar a los abastecimientos de agua en (Ramalho , 1977):

- Aguas superficiales: estas comprenden a los ríos, océanos, lagos y aguas embalsadas.
- Aguas subterráneas: son aquellas formaciones de agua dulce situadas a nivel superficial en la corteza terrestre, estas se localizan en formaciones geológicas impermeables llamadas acuíferos.
- Aguas meteorológicas: son de mayor pureza física y química con respecto a las aguas superficiales y subterráneas.

2.3 Contaminación y agentes que modifican la calidad del agua.

Existe un gran número de contaminantes del agua, los cuales se clasifican en contaminantes: (a) químicos, (b) físicos y (c) biológicos (Agua.org.mx, s.f.).

- (a) Los contaminantes químicos pueden ser de dos tipos inorgánicos y orgánicos. Podemos citar algunos de los contaminantes inorgánicos y

minerales que pueden contener las aguas residuales como: amonio, óxidos, ácidos, fluoruros, sulfuros, sales, bases inorgánicas, metales, arenas, etc. Por parte de los contaminantes orgánicos pueden contener carbohidratos, agentes tensoactivos, nitrógeno, fósforo, aceites, fenoles, grasas, entre otros. Estos contaminantes en concentraciones altas llegan a causar graves problemas ambientales, a la salud y a los seres vivos. Por otra parte, hoy en día se ha reportado compuestos denominados “emergentes” que son derivados principalmente de descargas agroindustriales o domésticas, por lo que actualmente los contaminantes emergentes en estas descargas no se encuentran regulados. Entre estos, tal vez los que suscitan mayor preocupación son los fármacos, particularmente los antibióticos, pesticidas, plaguicidas y algunas drogas.

- (b) Los contaminantes físicos son principalmente sólidos o materiales en suspensión, generalmente arrancados del suelo, que en términos generales suman la mayor parte de contaminación del agua, los cuales provocan una obstrucción de la luz en los ecosistemas. Por otra parte, el agua caliente liberado por los procesos industriales en ocasiones altera la temperatura de las aguas con lo cual afecta la vida de los organismos.
- (c) Los contaminantes biológicos se encuentran presentes en un conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado, etc. Diversos tipos de microorganismos como: bacterias, virus, protozoos, helmintos y otros microorganismos que transmiten enfermedades se encuentran en el agua. Cuando se encuentran en exceso estos contaminantes generan la

proliferación de bacterias agota, por lo que el oxígeno e impide que en estas aguas puedan vivir peces y otros seres vivos.

2.4 Aguas residuales.

Son aquellas que fueron utilizadas en diversas actividades por el hombre, las cuales representan un problema y deben ser desechadas y tratadas, ya que contienen una variedad de compuestos inorgánicos y orgánicos. Lograr un análisis completo de las aguas residuales llega a ser una tarea bastante complicada, por tal motivo no suele ser práctico o posible realizar un análisis completo.

Las generaciones de agua residual por las diversas actividades de los sectores económicos tienen una amplia variedad en sus características químicas, físicas y biológicas, por lo que la mayor problemática que presentan estas aguas es el de remover estos contaminantes, por lo cual es necesario utilizar sistemas de tratamiento para la remoción de los contaminantes presentes. (Ramalho , 1977)

2.4.1 Fuentes de aguas residuales

Como principales fuentes de aguas residuales tenemos:

- Aguas residuales domésticas o aguas negras: procedentes de nuestras necesidades fisiológicas (heces y orina), de aseo personal, de cocina (en la preparación de alimentos y limpieza), al igual que en los productos de limpieza para el hogar. Estas aguas presentan una composición de materia orgánica, microorganismos, detergentes, restos de jabones, lejía y grasas, principalmente.
- Aguas residuales industriales: se originan de los procesos en industrias y fábricas, pueden contener aceites, antibióticos, ácidos y grasas y

compuestos orgánicos tóxicos como: hidrocarburos, bifenilos policlorados; contaminantes orgánicos persistentes, compuestos orgánicos volátiles y disolventes clorados.

- Aguas residuales agrícolas: las actividades agrícolas liberan diversos tipos de contaminantes al medio ambiente como nutrientes, fertilizantes, pesticidas, sales, sedimento, materia orgánica, metales y contaminantes emergentes.
- Aguas pluviales: se origina durante los fenómenos meteorológicos con precipitación como resultado de la lluvia, nieve, granizo, etc. Pueden ocasionar problemas debido al volumen de agua y al transporte del agua hacia el sistema de alcantarillado, ya que pueden transportar diferentes contaminantes como petróleo, materiales metálicos, pesticidas o fertilizantes.

Las aguas residuales, debido a la gran cantidad de sustancias (algunas de ellas tóxicas) y microorganismos que portan, pueden ser causa y vehículo de contaminación, en aquellos lugares donde son evacuadas sin un tratamiento previo (Espigares Garcia & Pérez López, 1985).

2.4.2 Tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales consta de un conjunto de operaciones y procesos unitarios con el objetivo de poder retirar la mayor parte de todos los contaminantes presentes en las aguas residuales. Los componentes individuales de tratamiento se clasifican en operaciones físicas, procesos químicos o biológicos. Estas operaciones y procesos se combinan en los sistemas de tratamiento de aguas

residuales, dando como resultado un tren de tratamiento, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Ejemplos de integración de trenes de tratamiento de aguas residuales (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013)

1. Pretratamiento

La primera etapa es la descontaminación (esencialmente física), en esta fase se remueven sólidos presentes en las aguas residuales, a través de rejillas (basura, etc.) y desarenadores (partículas pesadas como grava, arena y semillas) (Interapas, 2017).

2. Tratamiento primario

Puede ser físico o físico-químico, y se realiza en tanques de sedimentación para remover parte de los contaminantes y retirarlos como lodo en el fondo de los tanques. Este lodo después de ser procesado, es usado como abono (Interapas, 2017).

3. Tratamiento secundario

Es esencialmente biológico, en esta etapa las bacterias benéficas se emplean intencionalmente para consumir otra parte de contaminantes que no fueron

removidos en el tratamiento primario. La aireación, es decir, la incorporación de oxígeno o aire al agua contribuye al crecimiento bacteriano (Interapas, 2017).

El tratamiento secundario es la parte más importante del proceso, ya que es donde, por medio de microorganismos, se remueve la materia orgánica contenida en el agua residual. Esta etapa puede llevarse a cabo de forma aerobia o anaerobia y la biomasa puede estar suspendida o adherida a algún medio.

La tecnología más comúnmente utilizada para el tratamiento de las aguas residuales municipales, es la de lodos activados. En este proceso, se tiene una corriente de recirculación de lodo de los sedimentadores secundarios hacia el reactor biológico para mantener una concentración deseada de biomasa (Limón, 2013).

4. Tratamiento avanzado

Los procesos de tratamiento secundario seguidos de la desinfección pueden remover al menos el 85% de la DBO y sólidos suspendidos, y casi todos los microorganismos patógenos; no obstante, se logra escasa remoción del nitrógeno, fósforo, DQO soluble y metales pesados. Por lo general, el tratamiento terciario es necesario cuando deben cumplirse condiciones de descarga estrictas o cuando el agua tratada está destinada a un uso en específico. En tal caso, el arreglo de tratamiento terciario debe ser el necesario para alcanzar esa calidad específica, lo cual implica una gran diversidad de posibles combinaciones de operaciones y procesos unitarios como se muestra en la Figura 2 (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013).

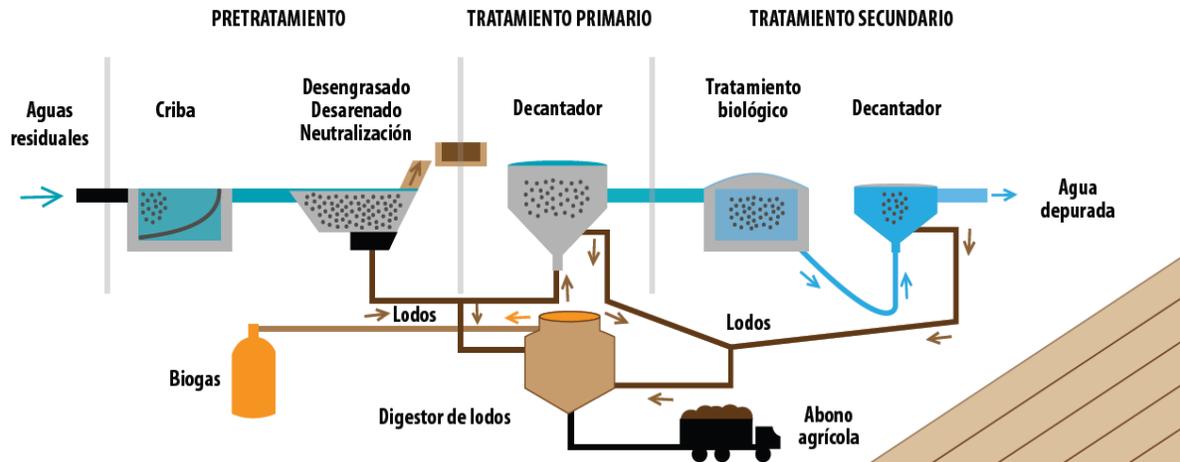


Figura 2. Descripción del funcionamiento de una planta por fases. (CONAGUA, Sin fecha)

2.5 Tecnologías en el tratamiento de la descontaminación del agua.

Al momento de la selección de una tecnología o sistema de tratamiento de aguas residuales debe considerar aspectos técnicos, económicos, ambientales y hasta sociales. Una tecnología tenderá a ser sustentable cuando considere la menor utilización de insumos y energía posible. Existe una amplia oferta tecnológica en el tratamiento de aguas residuales (Figura 3), sin embargo, con frecuencia las diferentes tecnologías dentro de un mismo tipo presentan ligeras variantes, respecto a la eficiencia y remoción de contaminantes. Al conocer el tipo de tecnología y al saber su integración dentro de un tren de tratamiento de aguas residuales, es posible interpretar las eficacias de tratamiento del agua residual y sus requerimientos en cuanto a energía e insumos en general. (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013).

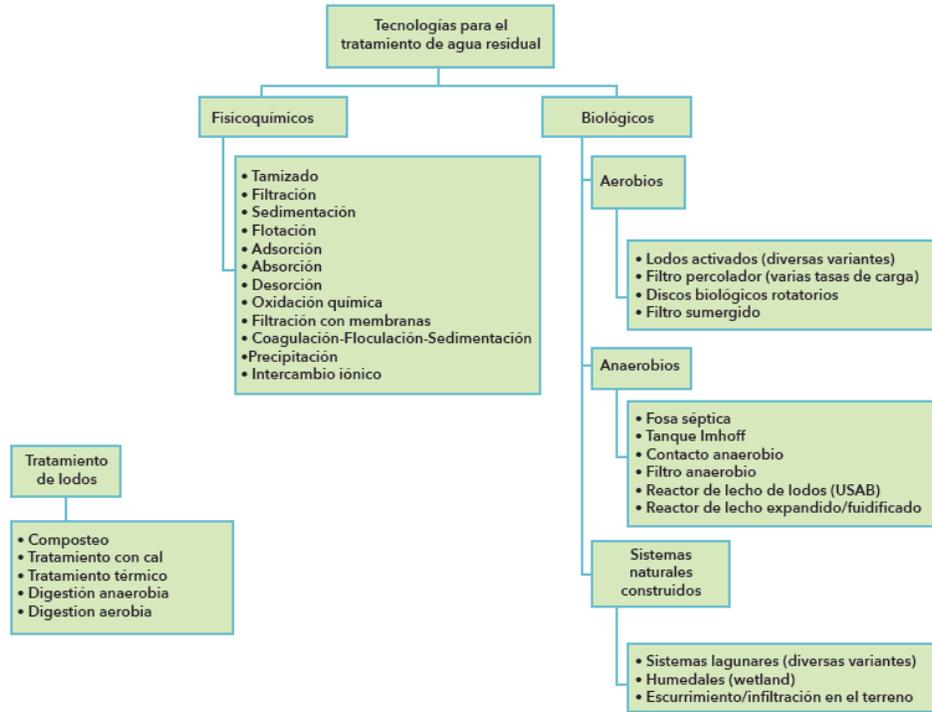


Figura 3. Clasificación esquemática de los procesos para el tratamiento las aguas residuales (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013).

Recientemente, los procesos de tratamiento han tenido que ajustarse para satisfacer las demandas de eliminación de contaminantes y producción de agua para su reutilización. Actualmente los requerimientos de calidad y volumen, en cuanto a los procesos de tratamiento de agua residual son altos, entregando agua de la mejor calidad posible y en este contexto, es evidente que la combinación de procesos biológicos y fisicoquímicos se impone como un requisito en las plantas modernas de tratamiento de aguas residuales (Figura 4).



Figura 4. Planta de tratamiento de agua residual (<https://agua.org.mx/se-comprometieron-agua-a-terminar-planta-de-aguas-residuales-en-la-paz-el-independiente/>).

La Figura 5 muestra las tendencias en la evolución de los procesos de tratamiento de aguas residuales. Se debe considerar que ciertos procesos aún pueden mejorarse; sin embargo, en el caso de los que están bien asentados en el mercado, como los lodos activados, las mejoras deben realizarse de forma paulatina con el tiempo (Dezotti, Lippel, & Bassin Paulo, 2011).

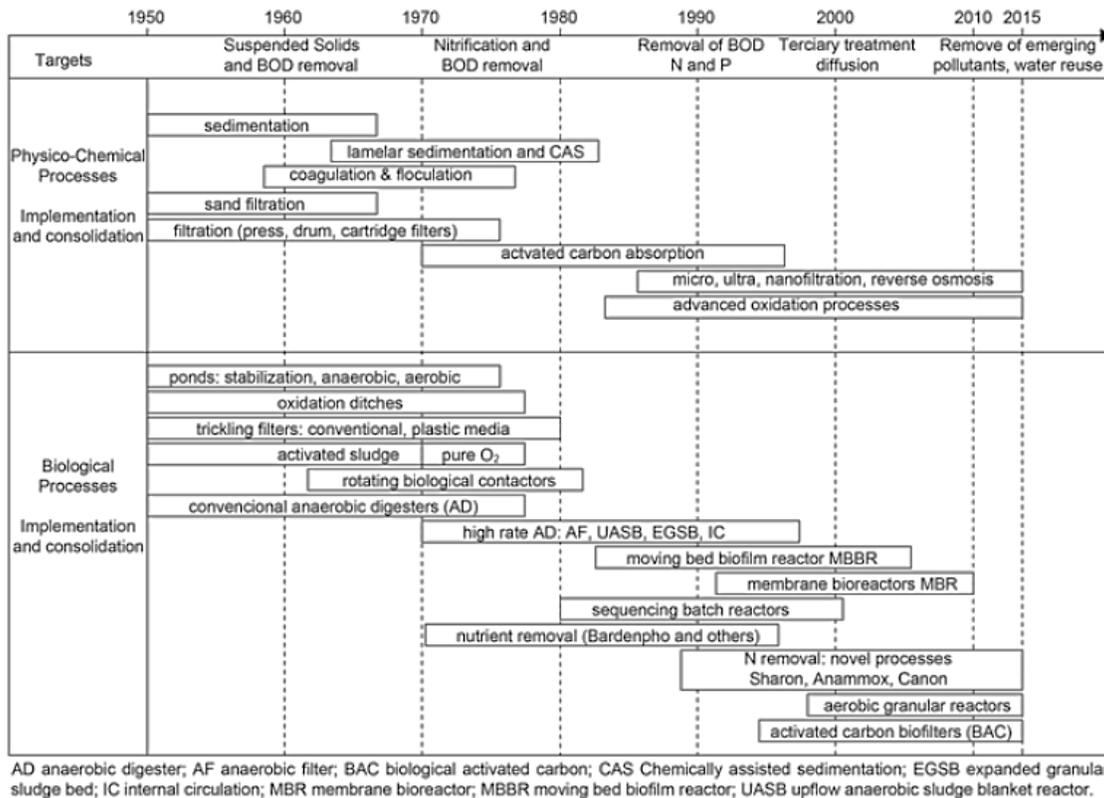


Figura 5. Tendencias en la evolución de los procesos de tratamiento de aguas residuales

2.6 Proceso aerobio

La tecnología con mayor aplicación dentro del tratamiento de aguas residuales es por medio de procesos aerobios. La alta eficiencia en remoción de contaminantes orgánicos son algunos de los motivos de su selección al momento de elaborar el tren de tratamiento de agua residual. Hoy en día existen diversos procesos aerobios, pueden ser de tipo extensivo (lagunas), procesos de biomasa en suspensión (lodos activados en sus diversas formas) y procesos de biopelícula (filtros percoladores y discos biológico rotatorio), en la tabla 1 se muestra las ventajas y desventajas del proceso aerobio (Jiménez Cisneros, 2001).

El metabolismo microbiano por medio de un sistema aerobio, con un 65% de la energía producida se transforma en nuevas células (denominadas en forma general

como lodos). Los lodos generados en el proceso deben ser estabilizados previamente a su disposición final, lo que puede incrementar el costo de operación del proceso. La ventaja que posee el sistema aerobio sobre el anaerobio, y por lo cual es utilizado ampliamente, es que la calidad del agua tratada es superior al efluente anaerobio y permite cumplir con regulaciones ambientales estrictas, en la tabla 1 se enumeran las ventajas y desventajas de los procesos aerobios de tratamiento de agua residual. Los efluentes anaerobios mantienen materia orgánica disuelta (demanda química de oxígeno, DQO) y compuestos inorgánicos en su forma reducida (amonio, sulfuro de hidrógeno), que generan mayores impactos al medio receptor (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013).

Los procesos aerobios consisten en una oxidación biológica de los contaminantes orgánicos, la cual se realiza mediante inyección de oxígeno por medio de aireadores (Figura 6).

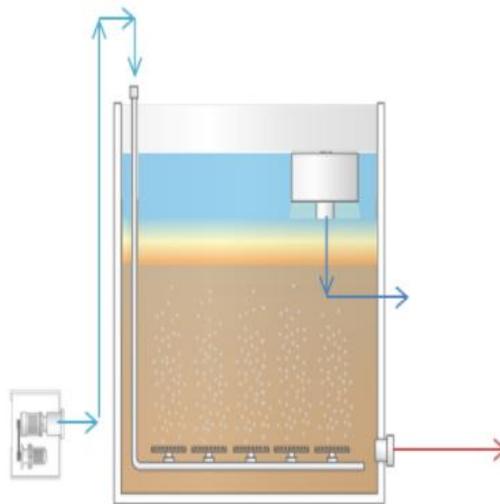


Figura 6. Tratamiento aerobio de aguas residuales
(<http://www.globalwe.com/es/soluciones/aguas-residuales/tratamiento-aerobio/>).

En el proceso aerobio se hace pasar el agua residual, poniéndose en contacto con el lodo de alta concentración microbiana que serán los encargados de realizar la oxidación de la materia orgánica, teniendo un mayor impacto en la reducción de la *DQO*, *DBO₅* y *SST*.

Tabla 1. Ventajas y desventajas proceso aerobio.

Ventajas	Desventajas
Facilidad de operación	Elevado gasto energético
Minimiza producción de olores	Elevada producción de lodo
Reduce tasa de respiración de lodos	Reducción de organismos patógenos
Emplea mayor número de tipos de bacterias para la digestión	Presenta problemas de formación de espuma
Costo de inversión bajo	Costo de operación alto

2.7 Proceso anaerobio

El proceso de tratamiento anaerobio se refiere a la remoción de materia orgánica del agua residual en ausencia de oxígeno. El proceso metabólico del consorcio microbiano es más lento por lo que requiere de mayor tiempo de residencia, lo que lleva a una baja tasa de crecimiento celular, por lo que solo una fracción se transforma en nuevas células y el restante es transformado en biogás, en el cual la mayor parte es metano, un gas combustible, que puede ser usado como fuente de energía para generar calor o electricidad, entre otros usos, en la tabla 2 se muestra las ventajas y desventajas del proceso anaerobio. (Caicedo Messa, 2006)

Es de resaltar que prácticamente no hay consumo de energía para la operación del sistema anaerobio comparado con el sistema aerobio. Además, tan solo el 10% de

la energía de sustrato se transforma en lodo, lo cual representa una gran ventaja sobre los sistemas aerobios pues hay hasta seis veces menos masa de lodos que tratar y disponer, lo que reduce significativamente los costos asociados a estos requerimientos (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013).

La conversión anaeróbica de materia orgánica hasta productos finales inofensivos es compleja, resultante de un gran número de reacciones interdependientes y simultáneas como se muestra en la Figura 7. El proceso de digestión puede ser clasificado en cuatro etapas principales íntimamente relacionadas: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis (Caicedo Messa, 2006).

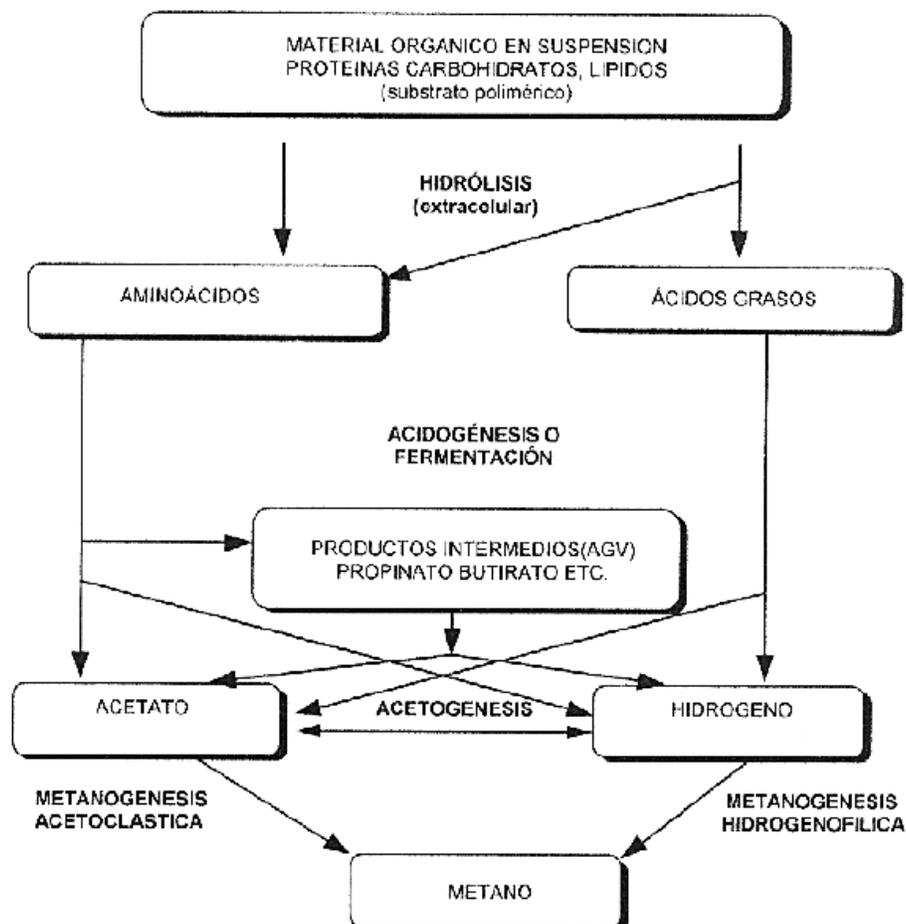


Figura 7. Flujo de sustrato como materia orgánica a través de una comunidad biológica anaerobia (Caicedo Messa, 2006).

Las bacterias fermentadoras realizan su trabajo en las primeras dos etapas, degradando la materia orgánica en el proceso de hidrólisis y acidogénesis.

Posteriormente el siguiente grupo de bacterias, acetogénicas, sintetizan los productos de la acidogénesis, principalmente al acetato en otros compuestos como dióxido de carbono e hidrógeno.

Las bacterias metanogénicas, arqueobacterias formadoras de metano entre las que se encuentran *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanosarcina*, *Methanospirillum*, convierten el acetato e hidrógeno en metano, consumiendo el dióxido de carbono para realizar el proceso. Únicamente las bacterias acetogénicas y metanogénicas son anaeróbicas, las hidrolíticas y acidogénicas se componen de bacterias facultativas y anaerobias. Las bacterias facultativas son aquellas que pueden vivir tanto en ambientes en presencia de oxígeno como en ausencia.

Tabla 2. Ventajas y desventajas proceso anaerobio

Ventajas	Desventajas
Produce menor cantidad de lodo	Proceso más lento
La energía requerida es muy baja	Alta sensibilidad a tóxicos inhibidores
Pueden soportar grandes cargas orgánicas	Al iniciar el arranque del reactor, se requieren periodos de tiempo largos
Aprovechamiento de biogás	Mayor cantidad de materia orgánica a degradar para su buena operación
Requerimiento bajo de nutrientes como nitrógeno y fósforo	Inversión alta

2.8 Reactor UASB utilizado en el tratamiento anaerobio de aguas residuales.

El reactor anaerobio de flujo ascendente, por sus siglas en inglés UASB (upflow anaerobic sludge blanket), es un reactor con la particularidad de que no requiere

material de empaque para retener los microorganismos. El reactor se basa en la formación de una cama de lodos (biomasa anaerobia granular o floculada) localizada en el fondo del reactor con un volumen aproximado de 1/3 el volumen total de éste. En la parte superior del reactor se coloca el sistema de captación de biogás. La zona ubicada entre la cama de lodos y la parte superior del reactor se denomina zona de expansión de lodo. En ella se aloja el lodo expandido por la acción del biogás y la velocidad ascendente del agua. La característica de un reactor UASB, se basa en el hecho de retener mediante sedimentación los microorganismos en forma de gránulos o flóculos densos, lo que aumenta considerablemente el tiempo de retención celular (TRC). Con lo dicho anteriormente, es posible operar el sistema con reducidos tiempos de retención hidráulica (TRH) y con volúmenes de reactor limitados, conservando buenas eficiencias en la remoción de materia orgánica. En adición a esto, la interacción entre el sustrato y el microorganismo se favorece debido a la turbulencia que provocan las burbujas de gas que ascienden hacia la superficie y al flujo ascendente del agua que atraviesa la cama. Con un reactor anaerobio tipo UASB (Figura 8) alimentado con agua residual municipal típica, se pueden lograr eficiencias de remoción en DQO del orden de 60 a 75% (DBO del 70 al 80%) (Caicedo Messa, 2006).

El proceso anaeróbico a través de reactores UASB presenta varias ventajas en comparación a los procesos aeróbicos convencionales, especialmente cuando se aplica en clima cálido, ubicaciones, como la mayoría de los países en desarrollo. En estas situaciones, un sistema puede tener las siguientes características principales:

- Sistema compacto, con pocos requisitos de terreno

- Bajos costos de construcción y operación
- Baja producción de lodos
- Bajo consumo de energía (solo para la estación de bombeo afluente, cuando necesario)
- Eficiencias satisfactorias de eliminación de DQO y DBO, que ascienden a 65 a 75%
- Alta concentración y buenas características de deshidratación del exceso de lodo

Aunque los reactores UASB presentan muchas ventajas, todavía existen algunas desventajas o limitaciones:

- Posibilidad de liberación de malos olores
- Baja capacidad del sistema para tolerar cargas tóxicas
- Intervalo de tiempo prolongado necesario para la puesta en marcha del sistema
- Necesidad de una etapa de post-tratamiento

(de Lemos Chernicharo, 2007)

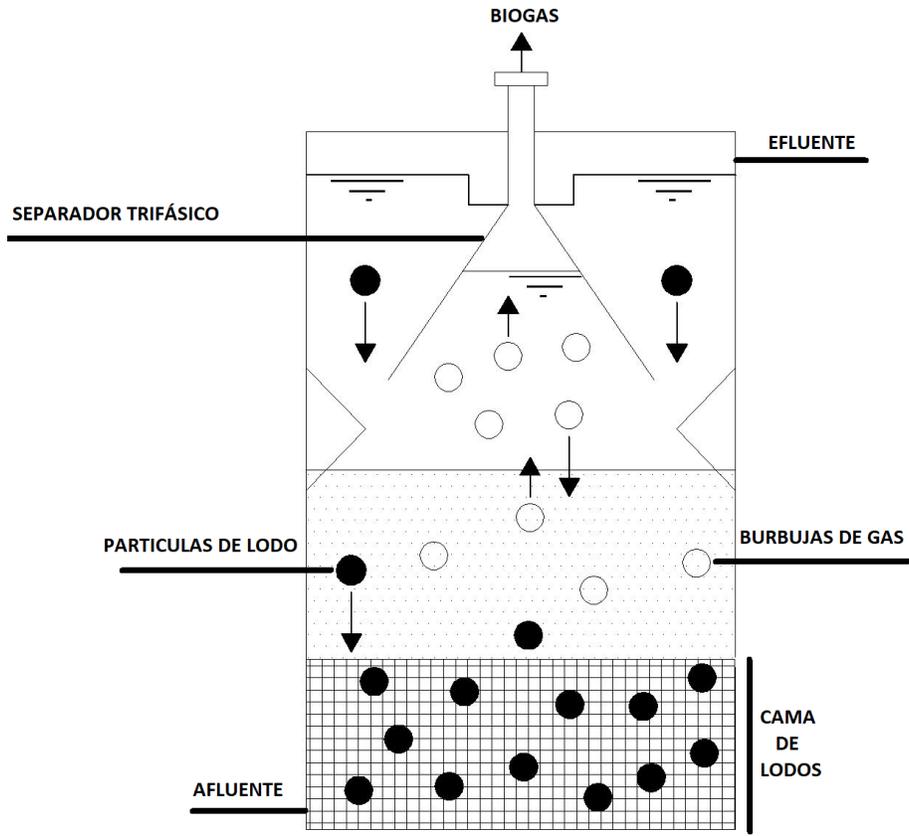


Figura 8. Esquema del reactor UASB (de Lemos Chernicharo, 2007).

3 JUSTIFICACIÓN

La aplicación de procesos biológicos en el tratamiento de aguas residuales ha contribuido en la importancia de la biotecnología, principalmente en disminuir la concentración de los contaminantes generados en descargas municipales o industriales.

En estos procesos los contaminantes y la materia orgánica es usada como alimento por el consorcio microbiano en el reactor. El consorcio microbiano utiliza la energía necesaria para llevar a cabo su proceso metabólico. La materia orgánica se transforma en nuevas células y otros productos que son ser removidos con mayor facilidad del agua

Al tener presente las diversas tecnologías que existen hoy en día para la remoción de contaminantes que se encuentran en las aguas residuales, seleccionaremos un sistema de digestión anaerobia, en la cual evaluaremos los lodos metanogénicos en el tratamiento de agua residuales domesticas mediante un reactor de flujo ascendente. La importancia que genera el tratamiento en condiciones donde el oxígeno se encuentra ausente dentro del sistema, es la estabilización de los lodos provenientes del tratamiento primario y secundario, así como la generación de biogás como fuente de energía natural, la cual puede ser utilizada como combustible para producir energía limpia.

En el porcentaje de remoción de materia orgánica, presenta eficiencias del 65% al 75%, siendo de mucha utilidad dentro un tren de tratamiento de agua residual.

4 OBJETIVO

4.1 Objetivo general

“Evaluar el tratamiento anaerobio de un agua residual sintética que emule los efluentes de la FES- Zaragoza, en un reactor UASB escala laboratorio.”

4.2 Objetivos específicos

- Estudiar, identificar y estabilizar un consorcio de lodos metanogénicos mediante la alimentación al reactor UASB, a partir de un medio mineral sintético.
- Análisis y obtención de la degradación de la materia orgánica, presente en el agua residual sintética
- Identificar, cuantificar y evaluar la producción de biogás, como parte de la obtención del tratamiento anaerobio en la generación de bio-metano y CO₂ en el sistema

5 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

El trabajo experimental se realizó en el laboratorio de proyectos de ingeniería química de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Los lodos se obtuvieron de la planta de tratamientos de aguas residuales de la UAM-Iztapalapa.

5.1 Activación de lodos metanogénicos.

Se alimentó el reactor UASB con una solución de medio mineral como medio de cultivo, la cual estuvo constituida por los compuestos mostrados en la Tabla 3.

A través de pulsaciones de flujo intermitente, utilizando una bomba peristáltica, manejando un intervalo de trabajo de 30 segundos encendido y 5 minutos apagado, se alimentó al reactor por un tiempo de 32 días. Como parámetros de control de proceso en la etapa de adaptación de los lodos, se registraron los valores de pH, ORP y temperatura.



Figura 9. Reactor UASB

Tabla 3. Componentes del medio mineral sintético

COMPUESTO	CONCENTRACIÓN (g/L)
K_2HPO_4	1.44
KH_2PO_4	0.54
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.10
CH_3COONH_4	2.07

5.2 Caracterización de lodos

Con la finalidad de conocer los parámetros delimitantes en la generación de biogás a partir de lodos metagénicos, se caracterizó el lodo, determinando la concentración de los sólidos totales, sólidos fijos y sólidos suspendidos volátiles. Los análisis fueron determinados con base al NMX-AA-004-SCFI-2013 Análisis de agua – medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas y NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas respectivamente.



Figura 10. Separación de fases agua-lodo

5.3 Preparación del agua residual sintética

La preparación de agua residual sintética, se llevó a cabo según la norma ASTM D 5905-98 (2003).

En una probeta de 1000 mL de plástico se midió 500 mL de agua destilada, la cual se añadió a un contenedor de metal de 1L de una licuadora. En seguida, en una balanza analítica se pesaron 0.4 g de harina de trigo, 2 g de sales de agua de mar, 0.08 g de Kaolin, los cuales se añadieron junto con el agua destilada. Después se midió 20 mL de solución de Triton X-100 y 120 mL de cerveza light, que de igual manera se añadió al contenedor. A continuación, se mezcló a velocidad baja por aproximadamente 30s. Una vez obtenido la mezcla se transfirió a un matraz aforado de 2L y se aforo con agua destilada. Por último, la solución se conservó en refrigeración (0 a 4°C) por un periodo de tiempo máximo de 24 horas.

5.4 Sistema de captación de biogás

Se acondicionó un sistema de captación de biogás en la parte de superior del reactor UASB. El sistema se realizó utilizando una manguera la cual se conectó en la parte superior del reactor UASB, en la terminación de la manguera se colocó una aguja hipodérmica. Se preparó una solución al 15% de $NaOH$ en una botella de vidrio, se selló con un tapón de goma flujo de la manguera y la presión negativa o de succión, que se logra mediante la ubicación del recipiente que contiene una solución de $NaOH$; el volumen de biogás generado se lee directamente en el cilindro de succión mediante la profundidad de la columna desplazada.



Figura 11. Sistema de captación de biogás.

6 ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Arranque y operación del UASB con medio mineral sintético

El tiempo de activación de los lodos metanogénicos con medio mineral sintético fue de 46 días, dentro de los cuales se llevó un registro de pH, ORP (empleando un potenciómetro marca SANXIN modelo MP551), Sólidos Suspendidos Volátiles y volumen de biogás producido.

El pH, en la estabilización de los lodos con medio mineral, se obtuvo un valor mínimo de 6.9 y un máximo de 7.7; estas oscilaciones fueron presentes al comienzo de la estabilización del reactor, en el periodo de latencia, cuando el consorcio microbiano se adapta al ambiente. Por otro lado, el pH recomendable para la digestión anaerobia está entre 7,0 y 7,2, aunque el intervalo satisfactorio de operación va de 6,6 a 7,6. La digestión anaerobia comienza a inhibirse a pH menores a 6,5 (Carrillo, 2002).

Por otro lado, se registró el valor del potencial de oxidación-reducción (ORP), utilizándolo como parámetro de control en la digestión anaerobia, estos valores se encuentran en un intervalo de -100mV a -300mV. El intervalo de ORP en el reactor anaerobio se encontró de -234.6mV a -188.6mV, presentando valores dentro de los establecidos para una buena digestión anaerobia (Sung, 2008). El registro del pH y ORP con respecto al tiempo se encuentran graficados en la Figura 12.

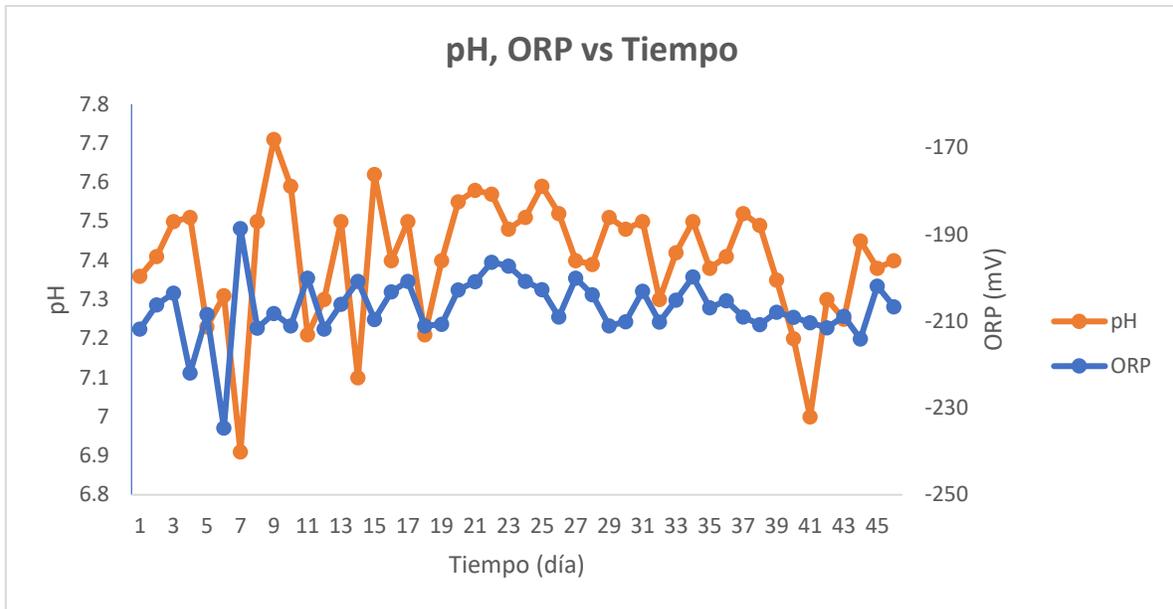


Figura 12. Activación de lodos metagénicos en medio mineral sintético.

El crecimiento de los lodos se aproximó determinando los Sólidos Suspendidos Volátiles desde el primer día de puesta en marcha, obteniendo 3.3 g/L de SSV y al transcurso de 45 días se incrementó a 7.1 g/L SSV, posiblemente debido al incremento en la concentración de los “ácidos grasos volátiles” dentro del UASB (Figura 13).

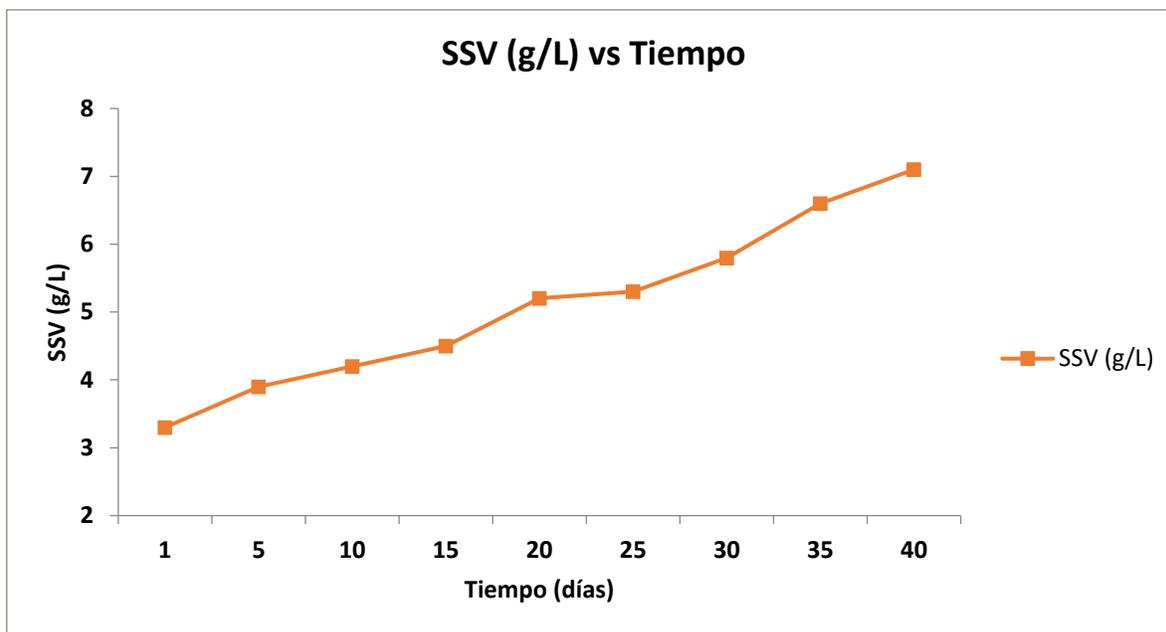


Figura 13. Concentración de sólidos suspendidos volátiles en agua mineral sintética

A partir del día 41 hubo presencia de biogás, registrando un volumen de 0.5mL/h e incrementando a 1mL/h al día 47.

6.2 Operación del reactor UASB con agua residual sintética

En el análisis para el agua residual sintética se continuó con el registro de pH, ORP, SSV y producción de biogás, al igual que se continuó operando con el mismo caudal en el afluente, tomando estos parámetros como control de proceso del reactor UASB. En los primeros 20 días de haber realizado el cambio de alimentación de medio mineral sintético por agua residual sintética, el reactor presento una variación de pH y ORP como se muestra en la Figura 14. El pH, aunque inicialmente presentó una variación, se mantuvo dentro de los valores adecuados de la digestión anaerobia que van de 6,6 a 7,6 y posteriormente mostrando una estabilidad, manteniéndose en un intervalo de 7.2 a 7.5. Por otro lado, el ORP al inicio del cambio de alimentación de -206.7mV disminuyó a -245.2mV, indicando una buena

asimilación de los microorganismos al cambio de nutrientes. Más adelante se mantuvo en un intervalo de -234.7mV a -246.1mV.

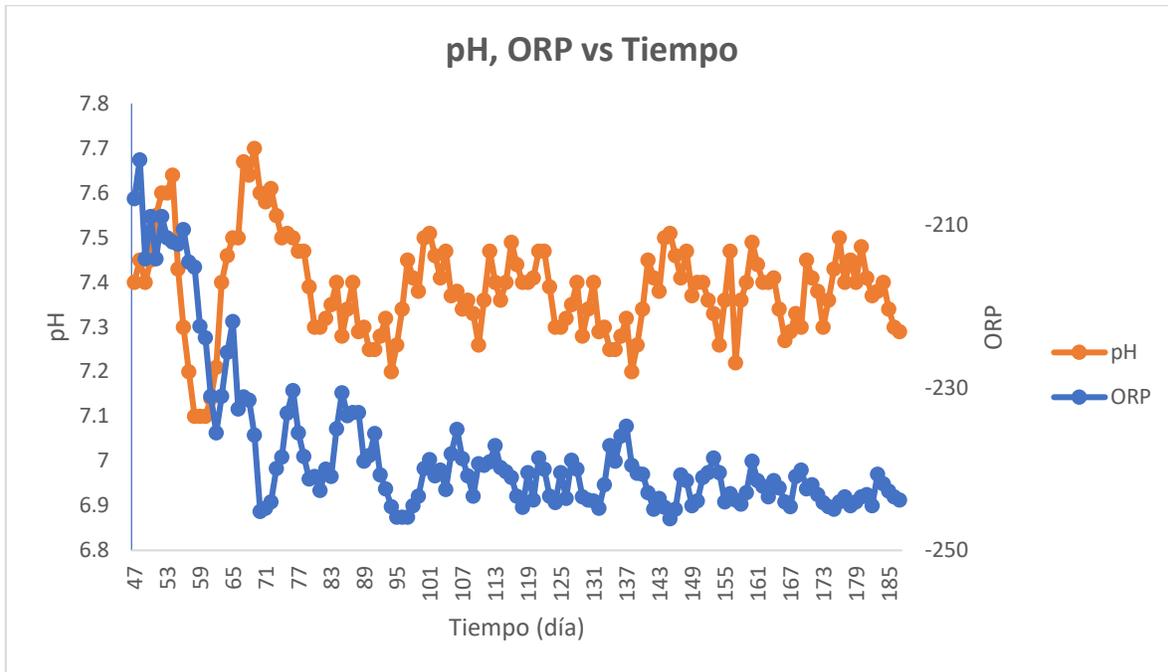


Figura 14. Estabilización de lodos metanogénicos mediante agua residual sintética.

Cada 10 días se realizó la determinación de los sólidos suspendidos volátiles, para llevar un control de la producción de lodo dentro del reactor. En la Figura 15 se presenta la producción de SSV, mostrando el aumento que este fue obteniendo a través de los días de operación del reactor, indicándonos una buena asimilación del consorcio microbiano, con respecto al agua residual sintética.

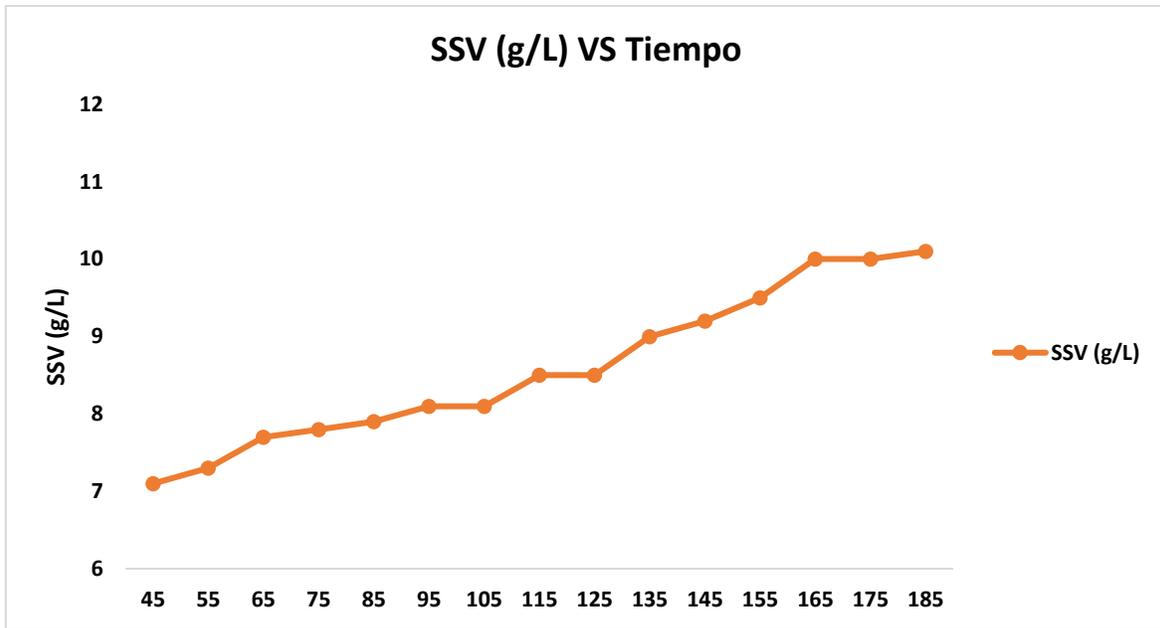


Figura 15. Concentración de sólidos suspendidos volátiles en agua residual sintética.

En los primeros días de haber efectuado el cambio de sustrato de agua mineral sintética a agua residual sintética, se mantuvo con una producción de biogás de 1mL/h, posteriormente del día 53 al día 102 de operación continua, se presentó un incremento de 3mL/h a 34mL/h respectivamente, indicando incremento en la producción de biogás en el transcurso de 49 días de operación, hasta una producción máxima de 55mL/h en el día 167 como se muestra en la figura 16.

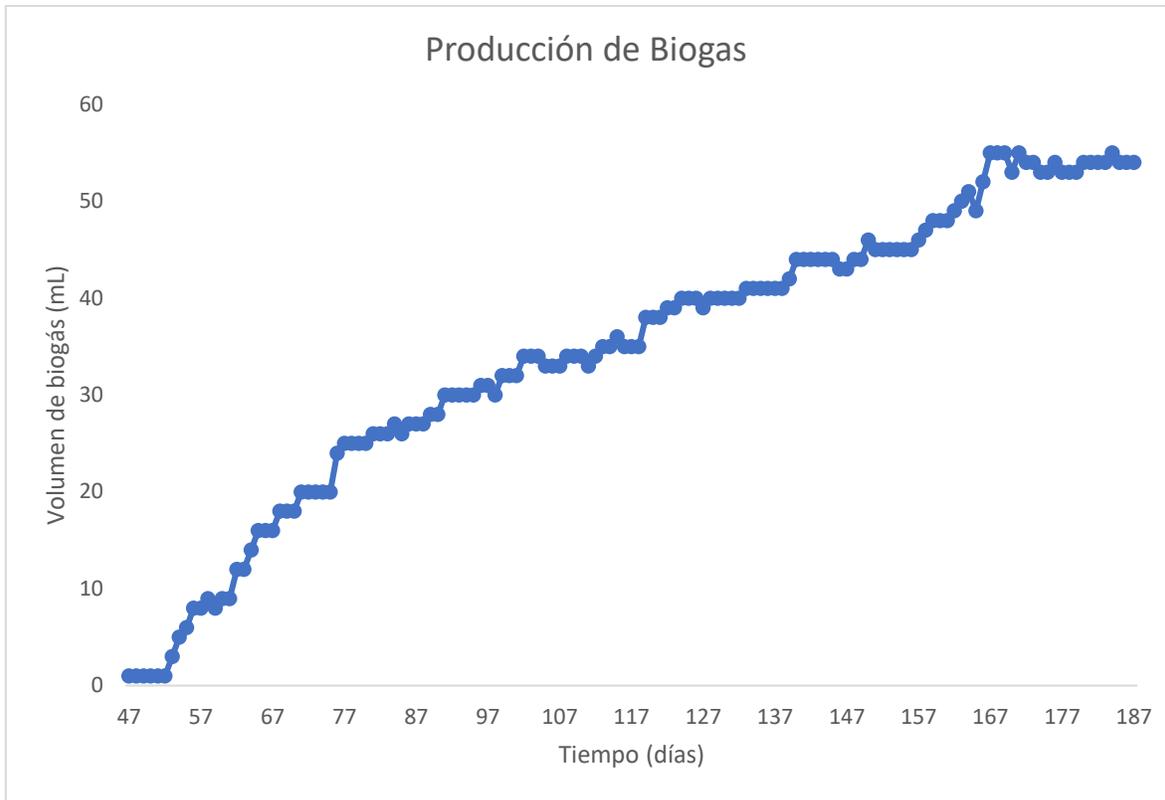


Figura 16. Obtención de biogás con agua residual sintética.

7 Balance de masa de la demanda química de oxígeno en el reactor UASB.

Debido a la contingencia sanitaria COVID-19, con la finalidad de proyectar el desempeño del reactor biológico, se realizó el balance de masa para el reactor UASB de 3.6L de capacidad, tomando como base a la demanda química de oxígeno (DQO) presente en el agua residual sintética, de acuerdo a la norma ASTM 5905-D-98 (2003), esto permite estimar la DQO removida, el volumen de biogás producido y la cantidad de lodo generado.

7.1 Estimación de cargas de DQO en el agua residual sintética

Teniendo la caracterización del agua residual sintética, seleccionamos el valor de la DQO ($3500 \frac{mg}{l}$) para el balance de masa.

Tabla 4. Concentración de diferentes parámetros presentes en el agua residual sintética.

Fuente. ASTM 5905-D-98 (2003).

Parámetro	Concentración	Parámetro	Concentración
DBO	>570	Selenio	<0.002
Plata	<0.0002	Estaño	<0.8
Aluminio	0.03	Talio	<0.001
Arsénico	<0.001	Vanadio	<0.2
Boro	0.1	Mercurio	<0.0002
Bario	0.003	Nitrógeno amoniacal	0.1
Berilio	<0.0002	Nitrógeno Kjeldahl	30
Calcio	10	Fósforo	8
Cobalto	<0.05	Nitrito (N-NO ₂ ⁻)	0.01
Hierro	0.1	Nitrato (N-Nitrato ₃ ⁻)	0.05
Potasio	26	Sólidos Suspendidos	232
Cobre	0.01	Sólidos Suspendidos volátiles	198
Níquel	0.003	Sólidos totales	2200
Plomo	<0.001	Sólidos Volátiles totales	1300
Cadmio	<0.001	Cloruros	490
Cromo	<0.001	DQO	3500
Zinc	0.02	Cianuro	<0.02
Magnesio	33	Orto fosfato	7
Manganeso	0.01	Sulfato	85
Molibdeno	0.03	Carbono Orgánico Total	1600
Sodio	200	Lista de contaminantes prioritarios USEPA	Por debajo de detección
Antimonio	<0.003		

El reactor cuenta con un volumen de 3.69 L y un caudal de entrada en el afluente de (Q_a) de 1.85 L/día. Para obtener una carga másica de $DQO_{Afluente}$ se emplea la siguiente ecuación (de Lemos Chernicharo, 2007):

$$Carga\ másica\ de\ DQO_{Afluente} = DQO_{Afluente} * Q_{afluente}$$

$$Carga\ másica\ de\ DQO_{Afluente} = 6.47 \frac{g\ DQO}{día}$$

Una vez obtenida la carga másica de $DQO_{Afluente}$, se calculó la carga másica de remoción de $DQO_{Efluente}$. Los reactores anaerobios presentan un factor de remoción

(ε) de la DQO del 65 al 75%. Tomando el valor más alto del factor remoción del 75% de la DQO, tenemos (de Lemos Chernicharo, 2007):

$$DQO_{Efluente} = (1 - \varepsilon) * DQO_{Influente}$$

$$DQO_{Efluente} = 1.63 \frac{g \text{ DQO}}{\text{día}}$$

Una vez obtenidos los valores de carga de $DQO_{Afluente}$ y carga de $DQO_{Efluente}$ podemos obtener el valor de la carga de DQO que es transformada durante el proceso, esta es la carga que los microorganismos aprovechan. Para obtenerla solamente basta realizar una diferencia entre ambas cargas de DQO (de Lemos Chernicharo, 2007).

$$DQO_{Convertida} = DQO_{Influente} - DQO_{Efluente}$$

$$DQO_{Convertida} = 4.85 \frac{g \text{ DQO}}{\text{día}}$$

7.2 Estimación de la producción de biogás en el agua residual sintética

Para realizar la estimación de biogás puede evaluarse a partir de la carga de DQO de entrada al reactor que se convierte en metano. Evaluando el metano presente en el agua residual podemos considerar su producción con base a la degradación de la carga de la DQO en el reactor.

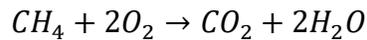
Tomando como consideración que la $DQO_{Convertida}$, el 85 al 95 % le corresponde a la generación de metano y la fracción restante del 5 al 15% corresponde a la generación de lodo, podemos llevar acabo el cálculo de la producción de metano en el reactor.

Suponiendo que la fracción de $DQO_{Convertida}$ a biomasa ($Fraccion_{Biomasa}$) será del 15 % y la fracción de $DQO_{Convertida}$ a metano ($Fraccion_{Metano}$) será del 90%, tenemos que (de Lemos Chernicharo, 2007):

$$Masa\ de\ DQO_{Convertida\ Metano} = DQO_{Convertida} * Fraccion_{Metano}$$

$$Masa\ de\ DQO_{Convertida\ Metano} = 4.61 \frac{g\ DQO\ convertida\ a\ metano}{día}$$

Una vez obtenido el valor de la masa de DQO que es convertida en metano, procedemos por medio de la reacción de oxidación del metano a condiciones normales de temperatura y presión (CNTP) para obtener la producción en volumen.



Asumiendo que un mol de CH_4 necesita de 2 mol de O_2 para llevar a cabo su oxidación, consideramos que el volumen del CH_4 es 22.4L (CNTP) y el peso del O_2 de 64g, que también podemos expresar como 64 g DQO. Utilizamos la siguiente expresión que determina el volumen del metano mediante su oxidación (de Lemos Chernicharo, 2007):

$$V_{CH_4} = \frac{22.4L * Masa\ de\ DQO_{Convertida\ Metano}}{64g}$$

$$V_{CH_4} = 1.61 \frac{LCH_4}{día}$$

Una vez obtenida la producción estimada de metano en el reactor, con base a su oxidación, tenemos como resultado $1.61 \frac{LCH_4}{día}$, con lo que ahora podemos estimar la producción de biogás producido durante el proceso. Tomando como dato en la literatura, que la fracción de metano presente en el biogás es del 70 a 80%, procedemos a tomar como valor que la fracción de metano en el biogás es del 80% (de Lemos Chernicharo, 2007).

El cálculo de biogás a partir de la estimación del metano en el agua residual sintética, obtenemos un volumen de $2.15 \frac{L \text{ Biogás}}{\text{día}}$ con una carga másica de DQO entrada de $6.47 \frac{g \text{ DQO}}{\text{día}}$.

7.3 Estimación de la producción de lodo en el agua residual sintética

Empleado la siguiente ecuación podemos estimar la producción de lodos esperado en el reactor UASB. Los valores de Y reportados para el tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas están en del orden de 0,05 a 0,15 kgSST / kgDQO, seleccionado 0.05 kgSST/DQO, obtenemos:

$$P_L = Y * DQO_{\text{Convertida}}$$

$$P_L = 0.24 \frac{g \text{ STT}}{\text{día}}$$

Para transformar en unidades de SSV, ocupamos la siguiente relación:

$$\frac{1000gr \text{ SSV lodo}}{1420 gr \text{ DQO convertida a sólidos}}$$

Tenemos la cantidad de sólidos generado expresados en SSV (de Lemos Chernicharo, 2007).

$$P_{LSSV} = 0.17 \frac{g \text{ SSV}}{\text{día}}$$

8 CONCLUSIÓN

Al trascurso de 45 días se logró estabilizar el consorcio microbiano de lodos metanogénicos, mediante la alimentación de medio mineral sintético, tomando como parámetro de control la temperatura, pH, ORP, y la generación de sólidos suspendidos volátiles, por lo que la selección de nutrientes presente en el medio mineral fue funcional para el consorcio microbiano. Al término de los 45 días se presentó una producción de biogás de 1ml/h y una concentración de lodos de 7.1 g/L SSV, por lo que se procedió a hacer el cambio de alimentación al reactor UASB de medio mineral sintético a agua residual sintética.

No se pudo llevar a cabo los análisis de laboratorio para conocer la remoción de DQO y DBO_5 debido a las restricciones por la pandemia, por lo cual no se obtuvo un valor de la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual sintética; sin embargo mediante la producción de biogás y el crecimiento de lodos durante el periodo experimental, se estimó la remoción de la materia orgánica presente.

En el seguimiento efectuado en la producción de biogás durante todo el proceso, se obtuvo una producción máxima de 55ml/h a los 167 días de operación, indicándonos una buena asimilación por parte del consorcio microbiano del agua residual sintética y un crecimiento de lodos de 10.1 g/L SSV.

Con los resultados obtenidos en el balance de masa con base a las características del agua residual sintética, se obtuvo que, para una eficiencia de remoción del 75% DQO, se obtiene una producción de biogás de $2.15 \frac{L \text{ Biogás}}{\text{día}}$, comparado con la producción obtenida experimentalmente de 55ml/h, que para un día de operación produce $1.32 \frac{L \text{ Biogás}}{\text{día}}$, con base a lo obtenido se analiza que el reactor UASB opero

con una eficiencia de remoción aproximada del 46%, estando por debajo de los valores que reporta la literatura de 65% a 75%. Esto puede ser debido a la preparación del agua residual sintética, no poder llevar a cabo la determinación de la DQO y DBO₅ y no tener un valor experimental en la remoción de materia orgánica, como también al no poder recolectar completamente el biogás producido. Por lo que, en futuros trabajos, se propone instalar un deflector para mejorar la captura del gas, sellar de mejor manera la tapa, conexiones, y mangueras, determinación de la DQO y DBO₅

BIBLIOGRAFÍA

- Sung, J. (2008). *Relationship between Oxidation Reduction Potential (ORP) and Volatile Fatty Acid (VFA) Production in the Acid-Phase*. The University of Canterbury New Zealand.
- Agua.org.mx. (n.d.). *Agua.org.mx*. Retrieved from <https://agua.org.mx/contaminacion-del-agua/>
- Caicedo Messa, F. J. (2006). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ARRANQUE DE UN REACTOR U.A.S.B. PILOTO*. Manizales.
- Carrillo, L. (2002). *Microbiología agrícola* (1 ed.). Salta: Universidad Nacional de Salta.
- CONAGUA. (Sin fecha). *Cuido el agua.org*. Retrieved from <http://www.cuidoelagua.org/empapate/aguaresiduales/funciona-planta.html>
- De Lemos Chernicharo, C. A. (2007). *Biological wastewater treatment series; Anaerobic reactors*. New Delhi: Aptara Inc.
- Dezotti, M., Lippel, G., & Bassin Paulo, J. (2011). *Advanced biological processes for wastewater treatment*. Rio de Janeiro: Interciencia.
- Espigares Garcia, M., & Pérez López, J. (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Granada: Universidad de granada.
- García, G. (2002). *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. Masón: Salud publica.
- Gómez, S., Páez, L. R., & Flores-Díaz, A. (2013). Comportamiento de los sólidos en suspensión y sedimentales en cuerpos de agua: búsqueda de métodos aplicables al monitoreo comunitario. *Centro de investigaciones en geografía ambiental 1*.

- Hernández, L. (1988). *Diseño de un reactor anaeróbico para el tratamiento de residuos municipales*.
- Interapas. (2017, noviembre 18). *Sistema de tratamiento de aguas residuales*. Retrieved _____ from http://interapas.mx/files/cultura_del_agua/folletos/sistema_de_tratamiento_de_aguas_residuales.pdf
- Jiménez Cisneros, B. E. (2001). *La contaminación ambiental en México*. Ciudad de México: Limusa.
- Limón, J. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso? Guadalajara, Jalisco, México.
- Monforte Garcia, G., & Cantú Martínez, P. (2009). ESCENARIO DEL AGUA EN MEXICO. *Cultura Científica y tecnológica*, 40.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). Selección de tecnologías para el tratamieneto de aguas residuales municipales . *Instituto de ingeniería UNAM*, 128.
- Ramalho , R. S. (1977). *Introduction to wastewater treatment processes*. Quebec: Academic press.
- Toledo, A. (2002). El agua en Méxcio y el mundo . *Gaceta ecológica*, 18.
- Weiland, P. (2010). *Biogas production: current state and perspectives*. Appl Microbiol Biotechnol.