

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Tratamiento de Agua Residual Doméstica Mediante el Uso de un Filtro Anaerobio
Empacado con Espuma de Poliuretano a Diferentes Tiempos de Retención Hidráulica

Por:

TOMASA QUITERIO GUTIÉRREZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Tratamiento de Agua Residual Doméstica Mediante el Uso de un Filtro Anaerobio
Empacado con Espuma de Poliuretano a Diferentes Tiempos de Retención Hidráulica

Por:

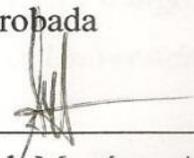
TOMASA QUITERIO GUTIÉRREZ

TESIS

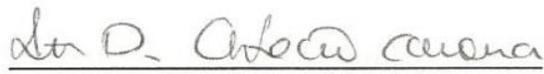
Presentada como requisito parcial para obtener título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

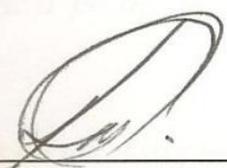
Aprobada



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Asesor Principal



M.C. Iveth Dalila Antonio Carmona
Coasesor



M.C. María Teresa Ruíz De León
Coasesor



Dr. Leobardo Bañuelos Herrera
Coordinador de la División de Agronomía
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2014

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

A esta Honorable Institución que me abrió sus puertas para adquirir nuevos conocimientos que me servirán para enfrentarme a nuevos retos que me ponga la vida.

A mi Asesora de Tesis: Dra. Silvia Yudith Martínez Amador, quien gracias al apoyo otorgado y la confianza pude realizar este trabajo de Tesis.

A mi coasesora de Tesis: M.C. Iveth Dalila Antonio Carmona agradeciéndole el apoyo que siempre me otorgo al trabajar en el laboratorio, que a pesar de los llamados de atención siempre estuvo ahí presente, así mismo agradecerle por aclarar todas mis dudas en el trayecto del trabajo.

A mi coasesora de Tesis: M.C. María Teresa Ruíz De León.

A mis compañeros de Generación. Ing. en Agrobiología.

A José Ángel Gutiérrez Ramírez, mi compañero y amigo, por apoyarme de igual manera en momentos difíciles en mi estancia en la Universidad, por compartir y permitirme estar estos tres años a su lado. – Te amo -

A Guadalupe Ponce Martínez, por ser mi amiga y que pese a pesar de las peleas siempre estuvo ahí presente brindándome su amistad.

Anayeli, Brenda, por brindarme su buena amistad y por confiar en mi, Gracias chicas.

Y a todas aquellas personas que en algún momento me brindaron su amistad y su apoyo y me motivaron con palabras alentadoras en momentos difíciles. Me es difícil mencionarlos a todos, pero ustedes saben quienes son gracias por compartirme momentos de su vida.

DEDICATORIA

A mis padres:

Sr. Adrián Quiterio Cantero

Sra. Remedios Gutiérrez Pérez

Por todas las enseñanzas que me han brindado en todo este tiempo, ustedes me formaron como una persona de bien, cada situación, cada palabra, todo lo eh usado como una lección de vida para no volver a cometer los mismo errores. Me pusieron en el camino correcto, y gracias a todo su apoyo incondicional, logre culminar esta noble profesión.

A mis hermanos:

Gilberto, Adriana, Beatriz a mi sobrina Karol Viridiana:

Gracias a ustedes eh aprendido afrontar los retos que se me presentan, sé que siempre pasamos por situaciones difíciles pero siempre sabemos salir adelante.

Un agradecimiento especial a mis hermanos Juan Valentín y Francisco por que ustedes dos me han enseñado a ponerme retos en la vida y que a pesar de tener dificultades eh logrado sobre salir como persona gracias por confiar en mi y por ser mas que mis hermanos y que pese a la distancia siempre están aquí presentes.

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Ventajas y limitaciones del reactor anaerobio.....	8
Cuadro 2. Caracterización del agua residual doméstica cruda antes de entrar al reactor.....	42
Cuadro 3. Datos del comportamiento de sulfatos en agua residual doméstica con un filtro anaerobio con un TRH de 12 Horas y temperatura de 21°C.....	42
Cuadro 4. Resultados obtenidos de DQO del agua residual doméstica tratada en un sistema de filtro anaerobio con un TRH de 12 Horas a 21°C.....	44
Cuadro 5. Caracterización del agua residual doméstica cruda después del lavado del reactor filtro anaerobio.....	45
Cuadro 6. Resultados obtenidos de DQO de agua residual doméstica, después de lavado del reactor filtro anaerobio con TRH de 12 Horas a 21°C.....	45
Cuadro 7. Resultados obtenidos de sulfatos en agua residual doméstica, después de lavado del reactor filtro anaerobio con un, TRH de 12 horas a 21°C.....	46
Cuadro 8. Caracterización del agua residual doméstica cruda después del lavado del reactor filtro anaerobio.....	47
Cuadro 9. Solidos suspendidos totales en agua residual y agua residual del reactor anaerobio del Tiempo de Retención Hidráulica de 12 horas.....	52
Cuadro 10. Suma de parámetros Agua cruda y reactor anaerobio.....	52
Cuadro 11. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes.....	52
Cuadro 12. Caracterización del agua residual doméstica cruda en un Tiempo de Retención Hidráulica de 24 horas.....	53
Cuadro 13. Solidos suspendidos totales en agua residual y agua residual del	

	reactor anaerobio del Tiempo de Retención Hidráulica de 24 horas.....	57
Cuadro 14.	Suma de parámetros agua cruda y reactor anaerobio.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.	Etapas de la digestión anaerobia.....	11
Figura 2.	Representación esquemática de la biopelícula polimicrobiana formación.....	16
Figura 3.	Diseño de reactor filtro anaerobio.....	20
Figura 4.	Reactor de filtro anaerobio de acrílico.....	21
Figura 5.	Reactor de filtro anaerobio localizado en la parte intermedia de los reactores posteriores izquierdo, derecho.....	22
Figura 6.	Colecta de agua residual doméstica.....	23
Figura 7.	Reactor filtro anaerobio con exceso de residuos. Antes de lavado.....	24
Figura 8.	Llenado de agua residual doméstica.....	25
Figura 9.	Reactor con lodo anaerobio.....	25
Figura 10.	Reactor filtro anaerobio después de lavado.....	26
Figura 11.	Toma de muestra de agua cruda (izquierdo), toma de muestra de reactor anaerobio (derecho) después de lavado.....	27
Figura 12.	Comportamiento de sulfatos en agua residual doméstica tratada con un filtro anaerobio con un, TRH de 12 horas a 21°C.....	43
Figura 13.	Remoción de la DQO de agua residual doméstica tratada en un sistema de filtro anaerobio con un TRH de 12 Horas a 21°C.....	44
Figura 14.	Remoción de la DQO de agua residual doméstica, después de lavado del reactor filtro anaerobio con TRH de 12 Horas a 21°C.....	46
Figura 15.	Comportamiento de sulfatos en agua residual doméstica, después de lavado del reactor filtro anaerobio con un, TRH de 12 horas a 21°C.....	47
Figura 16.	Remoción de la DQO de agua residual doméstica, después de inoculación del reactor filtro anaerobio con TRH de 12 Horas a	

	21°C.....	48
Figura 17.	Comportamiento de sulfatos en agua residual doméstica, después de inoculación del reactor filtro anaerobio con un, TRH de 12 horas a 21°C.....	49
Figura 18.	Remoción de amoniaco en agua residual doméstica, después de inoculación del reactor filtro anaerobio con un, TRH de 12 horas a 21°C.....	50
Figura 19.	Remoción de la DQO de agua residual doméstica, con un TRH de 24 Horas a temperatura de 21°C.....	54
Figura 20.	Comportamiento de sulfatos en agua residual doméstica, con un TRH de 24 horas a una temperatura de 21°C.....	55
Figura 21.	Remoción de amoniaco en agua residual doméstico con un TRH de 24 horas a temperatura de 21°C.....	56

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
Agradecimientos.....	I
Dedicatoria.....	Ii
Índice de cuadros.....	iii- iv
Índice de figuras	v-vi
Resumen.....	1
I. INTRODUCCIÓN.....	2-3-4
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
Hipótesis.....	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1. Generalidades.....	6
2.1.1. Agua residual doméstica.....	6
2.1.2. Aspectos, físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales.....	6
2.1.3. Reutilización del agua residual.....	7
2.2. Filtro anaerobio.....	7-8
2.2.1 Reactor filtro anaerobio.....	8
2.3. Digestión anaerobia.....	9
2.3.1. Aplicaciones de la digestión anaerobia.....	9
2.4. Etapas de la digestión anaerobia.....	10
2.4.1. Hidrolisis.....	10
2.4.2. Acidogénesis.....	10
2.4.3. Acetogénesis.....	10
2.4.4. Metanogénesis.....	10
2.5. Factores que influyen en el metabolismo anaerobio.....	12
2.5.1. pH	12
2.5.2. Temperatura.....	12
2.5.3. Composición del sustrato.....	12
2.5.4. Tóxicos/Inhibidores.....	13

2.5.5. Ácidos Grasos Volátiles.....	13
2.5.6. Alcalinidad.....	14
2.6. Biopelícula.....	14
2.6.1. Materiales utilizados como medio filtrante.....	14
2.7. Fases para la formación de biopelícula.....	15
2.7.1. Primera fase: Adhesión reversible a la superficie.....	15
2.7.2 Segunda fase adhesión irreversible a la superficie.....	15
2.7.3 Tercera fase biopelícula/matriz protectora viscosa.....	15
2.8. Espuma de poliuretano.....	17
2.9. Tiempo de Retención Hidráulica.....	17
2.10. Tratamiento del agua residual doméstica mediante el uso de filtros anaerobios.....	18
III. METODOLOGÍA.....	19
3.1. Ubicación del experimento.....	19
3.2. Tipo de agua y lugar de colecta.....	19
3.3. Parámetros.....	19
3.4. Material experimental.....	19
3.5. Establecimiento del experimento.....	22
3.6. Alimentación del reactor.....	23
3.7. Ensayos: análisis del agua residual doméstica.....	24
3.8. Lavado de reactor filtro anaerobio.....	25-26
3.9. Toma de muestra.....	27
3.10. Parámetros realizados.....	28
3.10.1. Demanda Química de Oxígeno.....	28-30
3.10.2. pH.....	31-32
3.10.3. Determinación de solidos totales.....	33
3.10.4. Determinación de ion sulfato.....	34-35
3.10.5. Determinación de nitratos.....	36-37
3.10.6. Determinación de amoniaco.....	38-39
3.10.7. Temperatura.....	39-40

3.11. Norma Oficial Mexicana.....	41
3.12. Análisis estadístico.....	41
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42-45
4.1. Comportamiento de la eficiencia de remoción después de lavado de reactor.....	45-47
4.1.2. Inoculación del sistema de tratamiento filtro anaerobio.....	47-52
4.1.3. Tiempo de Retención Hidráulica de 24 horas del agua residual doméstica.....	52-57
V. CONCLUSIONES.....	58-59
VI. GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	60
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	61-67

RESUMEN

El filtro anaerobio constituye un sistema eficaz para el tratamiento anaerobio de las aguas residuales. No se requiere reciclado ya que la biomasa permanece adherida al relleno de filtro y por lo tanto no se pierde con el efluente. Es posible operar los tratamientos anaerobios a temperaturas menores que las requeridas en el proceso de contacto debido a la concentración elevada de biomasa presente en el filtro.

Este trabajo consistió en trabajar un reactor de filtro anaerobio empacado con espuma de poliuretano en dos Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) para llevar a cabo la remoción de materia orgánica presente en el agua residual doméstica. El experimento se realizó a escala de laboratorio por dos etapas, una de acondicionamiento y la otra en la estabilización de los reactores. Se trabajaron con diferentes parámetros que son; DQO, amoníaco, nitratos, sulfatos, sólidos suspendidos totales, pH.

Se obtuvo una remoción de materia orgánica de 80 % en el TRH de 12 horas y una remoción de 72% en el TRH de 24 horas, en lo que destaca que la implementación de un filtro anaerobio es factible para la eliminación de DQO.

El reactor presentó un aumento de concentración de SO_4^{-2} , para los TRH presentando una remoción de un 87% en tiempo de 12 horas, y una concentración de sales para el TRH de 24 horas.

Para el TRH de 12 y 24 horas en ambos reactores se obtuvo un 5 y 4% de amoníaco, por lo que el agua residual debió tener una elevada cantidad de biomasa lo que ocasionó que no se forme demasiado amoníaco.

Los sólidos suspendidos totales en este caso para el TRH de 12 horas, se logró una degradación eficiente de sólidos suspendidos reduciendo 257 mg/l en comparación con el agua cruda, para el TRH de 24 horas se generaron sólidos suspendidos aproximadamente 715 mg/l más que el agua de cruda, probablemente se dio esta concentración por el lodo adherido al reactor o la presencia de biomasa.

Palabras clave: **Espuma de poliuretano, filtro anaerobio, TRH.**

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación de agua genera problemas técnicos, sociales y de salud, por un lado, se agotan cada vez más fuentes de agua potable (solo el 1.7% de la que hay en el mundo es potable en su estado natural y de este porcentaje 0.7% se encuentra congelada en los polos), por otra parte se contaminan cuerpos de agua que pueden ser utilizados por otras comunidades (Ríos, lagos, mantos freáticos, océanos). La mayoría de los vertidos de aguas residuales que se hacen en el mundo no son tratados, simplemente se descargan en el río, mar o lago más cercano y se deja que los sistemas naturales con menor eficacia y riesgo degraden los desechos de forma natural.

El tratamiento anaeróbico se ha utilizado tradicionalmente para tratar lodos y aguas residuales de alta resistencia. La escalada de los costos de energía durante la crisis energética de la década de 1970 estimuló el interés en la investigación y aplicación de nuevos sistemas anaerobios, tales como el filtro anaeróbico (FA) y el reactor de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB) para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. Los nuevos sistemas anaerobios son capaces de tratar las aguas residuales de baja resistencia al mantener alto tiempo de retención de sólidos, que es independiente del tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) en un digestor es uno de los factores más importantes para el control de los sistemas de digestión anaerobia. El fenómeno de lavado, el mecanismo de procesos de digestión de dos fases y la transferencia de hidrógeno son afectados por el tiempo de retención hidráulica (54). Sin embargo, a bajas temperaturas, la demanda química de oxígeno, la eficiencia de eliminación, se necesita un mayor tiempo de retención hidráulica y la cantidad acumulada de suspender sólidos en los reactores anaerobios aumenta debido a la velocidad de hidrólisis más baja.

El tratamiento anaeróbico es cada vez más aplicado para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, especialmente para los países en desarrollo, debido a una baja inversión en la construcción, operación y mantenimiento, los pequeños requerimientos de tierra, la baja producción de fangos y la producción de biogás. En las zonas

tropicales, donde la temperatura oscila entre los 20 y 35 °C, el proceso anaeróbico es efectivo para el tratamiento de aguas residuales domésticas (13).

Los sistemas de biopelículas han cobrado gran importancia en los últimos años, principalmente en el tratamiento de aguas residuales. Una comunidad de microorganismos embebidos en una matriz polimérica orgánica y adheridos a una superficie dan a la formación de una Biopelícula, la cual se encuentra compuesta por tres partes principales, microorganismos, una matriz polimérica y una superficie que actúa como soporte, en caso de que una de estas partes se elimine, la Biopelícula no se desarrolla, la disposición de una Biopelícula puede ser distinta según el tipo de sistema empleado (22).

Diferentes tipos de materiales sintéticos como resinas termoplásticas (poliestireno y poliuretano), polietileno de baja y alta densidad, y materiales granulares (termoplásticos), han sido estudiados como medio de soporte para el desarrollo de biopelículas aerobias y anaerobias los cuales son diferenciados de acuerdo a su porosidad y rugosidad.

Algunos investigadores han utilizado materiales de origen natural para el desarrollo de biopelículas; entre ellos destacan arena, paja, yute, piedra, grava, tallo de arrozal, arcilla granulada, piedra caliza, piedra pómez, cerámica, concha, ladrillo refractario, tierra de diatomeas, semillas de casuarina, puzolana, pizarra, madera, ostras y cenizas de carbón.

Un factor importante a considerar, sobre todo en las etapas iniciales de la formación de una biopelícula, es la característica del soporte. Se ha estudiado que aquellas superficies que presentan mayor rugosidad son más susceptibles al desarrollo de la biopelícula, ya que las cavidades o poros de su estructura permiten el asentamiento de las primeras células, protegiéndolas de esfuerzos de corte dados por la turbulencia del medio (50). El despegue de la biopelícula de la superficie se debe a fuerzas de separación y el decaimiento que ocurre cuando existen bajos niveles de oxígeno y nutrientes. Esta separación se incrementa con la velocidad del flujo y aumento de grosor de la biopelícula, y se disminuye con la rugosidad de la superficie.

Las aguas residuales domésticas son la principal fuente de contaminación y causante de grandes daños a la salud, por lo que se ha dado mucho énfasis al tratamiento anaerobio de las aguas residuales domésticas, debido a sus ventajas de ahorro de energía y la menor producción de lodos. Se implemento un sistema, mediante el uso de un filtro anaerobio empacado con espuma de poliuretano, por medio del cual se trato agua residual doméstica, analizándose los siguientes parámetros: DQO, sólidos totales suspendidos, sulfatos, amoniacos, nitratos y pH, con la aplicación de diferentes técnicas para la obtención de datos de los parámetros ya mencionados, trabajando en dos tiempos de retención hidráulica (TRH).

Debido a lo anterior se pensó en este trabajo por que es necesario implementar tecnologías que no requieran de mucha inversión y que al mismo tiempo sea práctico y fácil de utilizar mostrando ventajas y que al mismo tiempo no solo se obtenga agua tratada si no otros componentes que este tratamiento genere y que se han de gran utilidad.

OBJETIVO GENERAL

- Determinar la eficiencia del tratamiento de agua residual doméstica mediante un filtro anaerobio a tres diferentes tiempos de retención hidráulica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la eficiencia del tratamiento anaerobio de agua residual doméstica con un filtro anaerobio a un tiempo de retención hidráulica de 12 horas.
- Evaluar la eficiencia del tratamiento anaerobio de agua residual doméstica con un filtro anaerobio a un tiempo de retención hidráulica de 24 horas.

HIPÓTESIS

En algún tiempo de retención hidráulica el reactor presentará un mejor desempeño.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. GENERALIDADES

2.1.1. Agua residual doméstica

Las aguas residuales domésticas contienen todos los organismos patógenos que afectan al hombre y que llegan al aparato digestivo. Son muy ricas en nutrientes como, fósforo, nitrógeno carbono y otros en formas simples y complejas (grasas, proteínas, azúcares, vitaminas, sales o compuestos inorgánicos) los nutrientes causan demandas biológicas de oxígeno o bioquímicas de oxígeno. En estas aguas el número de bacterias coliformes varía entre 100 y 1000 millones por cada 100 ml de agua (2).

2.1.2. Aspectos físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales (2)

Características físicas: se debe considerar el aspecto, color, turbidez, sólidos suspendidos totales (SST).

Características químicas: las aguas servidas están formadas por un 99% de agua y 1% de sólidos en suspensión y solución. Pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos.

- Los sólidos inorgánicos están formados principalmente por, nitrógeno, fósforo, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y algunas sustancias tóxicas como arsénico, cianuro, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc.
- Los sólidos orgánicos se pueden clasificar en nitrogenados y no nitrogenados. Los sólidos que contienen nitrógenos en su molécula, son proteínas, ureas, aminas y aminoácidos. Los no nitrogenados son principalmente celulosa, grasas y jabones.

Características bacteriológicas: una de las razones para tratar las aguas negras o servidas es la eliminación de todos los agentes patógenos de origen humano presentes en las excretas con el propósito de cortar el ciclo de transmisión. Estos son entre otros: coliformes totales, coliformes fecales, salmonellas y virus.

2.1.3. Reutilización del agua residual

En países con grandes problemas de saneamiento y pocos recursos, a los países que están en desarrollo, si se requieren plantas de tratamiento adecuadas y sostenible de aguas residuales, ya que estos países se encuentran generalmente en zonas de temperaturas tropicales y subtropicales (por encima de 20 °C) (15), la digestión anaerobia es una tecnología clave que crea valor añadido de los subproductos (bionutrientes y el agua para su reutilización).

2.2. Filtro anaerobio.

El filtro anaerobio desarrollado a finales de los años sesenta es un reactor de cultivo fijo clasificado como de alta tasa, que alcanza la separación entre el tiempo de retención hidráulico (TRH) y el tiempo de retención celular (TRC) que puede ser del orden de 100 días, de esta manera se permite dentro del reactor un crecimiento lento de los microorganismos independientemente del flujo de agua residual. Este reactor ha encontrado aplicabilidad en el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas.

El filtro anaerobio constituye un sistema eficaz para el tratamiento anaerobio de las aguas residuales solubles. No se requiere reciclado ya que la biomasa permanece adherida al relleno de filtro y por lo tanto no se pierde con el efluente. Es posible operar los tratamientos anaerobios a temperaturas menores que las requeridas en el proceso de contacto, debido a la concentración elevada de biomasa presente en el filtro (41).

En este sistema las bacterias anaerobias están fijadas a la superficie de un soporte inerte formando biopelícula, columna de relleno, o atrapadas en los intersticios de éste, con flujo vertical. El soporte puede ser de material cerámico, plástico, espumas. Su distribución puede ser irregular (filtro anaerobio propiamente dicho, con flujo ascendente) y en este caso las bacterias se encuentran mayoritariamente atrapadas en los intersticios, o regular y orientado verticalmente en este caso la actividad es debida básicamente a las bacterias fijadas (3).

En el filtro el agua residual fluye de forma ascendente, sobre o a través de una masa de sólidos biológicos, contenidos en un reactor con material de empaque. La biomasa en el reactor puede estar adherida a la superficie del medio en forma de Biopelícula, o estar en suspensión en el líquido como un lodo granular o floculento que se distribuye en los intersticios del medio empacado como función de la velocidad ascensional. Los compuestos orgánicos solubles y los nutrientes existentes en el agua residual afluyente se difunden dentro de los sólidos biológicos, adheridos al medio o en suspensión, convirtiéndose en los productos intermedios y finales propios de la digestión anaerobia depurando de esta manera el agua (4).

2.2.1. Reactor filtro anaerobio

En los reactores de filtro anaerobio los microorganismos se fijan a soportes (carbón activo, PVC, anillos, cerámicos, espumas entre otros). El reactor consta de la estructura de soporte, de un sistema de distribución de influente, vaciado y en muchos casos un sistema de recirculación (26).

Cuadro N° 1 Ventajas y limitaciones del reactor anaerobio (26)

Ventajas	Limitaciones
Fácil de construir	Oclusiones debido a un crecimiento no uniforme de la Biopelícula
No requiere agitación mecánica	Aparición esporádica en el efluente de altas concentraciones de sólidos suspendidos
Estabilidad frente a sobrecargas o entrada de tóxicos	Tiene un gran volumen comparado con otros procesos debido al uso de soportes con baja superficie específica

2.3. Digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es una de las tecnologías más antiguas para la estabilización de las aguas residuales y lodos. Se ha aplicado desde el final del siglo XIX, principalmente para el tratamiento de los residuos domésticos (agua) en los tanques sépticos, para el tratamiento de lodos en los digestores y para el tratamiento de lodos de aguas residuales en las plantas municipales de tratamiento. La digestión anaerobia es una práctica de tratamiento de residuos atractivo en el que se pueden lograr tanto el control de la contaminación y la recuperación de energía (9), así mismo implica la degradación y la estabilización de materiales orgánicos bajo condiciones anaeróbicas por organismos microbianos y conduce a la formación de biogás (una mezcla de dióxido de carbono y metano, una fuente de energía renovable) y la biomasa microbiana (21). Este proceso permite eliminar, mediante el más bajo costo, hasta el 80% de la carga orgánica contaminante del agua.

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descomponen en productos gaseosos o biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación (3).

2.3.1. Aplicaciones de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia ha sido utilizada ampliamente para estabilizar lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, y en una menor proporción, pero con una tendencia de aumento significativo, es utilizada para el tratamiento de aguas residuales diluidas como es el caso de las aguas residuales domésticas, con bastante éxito en zonas de clima tropical, y aguas residuales concentradas como las industriales (destilerías, cervecerías, malherías, papeleras, alimentos) (43).

2.4. Etapas de la digestión anaerobia (46):

El mecanismo de digestión anaerobia se divide en cuatro etapas. Figura N°1

2.4.1. Hidrólisis; en esta etapa los compuestos insolubles y los solubles poliméricos son escindidos en compuestos de menor peso molecular, denominados mono y oligómeros (Azúcar, aminoácidos y péptidos), por acción de exoenzimas de forma tal que los compuestos pueden ser asimilados por la célula. En este proceso intervienen las bacterias fermentativas.

2.4.2. Acidogénesis: una vez que las bacterias asimilan los compuestos generados en la primera etapa estos se transforman en ácidos orgánicos saturados, principalmente propiónico, butírico y acético, en proporciones variables que dependen de las condiciones medio ambientales. Paralelamente se produce hidrógeno.

2.4.3. Acetogénesis: existen dos precursores del metano: el ácido acético y el hidrógeno de tal forma que los dos productos de la fase anterior deben ser necesariamente transformados a estos para dar lugar a la formación del metano. El avance de esta fase ésta fuertemente influenciado por las condiciones del medio especialmente por la presión parcial del hidrógeno. En esta etapa intervienen bacterias acetogénicas (productoras de hidrógeno) y bacterias metanogénicas (consumidoras de hidrogeno). La Acidogénesis siempre produce hidrógeno que se convierte en un elemento regulador del metabolismo del proceso.

2.4.4. Metanogénesis: esta es la etapa más importante del proceso, pues en ella donde se produce la remoción de la materia orgánica disuelta en el agua y la recuperación de la energía en forma de metano, adicionalmente del correcto equilibrio de esta etapa y las anteriores depende la estabilidad del proceso, intervienen las bacterias acetoclásticas y las metanogénicas hidrogenoclásticas respectivamente.

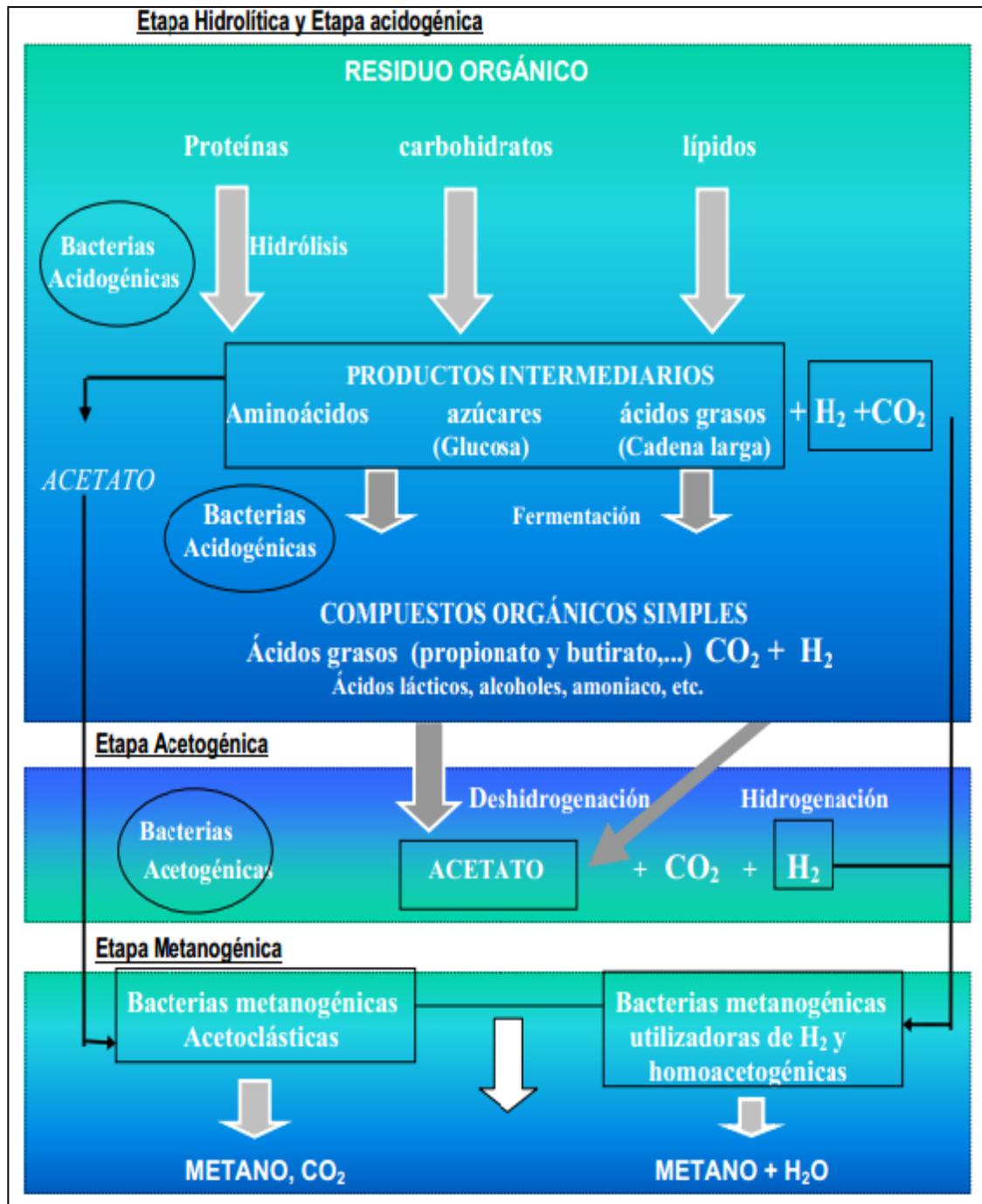


Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia (38)

2.5. Factores que influyen en el metabolismo anaerobio (1):

Existen varios factores que influyen en la digestión anaerobia, dentro de los cuales podemos encontrar: pH, temperatura, ácidos grasos volátiles (AGV's), alcalinidad, presencia de inhibidores tóxicos, entre otros.

2.5.1. pH: el intervalo óptimo de un pH, para la correcta operación del proceso de digestión anaerobia, se ha situado entre 6.8 y 7.5, sin embargo los digestores pueden operar satisfactoriamente entre 6.8 y 8.0. El control del pH en los sistemas anaerobios es de vital importancia para el desarrollo del proceso, debido a la gran susceptibilidad de los microorganismos especialmente las metanobacterias, frente a las especies acidas (25).

2.5.2. Temperatura: podrá operarse en los rangos psicrófilico (temperatura ambiente), mesófilico (temperaturas en torno a los 35 °C) o termófilico (temperaturas en torno a los 55 °C). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, pero también la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoníaco. En el rango termófilico se aseguran tasas superiores de destrucción de patógenos (3). El proceso anaerobio mesófilico es el más utilizado en la digestión anaerobia, cuyo intervalo de temperatura está entre los 25-45°C, con un ideal entre los 33-38°C (1).

2.5.3. Composición del sustrato: los microorganismos requieren del sustrato para usarlo como fuente de energía y sintetizar de él material celular.

DBO5 y DQO: La concentración del sustrato puede indicarse en términos de sólidos totales o por medida de la materia orgánica a través de indicadores tales como DBO5 o DQO. Entre mayor concentración de DQO biodegradable, mayor es la actividad metanogénicas (1).

2.5.4. Tóxicos / Inhibidores

- Amoníaco: aunque el ión amonio es un tampón importante en los reactores anaerobios, concentraciones elevadas del mismo son una de las principales causas de fallos en aguas residuales que contienen una elevada concentración de proteínas, aminoácidos o urea. La biomasa anaerobia puede adaptarse a su presencia. La toxicidad de los AGV, H_2S , NH_3 está asociada a las formas no disociadas, La cantidad de ácido/base libre depende del grado de disociación (pK), pH y concentración total en disolución (44).
- Sulfatos y sulfuros: la presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir inhibición del proceso anaerobio, especialmente de la metanogénesis. En presencia de sulfatos las bacterias metanogénicas compiten con las sulfato reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrogeno). El resultado de esta competición determinara la proporción de sulfhídrico y metano en el biogás producido (24).
- Hidrógeno: el hidrógeno es también un compuesto intermedio importante en el proceso anaerobio. Su acumulación en el medio provoca la inhibición de la acetogénesis y consecuentemente la acumulación de ácidos grasos volátiles con mas de dos átomos de carbono (24).

2.5.5. Ácidos grasos volátiles: cuando el pH se sale del rango óptimo, las bacterias metanogénicas se ven inhibidas, sin embargo las bacterias acidogénicas continúan actuando de manera normal, actividad que genera gran cantidad de ácidos grasos volátiles, causando acidificación del reactor (1). La inestabilidad de un reactor anaerobio se manifiesta generalmente por un rápido incremento en la concentración de los AGV, lo que indica un fallo en las poblaciones metanogénicas debido a la sobrecarga, variación del pH del afluente, falta de nutrientes, o la infiltración de sustancias tóxicas (44).

2.5.6. Alcalinidad: en concreto la alcalinidad parcial, puede ayudar a mantener los valores óptimos de pH, suministrando la capacidad tampón necesaria. La presencia de bicarbonato puede ayudar a neutralizar los ácidos grasos formados durante la fase de fermentación. Es necesario disponer de una alcalinidad suficiente estimada de 1.5g/L, para el funcionamiento adecuado de los sistemas anaerobios (26).

2.6. Biopelícula

Una biopelícula puede ser definida como: una agregación de bacterias, algas, hongos y protozoo encerrado en una matriz que consiste en una mezcla de compuestos poliméricos, principalmente polisacáridos, generalmente se hace referencia como sustancia polimérica extracelular (EPS). Más del 99 % de los microorganismos en la Tierra viven dentro de estos biopolímeros (51).

Se define biopelícula como: una comunidad estructurada de las células bacterianas encerrado en una matriz polimérica de producción propia y adherente a una superficie inerte o viva. En la naturaleza constituyen un modo de crecimiento protegido que permite la supervivencia de las bacterias en un medio hostil. Las estructuras que forman estas microcolonias contienen canales por los que circulan los nutrientes (8).

La aplicación de técnicas de inmovilización de células para los procesos de tratamiento de agua residual ha tenido mucha atención últimamente. Esto se ha conllevado a la evaluación de distintos tipos de inmovilización y una amplia variedad de soportes. La inmovilización por unión puede lograrse mediante la adhesión espontanea de la biomasa al soporte favoreciendo la remoción de materia orgánica (45).

2.6.1. Materiales utilizados como medio filtrante

Se han utilizado diferentes tipos de materiales sintéticos como son: resinas termoplásticas (poliestireno y poliuretano), polietileno de baja y alta densidad y

materiales granulares (termoplásticos), han sido estudiados como medio de soporte para el desarrollo de biopelícula (45). Entre los distintos materiales disponibles la espuma de poliuretano es el más sencillo de utilizar debido a su bajo costo, poca toxicidad y una alta estabilidad operacional.

Por otra parte también se han utilizado soportes origen natural podemos encontrar diferentes sustratos tales como fibra de coco, cañas de algodón, aserrín, cascarilla de arroz, estropajo (semilla seca de *Luffa*) granos de café, fibra de madera de papaya, cubos de madera (18).

2.7. Fases para la formación de biopelícula (39)

2.7.1. Primera fase, adhesión reversible a la superficie: los microorganismos normalmente se perciben como seres solitarios que flotan libremente, es decir, en estado planctónico.

2.7.2. Segunda fase, adhesión irreversible a la superficie: a medida que las bacterias se multiplican, se adhieren más firmemente (sésiles) y se diferencian, cambiando los patrones de expresión génica en formas que promueven la supervivencia.

2.7.3. Tercera fase, biopelícula/matriz protectora viscosa: una vez bien adheridas, las bacterias comienzan a segregar una matriz circundante conocida como sustancia polimérica extracelular (SPE). Se trata de una matriz protectora o “limo”. A partir de ahí, las pequeñas colonias bacterianas empiezan a formar una biopelícula inicial.

En la mayoría de las especies, el glicocálix es predominantemente aniónico y crea un sistema de barrido eficaz para atrapar y concentrar minerales y nutrientes esenciales del medio ambiente circundante. En esencia, el glicocalix crea un campo de fuerza tridimensional que rodea, anclas, y protege a las bacterias unidas a la superficie (12).



Figura 2. Representación esquemática de la biopelícula polimicrobiana formación (40)

2.8. Espuma de poliuretano

La espuma de poliuretano es un material plástico poroso formado por una agregación de burbujas, conocido también por los nombres coloquiales de goma-espuma, goma-pluma, esponja, hule espuma.

Sistema de espuma de poliuretano: un material aislante formado por polioli e isocianato, que mediante reacción química entre ellos dan lugar a la espuma de poliuretano. Dicha reacción libera dióxido de carbono y gas que va formando las burbujas (7).

El poliuretano al igual que el polivinil, son materiales ampliamente usados en la inmovilización de microorganismos gracias a su resistencia a condiciones ambientales diferentes. Se ha reportado el uso de estas sustancias en la inmovilización de *Scenedesmus obliquus* para la remoción de metales en agua (48).

2.9. Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) (26)

Es el tiempo que permanece el agua residual en el interior del reactor y se define según la siguiente expresión:

$$TRH = \frac{V_r}{Q_i} \quad (d)$$

En donde V_r es el volumen del sistema (m^3) y Q_i es el caudal del influente (m^3/d).

El TRH ha de ser lo suficientemente elevado para permitir una eficaz degradación, por parte de la biomasa, de las sustancias en disolución presentes en el agua residual.

2.10. Tratamiento de agua residual doméstica mediante el uso de filtros anaerobios

Se han realizado diversos trabajos sobre la utilización de filtros anaerobios para el tratamiento de aguas residuales utilizando espuma de poliuretano en donde el Tiempo de Retención Hidráulica va variando de acuerdo a las temperaturas que se encuentre.

(54) Investigaron en un filtro anaerobio (FA) y un anaeróbico híbrido (AH) el pre tratamiento de las aguas residuales a una temperatura de 13°C y un Tiempo de retención hidráulica (TRH) de 4 horas, el filtro anaerobio y la parte superior del reactor anaeróbico híbrido tenían hojas verticales de espuma de poliuretano reticulada con las perillas. El reactor FA mostró una eliminación significativamente mayor de la demanda total y en suspensión química de oxígeno (DQO) que el reactor de AH, respectivamente, 55% y 82% en el reactor de FA y el 34% y el 53% en el reactor de AH. Debido a que los reactores se hicieron funcionar a un corto TRH y la baja temperatura, la hidrólisis, la acidificación y la metanogénesis sobre la base de la DQO influente se limitan, respectivamente, 12%, 21% y 23% para el reactor de FA y el 12%, 17% y 16% para el reactor de AH. Por lo tanto, se recomienda el reactor FA para el pre-tratamiento de aguas residuales domésticas a bajas temperaturas.

(49) De igual manera se realizó un trabajo en donde utilizaron una columna de sabanas con espuma de poliuretano reticulada en donde introdujeron agua residual domestica por un corto tiempo para evaluar el atrapamiento físico y filtración de partículas. Los resultados revelaron que para la eliminación suspendida de DQO que fue en un >75% eficaz con un tiempo de retención hidráulica bajo de 0,5 horas. Por lo tanto la presencia de una Biopelícula anaerobia en conjunto con la eliminación de sólidos suspendido (SS) del influente aumentaron la eficiencia de eliminación en el tratamiento de las aguas residuales domesticas en un filtro con espuma de poliuretano a una temperatura de 24°C.

III. METODOLOGÍA

3.1. Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de Biología del Departamento de Botánica, en la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila México a los 25°21'13" latitud norte, 101°02'01" longitud oeste y a una altura de 1742 m.s.n.m. de acuerdo al Global Positions System (GPS).

3.2. Tipo de agua y lugar de colecta

Para el experimento se colectó agua residual doméstica proveniente de los internados, comedor, laboratorios y respectivos departamentos de la institución el cual se tomó antes de que llegue a los cárcamos (Ubicado por el Jardín Botánico).

3.3. Parámetros

El agua residual doméstica de entrada al reactor, se le realizaron análisis de los diferentes parámetros que son: DQO, temperatura, nitratos, pH, sulfatos, sólidos totales suspendidos y amoníaco.

3.4. Material experimental

Para este trabajo se utilizó un filtro anaerobio de acrílico (Figura 3) completamente cerrado el cual presentara las siguientes dimensiones: una tapa con orificios S/R que tiene una base de 16 cm de diámetro, una ranura para Oring, con una altura del tronco de 35 cm en donde se encuentra un orificio de $\frac{1}{2}$ con rosca a 1.5 cm de base con una Dimensión = 8 cm con una respectiva tapa en la parte inferior en donde tendrá una perforación para la entrada del agua a tratar, este reactor tendrá una capacidad para 5.8 litros de agua (Figura 4). En el interior de este reactor esta un filtro de 24 cm en donde se colocó como soporte espuma de poliuretano para la formación de Biopelícula que es en donde se encontraron suspendidos los microorganismos.

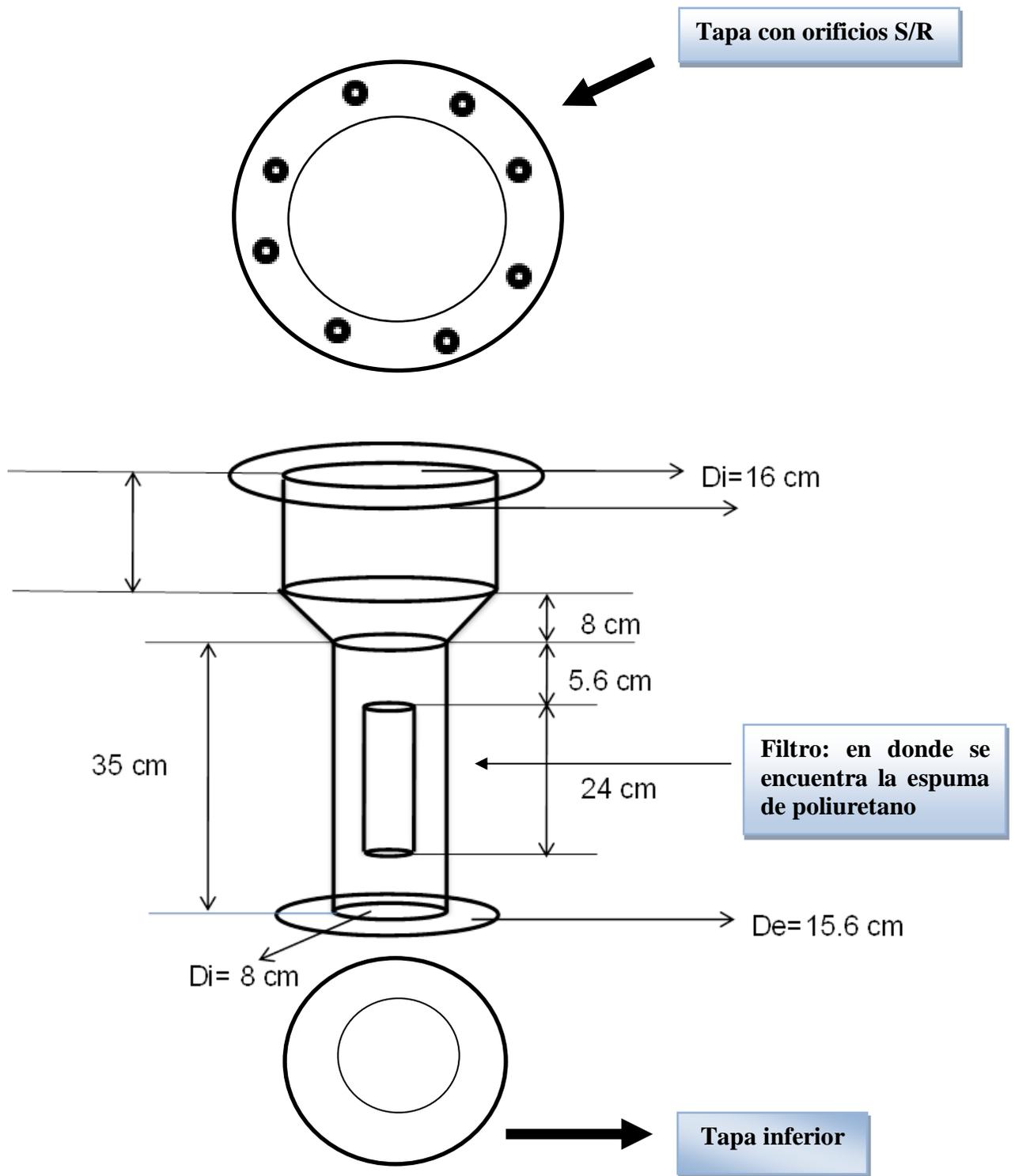


Figura 3. Diseño de reactor filtro anaerobio



Figura 4. Reactor de Filtro Anaerobio de acrílico

3.5. Establecimiento del experimento

En la Figura 5 se muestra el reactor del filtro anaerobio, el cual estuvo puesto sobre una mesa, en donde se encontraba conectado a una bomba peristáltica en el que su función era darle circulación al agua residual. Se puso un garrafón con 20 litros de agua residual, este conectaba con una manguera que estaba en contacto con el reactor para la entrada del agua. Dentro de este reactor se colocó la espuma de poliuretano, para la formación de biopelícula.

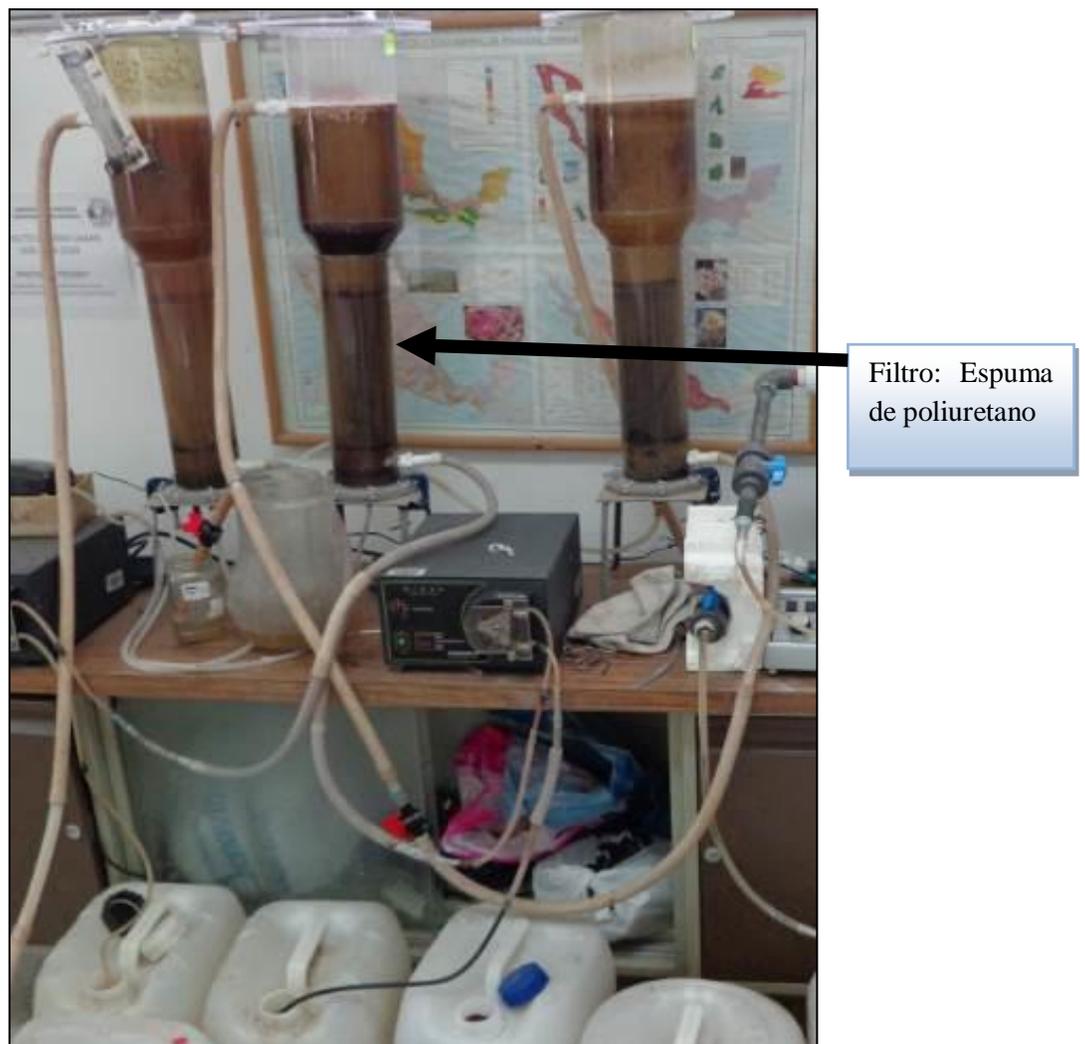


Figura 5. Reactor de Filtro anaerobio, localizado en la parte intermedia de los dos reactores posteriores izquierdo y derecho.

3.6. Alimentación del reactor

Se colecta agua residual doméstica antes de que esta llegue a los cárcamos (Figura 6), ubicados a un costado del Jardín Botánico de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en garrafones con 20 litros. Estos fueron puestos junto con una manguera la cual tenía una conexión al reactor. El reactor se alimentaba cada tercer día. Tomándose una muestra de agua cruda para realizar los parámetros correspondientes.



Figura 6. Colecta de agua residual doméstica

3.7. Ensayos: análisis del agua residual doméstica

Antes de iniciar se realizaron diversos ensayos al agua residual, tomando en cuenta los parámetros indicados: pH, Temperatura, DQO, Nitratos, Amoniac, Sulfatos, Solidos totales suspendidos. Los reactores mostraron una deficiencia en la remoción de materia orgánica.

En la Figura 7 se muestra el exceso de biomasa generada en el reactor de filtro anaerobio.



Figura 7. Reactor filtro anaerobio, con exceso de residuos. Antes de lavado.

3.8. Lavado de reactor filtro anaerobio

Se llevó a cabo un lavado al reactor, debido a las deficiencias que presento al realizar los ensayos de los parámetros, por lo que se realizó una limpieza y lavado para volver a introducir agua residual domestica como se muestra en la Figura 8. Así mismo se re inoculo el día 26 de octubre de 2013 con lodo anaerobio el cual fue molido y colado para introducirlo en el reactor como se muestra en la Figura 9. El lodo que se utilizo para la re inoculación fue donado por la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila.



Figura 8. Llenado de Agua Residual Doméstica



Figura 9. Reactor con Lodo Anaerobio

El lodo anaerobio se dejó una semana dentro del reactor para su re estabilización y después fue retirado para así iniciar el tratamiento de aguas residuales. En la Figura 10 se muestra como quedo el reactor anaerobio después de lavado y de la re inoculación de lodo, para su posterior manejo y toma de muestra.



Figura 10. Reactor de filtro anaerobio después de lavado

3.9. Toma de muestra

Se tomó 400 ml de muestra de agua residual doméstica almacenándose en frascos de plástico como se observa en la Figura 11. Se tomó el agua cruda (no entra al reactor) posteriormente, se tomó el agua del primer tiempo de retención hidráulica que fue de 12 Horas tomando 3 muestras de cada una y después de 24 Horas. Así mismo se realizaron los diferentes análisis para determinar los parámetros.



Figura 11. Toma de muestra de agua cruda (Izquierdo), toma de muestra de reactor anaerobio (Derecho). Después de lavado

3.10. Parámetros realizados

3.10.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO) (31)

La materia orgánica es oxidada por el Dicromato de potasio en un medio fuertemente ácido en presencia del catalizador (Ag_2SO_4 y H_2SO_4). La coloración pasa de un color amarillo a verde azul y se lee a una absorbancia de 600 nm. Esta es la base de las mediciones de los reactores anaerobios las condiciones de los parámetros de operación para los tratamientos industriales y urbanos.

Materiales y reactivos

Digestor HACH DRB/ 200

Tubos Hach con tapón de rosca

Espectrofotómetro HACH DR/5000

Centrifuga Solbat J600

Desecador Arsa

Micropipetas Labmate Soft. 1% 5ml, 100% 1000 ul.

2 Frascos ámbar de 1lt

Solución de Dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)

Solución de Acido sulfúrico-plata (Ag_2SO_4)

Dicromato de potasio, Alquime ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)

Sulfato de mercurio, Alquime (HgSO_4)

Ácido sulfúrico, Alquime (H_2SO_4)

Sulfato de plata, Alquime (Ag_2SO_4)

Bifalato de potasio, Alquime ($\text{H00C-C}_6\text{H}_4\text{-COOK}$)

Preparación de soluciones:

Solución de Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$): solución digestora para altas concentraciones (mayores a 75 mg DQO/L). Secar durante 2 horas a 103 °C, 20 gramos de dicromato de potasio. Enfriar en un desecador y pesar 10.216 gramos de dicromato, pasar este dicromato a un matraz de aforación de un litro y añadirle 500 ml de agua destilada, adicionar 33.3 gramos de sulfato mercúrico ($HgSO_4$), adicionar 167 ml de ácido sulfúrico concentrado lentamente por ser una reacción exotérmica en baño de hielo, por último aforar a un litro con agua destilada cuando la mezcla se haya enfriado, en el caso de que no todas las partículas se hayan disuelto, se mezcla con agitación magnética, para después pasar esta mezcla a un frasco ámbar, ya que puede sufrir una descomposición por la luz.

Solución de Ácido sulfúrico-Plata: pesar con precisión 15 gramos de sulfato de plata, pasar este compuesto a un matraz de aforación de un litro, aforar a 1 litro con ácido sulfúrico concentrado, dejarlo reposar durante dos días en un lugar seco y oscuro para su completa disolución. Después pasar esta solución a un frasco ámbar.

Procedimiento:

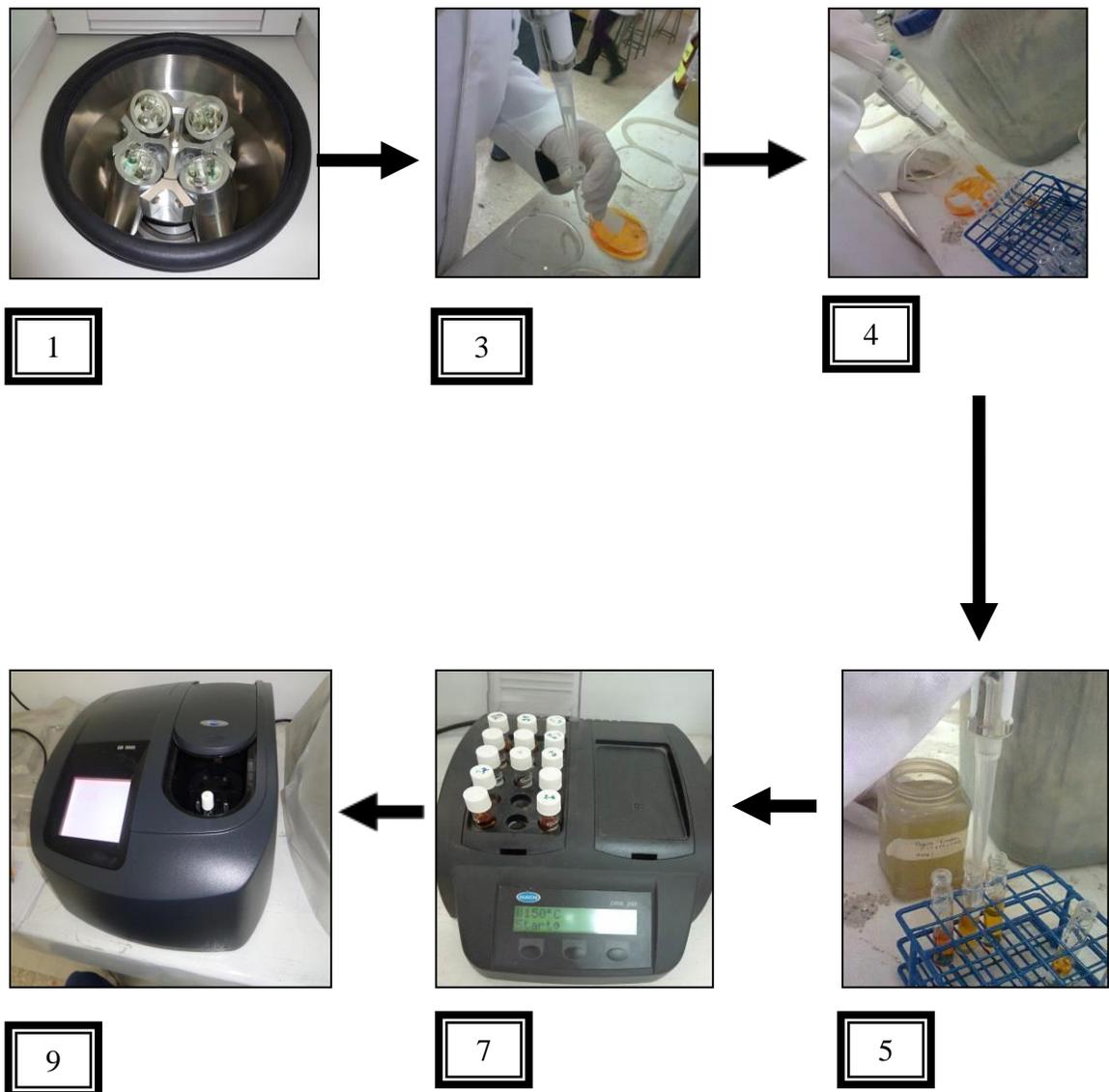
- 1.- Colocar la muestra en tubos de centrifugación.
- 2.- Encender el termoreactor y dejar calentar por 30 minutos, para alcanzar la temperatura adecuada (150°C).
- 3.- En un tubo Hach con tapón de rocas añadir 3.5 ml de la solución de Ac. Plata.
- 4.- Adicionar en el tubo Hach 1.5 ml de la solución digestora, Dicromato de potasio.
- 5.- Agregar 2.5 ml de la muestra problema, cerrar bien con el tapón de rosca; es necesario repetir todos los pasos para realizar un blanco de referencia (agua destilada).
- 6.- Agitar lentamente por inversión lentamente.
- 7.- Colocar los tubos en el termoreactor durante 2 horas.

8.- Sacar los tubos y dejar enfriar a temperatura ambiente.

9.- Leer las absorbancia en el espectrofotómetro Hach a una longitud de onda de 600 nm.

10.- Calcular la concentración de la DQO con la curva estándar.

Diagrama de flujo (DQO)



3.10.2. Determinación de pH (30)

Es una medida de la concentración de iones de hidrógeno en un medio. Esta concentración está directamente relacionada al carácter ácido, neutro o básico del medio. Un pH menor de 7.0 indica una tendencia hacia la acidez, mientras que un valor mayor de 7.0 muestra una tendencia hacia lo alcalino. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 4 y 9, aunque muchas de ellas tienen un pH ligeramente básico debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos.

Un pH muy ácido o muy alcalino, puede ser indicio de una contaminación industrial. El valor del pH en el agua, es utilizado también cuando nos interesa conocer su tendencia corrosiva o incrustante, y en las plantas de tratamiento de agua. Este método determina el pH, midiendo el potencial generado (en milivolts) por un electrodo de vidrio que es sensible a la actividad del ión H^+ , este potencial es comparado contra un electrodo de referencia, que genera un potencial constante e independiente del pH. El electrodo de referencia que se utiliza es el de calomel saturado con cloruro de potasio, el cual sirve como puente salino que permite el paso de los milivolts generados hacia al circuito de medición.

Materiales y equipo:

Vasos de precipitado de 100 ml

Agua residual

Agua destilada

Potenciómetro Modelo 8000 VWR.

Procedimiento:

- 1.- El potenciómetro debe ser calibrado en cada uso con las soluciones buffer de 4 y 7.
- 2.- Introducir el electrodo del potenciómetro en el vaso con agua residual.

3.- Las lecturas de pH aparecen cuando el indicador (un ojo parpadeante) se detiene en la pantalla.

Diagrama de flujo (pH)



2

3

3.10.3. Determinación de sólidos totales (ST) (29)

La mayor parte de los contaminantes de aguas son sólidos, disueltos o suspendidos. En un concepto general, los sólidos se definen como la materia que permanece como residuo después de someter a evaporación una muestra de agua a una temperatura de 105 °C. El agua de mar contiene sales en concentraciones de 35,000 mg/l.

En general se considera un agua salada cuando los sólidos disueltos se encuentran por encima de los 3,000 mg/l, y un agua dulce si su contenido es menor a los 500 mg/l.

Materiales y equipo:

Crisoles de porcelana

Pinzas para crisol

Desecador

Balanza analítica

Estufa Fisher a temperatura 105 °C

Agua residual

Procedimiento:

- 1.- Enumerar los crisoles y colocar en la estufa, durante 1 o 2 horas a peso constante. Sacar y meter al desecador. Luego se pesan en la balanza analítica.
- 2.- Agregar con una pipeta a cada crisol 10 ml de agua residual.
- 3.- Colocar los crisoles en la estufa a 105 °C por un periodo de 8 horas.
- 4.- Sacar y colocar en desecador, enfriar y pesar.
- 5.- Los sólidos totales se expresan en mg/l.

3.10.4. Determinación de Ion –sulfato (32)

El ion sulfato precipita con cloruro de bario, en un medio ácido (HCl), formando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La absorción espectral de la suspensión del sulfato de bario se mide con un nefelómetro o fotómetro de transmisión.

La concentración de ion sulfato se determina por comparación de la lectura con una curva patrón.

Materiales y reactivos

Tubos hach

Solución acondicionadora

Cloruro de bario (15grms)

Micropipeta Labmate Soft. 1%5 ml, 100%1000 ul.

Matraz de aforacion

Matraz Erlenmeyer 200 ml

Matraz de 1 L

Magneto

Agua destilada

Parilla de agitación

Centrifuga Solbat J600

Espectrofotómetro HACH DR/5000

Preparación de solución acondicionadora:

Para un litro de solución acondicionadora se requiere, colocar en una parrilla de agitación, un matraz con 450 ml de agua destilada, posteriormente se le agrega 150 ml

de alcohol etílico disipropílico al 95%, pesar 112.5 gramos de cloruro de sodio y agregar al matraz hasta que se disuelva, una vez disuelto se agrega el 45 ml ácido clorhídrico y por último se agrega 75 ml de glicerol dejar agitando por 15 minutos hasta que esté bien disuelto y vaciar en un frasco ámbar.

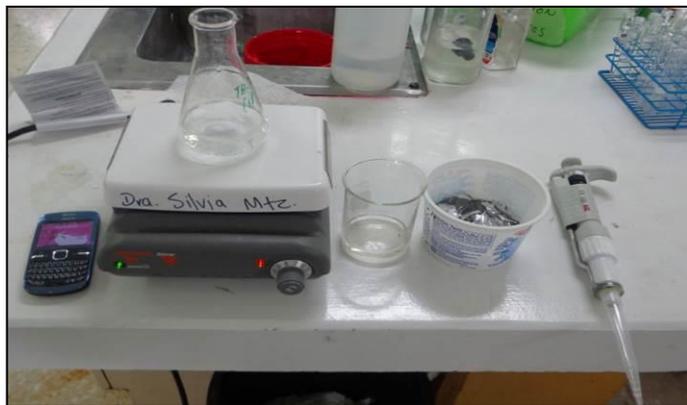
Procedimiento:

- 1.- Centrifugar 2 ml de muestra a 3000 revoluciones por 3 minutos.
- 2.- En un matraz de aforación colocar 1 ml de muestra y aforar a 100, posteriormente vaciar a un matraz Erlenmeyer de 200 ml.
- 3.- Colocar el magneto dentro del matraz, agregar 5 ml de solución acondicionadora, y .15 g de cloruro de bario dejando agitar por 1 minuto.
- 4.- Agitación entre 7 y 8.
- 5.- Leer a 420 nm.

Diagrama de flujo (Ion sulfato)



1



3-4



5

3.10.5. Determinación de Nitratos (33)

El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas.

El nitrato se encuentra sólo en pequeñas cantidades en las aguas residuales domésticas, pero en el diluyente de las plantas de tratamiento biológico desnitrificante, el nitrato puede encontrarse en concentraciones de hasta 30 mg de nitrato.

Materiales y reactivos:

Tubos hach

Baño de hielo

Micropipeta Labmate Soft. 1% 5 ml, 100% 1000 ul, 20% 200 ul.

Ácido sulfámico

Ácido homotrópico

Ácido sulfúrico

Espectrofotómetro HACH DR/5000

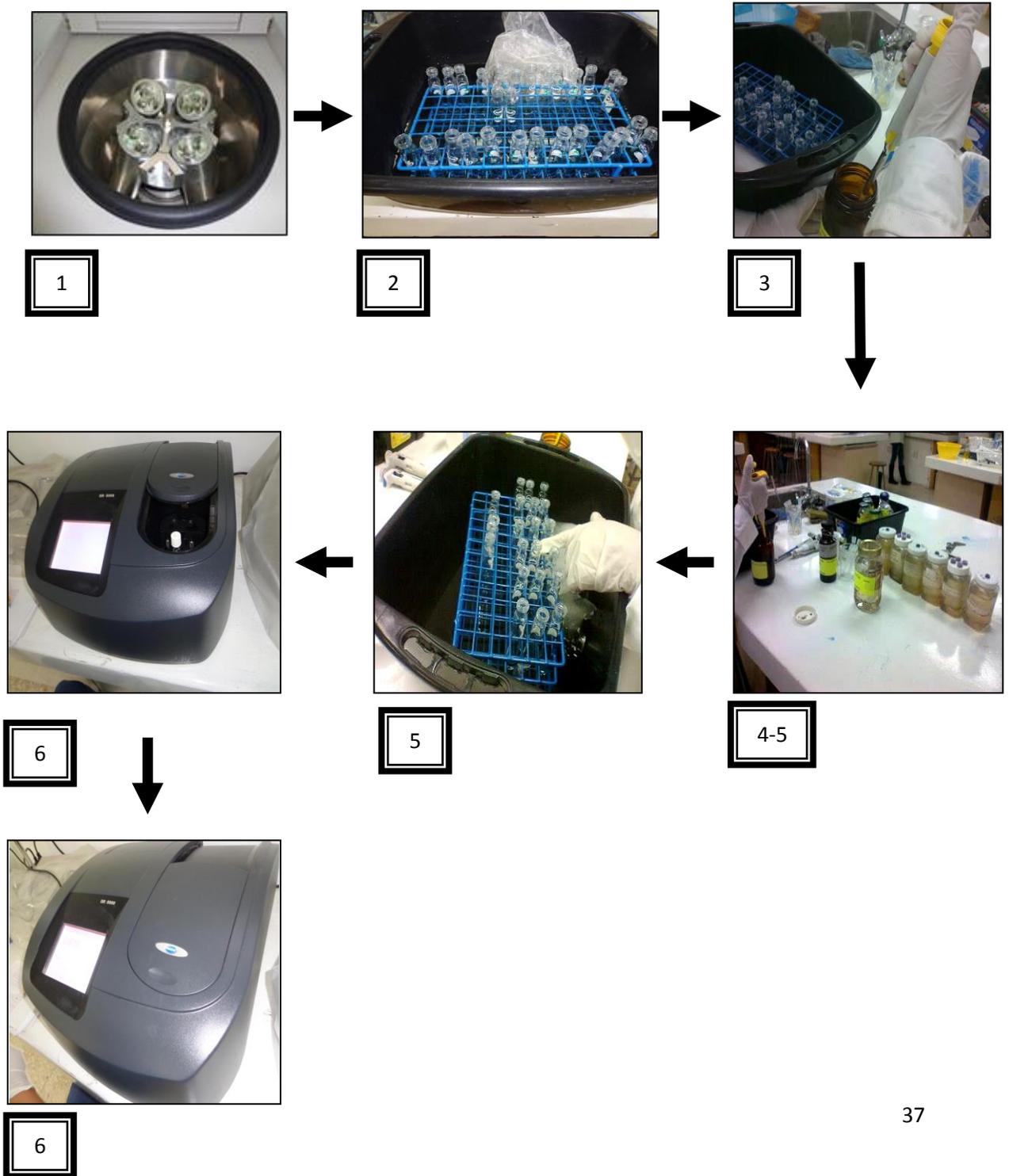
Procedimiento:

- 1.- Centrifugar muestra
- 2.- Colocar 1 ml de muestra (si la muestra excede los 50 ml/grms de Nitrato/litro, Hacer una dilución 1:10 o mayor) En un tubo hach dentro de un baño de hielo
- 3.- Adicionar 0.04 ml de ácido sulfámico al 2% (reposo de 4 minutos en baño lleno-agitar)
- 4.- Agregar 0.4 ml de ácido homotrópico. Agitar (reposar 3 minutos en baño de hielo)

5.- Agregar 2.56 de ácido sulfúrico concentrado reposar 45 min en baño de hielo.
Posteriormente dejar a temperatura ambiente

6.- Leer a 410 nm

Diagrama de flujo Nitratos



3.10.6. Determinación de Amoniac (35)

En el método Kjeldahl los compuestos nitrogenados de la muestra se descomponen con ácido sulfúrico concentrado en caliente, transformándose el nitrógeno de la mayoría de los grupos funcionales orgánicos en amonio. Cuando la descomposición se ha completado la disolución se enfría, se diluye y se alcaliniza con hidróxido de sodio concentrado. El amoniaco liberado se destila y se adsorbe en una disolución de concentración conocida de ácido bórico.

Los grupos amino y amido se convierten cuantitativamente a ión amonio. Sin embargo los grupos nitro, azo o azoxi generan en las mismas condiciones, otros productos nitrogenados (N_2 u óxidos de nitrógeno).

Materiales y reactivos

Matraz Erlenmeyer de 200 ml

Micropipeta Labmate Soft. 100% 1000 ul, 20% 200 ul

Espectrofotómetro HACH DR/5000

pH Conductivity

Pizeta

Agua des ionizada

Filtros de papel

Solución sulfato de zinc

Hidróxido de sodio

EDTA

Reactivo de Nessler

Procedimiento:

- 1.- 2 ml de muestra + 18 ml de agua des ionizada
- 2.- 200 ul/ $ZnSO_4$
- 3.- Agitar por 3 minutos
- 4.- NaOH ajustar a 10.5 con el ph metro
- 5.- Agitar por 3 minutos y reposar por 10 minutos
- 6.- Filtrar con papel filtro
- 7.- 1 micro gota de EDTA
- 8.- 800 ml de Reactivo Nessler
- 9.- Esperar 30 minutos
- 10.- Leer a 425 nm

3.10.7. Temperatura (34)

La temperatura termodinámica, también denominada temperatura absoluta, es una de las magnitudes fundamentales que definen el Sistema Internacional de Unidades (SI) y cuya unidad es el grado kelvin simbolizado como K. Esta unidad se utiliza tanto para expresar valores de temperatura termodinámica como intervalos de temperatura.

El método de prueba normado establece el procedimiento para realizar la medición en el sitio donde se encuentra el agua, y el resultado se expresa en grados centígrados °C.

Las temperaturas elevadas en el agua son indicadores de actividad biológica, química y física en el agua, lo anterior tiene influencia en los tratamientos y abastecimientos para el agua, así como en la evaluación limnológica de un cuerpo de agua, por lo que es necesario medir la temperatura como un indicador de la presencia de compuestos y contaminantes en el agua, a través del método de prueba.

Reactivos y patrones

Agua: Debe entenderse agua que cumpla con las siguientes características, Resistividad, megohm-cm a 25°C: 0,2 mínimo; b) Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C: 5,0 máximo y c) pH: 5,0 a 8,0.

Materiales

Termómetro o juego de termómetros de mercurio en vidrio, con graduaciones de $0,1^\circ\text{C}$, en un intervalo de temperatura que abarque por lo menos desde -1°C hasta 101°C , de buena calidad de fabricación que satisfaga o supere las especificaciones de alta exactitud.

Procedimiento:

- 1.- Siempre que sea posible se debe realizar la medición directamente en el cuerpo de agua, se debe tomar en un volumen suficiente de muestra tal que el instrumento quede debidamente inmerso, esperar el tiempo suficiente para obtener mediciones constantes.
- 2.- Enjuagar con agua destilada el instrumento de medición. Las lecturas se obtienen directamente de la escala del aparato medidor de temperatura, y se informan en grados Centígrados ($^\circ\text{C}$), con aproximación a la décima de grado ($0,1^\circ\text{C}$).

Diagrama de flujo (Temperatura)



1-2

3.11. Norma Oficial Mexicana

Todos los parámetros realizados fueron bajo las siguientes Normas:

- NMX-AA-030-SCFI-2001 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-008-SCFI-2011 Determinación del pH - método de prueba.
- NMX-AA-034-SCFI-2001 Determinación de sólidos y sales disueltas en agua naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
- NMX-AA-074-1981 Determinación de ion sulfato; Norma Mexicana
- NMX-AA-079-SCFI-2001 Análisis de aguas - Determinación de Nitratos en Aguas Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas; Norma Mexicana.
- NMX-AA-026-SCFI-2001 Análisis de Agua - Determinación de Nitrógeno Total en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratada; Norma Mexicana.
- NMX-AA-007-SCFI-2000 Análisis de agua - Determinación de la Temperatura en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.
- Nom-003-SEMARNAT- 1997 Que establece los limites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio al publico.

3.12. Análisis estadístico

Para el experimento se utilizó el paquete Excel 2010 (Microsoft Corporation), para el procesamiento de datos obtenidos de acuerdo a los parámetros correspondientes y así obtener las gráficas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

El proceso de degradación biológica en el filtro anaerobio del agua residual doméstica resulto ser un poco complicado, debido a los diferentes factores que no permitieron que el reactor trabaje de una manera correcta, estos fueron: el exceso de lodos, materia orgánica, sales y compuestos que se encontraron suspendidos en el agua, por tal motivo se realizaron ensayos y una reinucleacion de lodos para poner una vez más en marcha el tratamiento de agua residual doméstica.

En el Cuadro 2, se muestra la caracterización de los parámetros DQO, sulfatos y nitratos del agua residual doméstica antes de ser inducida al reactor de filtro anaerobio.

Cuadro 2. Caracterización del agua residual domestica cruda antes de entrar al reactor.

Día	Tiempo	pH	mg DQO/l	mg NO ₃ /l	mg SO ₄ ^{-2/1}
04/10/2013	0	8.84	194.22	0	103

El contenido de sulfatos en el agua residual doméstica inducida en el tratamiento de filtro anaerobio, mostro en la determinación de sulfatos de las cuatro muestras que son agua cruda y las tres muestras del agua tratada como se muestra en el Cuadro 3. Arrojando como resultado una remoción deficiente de sulfatos.

Cuadro 3. Datos del comportamiento de sulfatos en agua residual doméstica con un filtro anaerobio con un TRH de 12 Horas y temperatura de 21°C.

REACTOR ANAEROBIO			
Día	Tiempo h	pH	mg SO ₄ ^{-2/1}
04/10/2013	0	8.84	103
05/10/2013	24	8.44	104
06/10/2013	48	8.4	309
07/10/2013	72	8.44	104

En la figura 12 se observa que el exceso de biomasa que contenía el reactor, no permitió que las bacterias adheridas al soporte en este caso sulfato reductoras, realizaran su trabajo de degradar las sales presentes en el agua. Esto también pudo haber sido la presencia y competencia de las bacterias sulfato reductoras y las bacterias acetogénicas, como se observa en la figura ya mencionada en donde se visualiza como el agua cruda entro con 103 mg $\text{SO}_4^{-2/1}$ la cual una vez dentro del reactor, el agua a tratar en la primera muestra que es de 24 horas no mostró gran diferencia manteniéndose constante, en la segunda muestra tomada que es de 48 horas se disparó la cantidad de sulfatos 309 mg $\text{SO}_4^{-2/1}$, por último se mostró una baja eficiencia en la última muestra que es de 72 horas en donde los sulfatos volvieron a mostrarse constantes dentro del reactor. Debido a estos resultados se decidió dar inicio aún lavado del reactor así como también una re inoculación de lodo anaerobio para el restablecimiento del reactor.

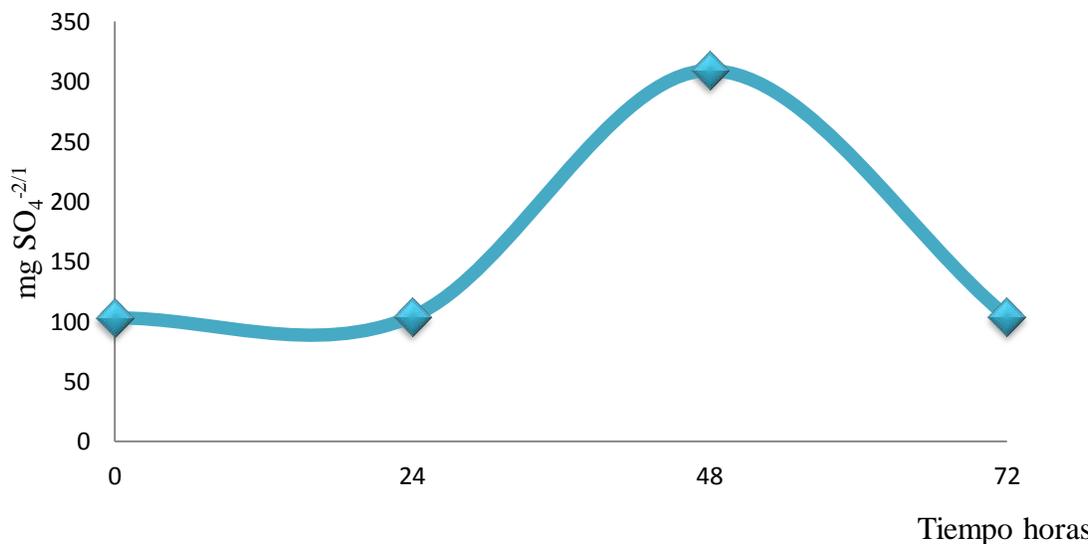


Figura 12. Comportamiento de sulfatos en agua residual doméstica tratada con un filtro anaerobio con un, TRH de 12 horas a 21°C.

Es importante enfatizar que la eficiencia de un proceso anaerobio está relacionada con el arranque y las condiciones en las que se encuentre el reactor. Durante el primer tiempo de retención hidráulica que es de 12 horas como se muestra en la Figura 13 en ese lapso de tiempo se dejó trabajar el reactor con el agua cruda que se adicionó, el agua de entrada presento una concentración de 194.22 mg DQO/l (Cuadro 4).

Cuadro 4. Resultados obtenidos de DQO del agua residual doméstica tratada en un sistema de filtro anaerobio con un TRH de 12 Horas a 21°C.

REACTOR ANAEROBIO			
Día	Tiempo h	pH	mg DQO/l
04/10/2013	0	8.84	194.22
05/10/2013	24	8.44	186.44
06/10/2013	48	8.4	167.56
07/10/2013	72	8.44	182.00

La baja deficiencia de la DQO del agua residual doméstica se vio reflejada en los datos obtenidos al realizar el parámetro de la muestra de 12 horas, posteriormente al incrementar la tasa de alimentación el reactor logró una eficiencia de tratamiento a partir de las 24 horas trayendo consigo una mínima disminución de pH, para las 72 horas el reactor volvió a dar una alto contenido 182 mg DQO/l demostrando que el reactor no está trabajando de una manera eficiente, por lo que se implementó a realizar un lavado y retiro de la excesiva biomasa presente en el reactor y una posterior inoculación de lodo anaerobio para el restablecimiento del sistema.

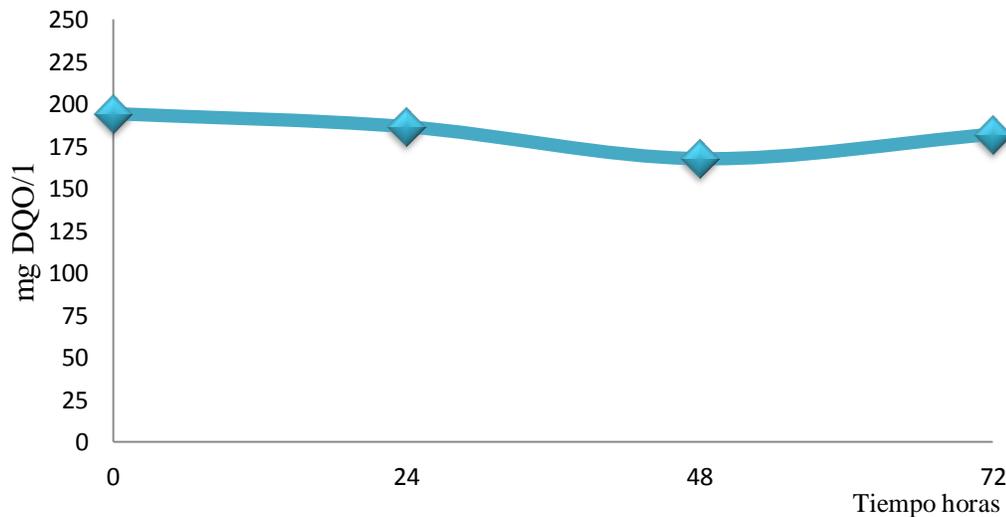


Figura 13. Remoción de la DQO de agua residual doméstica tratada en un sistema de filtro anaerobio con un TRH de 12 Horas a 21°C.

Otra razón que pudo a ver influido en la baja remoción de compuestos contenidos en el agua, pudo a ver sido el exceso de solidos suspendidos en el agua, la temperatura del ambiente, dicha causa que no permitió que se realicen los demás parámetros.

4.1. Comportamiento de la eficiencia de remoción después de lavado de reactor

Una vez puesto en marcha el lavado del reactor anaerobio, se volvió a reintroducir agua residual doméstica, tomando como primera muestra agua cruda mostrándose en el Cuadro 5. En donde se observan valores altos de DQO y Sulfatos, teniendo muy pocos nitratos.

Cuadro 5. Caracterización del agua residual domestica cruda después del lavado del reactor filtro anaerobio.

Día	Tiempo	pH	mg DQO/l	mg NO ₃ /l	mg SO ₄ ⁻² /l
22/10/2013	0	8.14	652	0.04	223

Analizando el comportamiento del componente del sistema, se tiene que en el filtro anaerobio, la eficiencia de remoción de DQO es afectada por la variación y cambio de los factores influyentes en el reactor como puede ser el lavado que se realizó y el pH (Cuadro 6).

Cuadro 6. Resultados obtenidos de DQO de agua residual doméstica, después de lavado del reactor filtro anaerobio con TRH de 12 Horas a 21°C.

REACTOR ANAEROBIO			
Día	Tiempo h	pH	mg DQO/l
22/10/2013	0	8.14	652
23/10/2013	12	8.42	1542
23/10/2013	24	8.42	1565
23/10/2013	36	8.31	409

La eficiencia de remoción de materia orgánica mostró variaciones, como se muestra en la Figura 14, en donde el agua cruda de inicio dio 652 mg DQO/l y para las muestras en tiempo de 12 y 24 horas estas se elevaron en un 80 % demostrando una vez más la deficiencia del reactor, una de las causas fue el lavado y el tiempo corto de estabilización, por lo que se implementó una reinoculación de lodo anaerobio para poder mejorar el rendimiento del sistema.

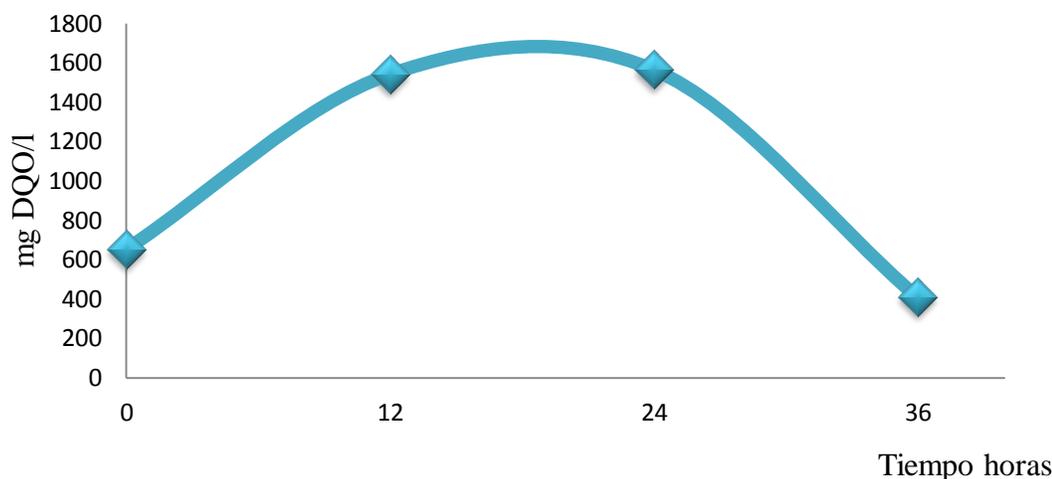


Figura 14. Remoción de la DQO de agua residual doméstica, después de lavado del reactor filtro anaerobio con TRH de 12 Horas a 21°C.

La descomposición de sustancias orgánicas y biológicas durante el tratamiento de agua residual lleva asociada a la producción de gran cantidad de sales inorgánicas. En este caso y como se muestra en el Cuadro 7, se conservó constante la cantidad de miligramos de sulfatos.

Cuadro 7. Resultados obtenidos de Sulfatos en agua residual doméstica, después de lavado del reactor filtro anaerobio con un, TRH de 12 horas a 21°C.

REACTOR ANAEROBIO			
Día	Tiempo h	pH	mg SO ₄ ^{-2/1}
22/10/2013	0	8.14	223
23/10/2013	12	8.42	228
23/10/2013	24	8.42	217
23/10/2013	36	8.31	225

En el tratamiento anaerobio de agua residual las bacterias sulfato reductoras ayudan a la eliminación de sulfatos, en este caso la estabilización del sistema de tratamiento fue un factor el cual impide que las bacterias lleven a cabo la degradación, debido a que se puede tener ausencia de las bacterias o una competencia entre bacterias acidogenicas o bien por la biomasa presente en el agua residual.

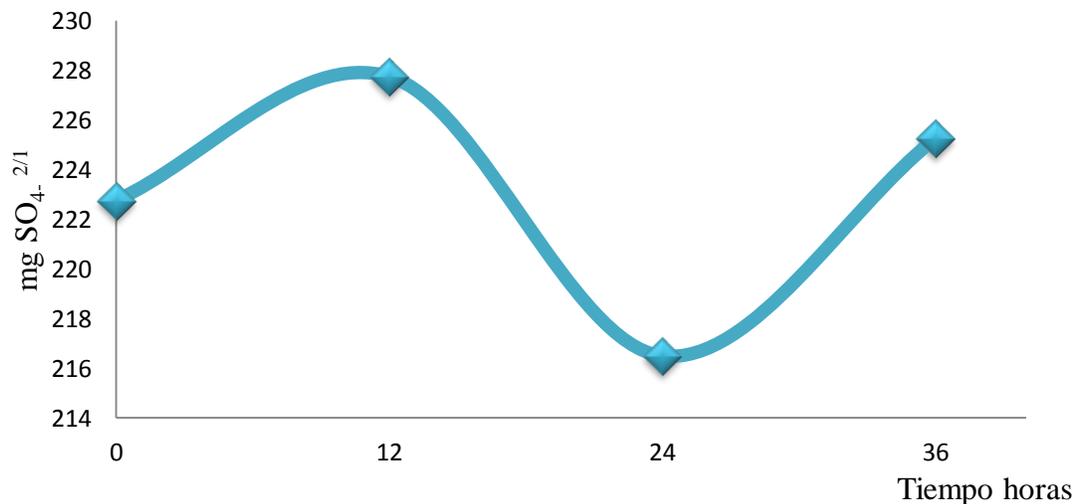


Figura 15. Comportamiento de sulfatos en agua residual doméstica, después de lavado del reactor filtro anaerobio con un, TRH de 12 horas a 21°C.

En la Figura 15 se puede apreciar valores altos de sulfatos en las cuatro muestras tomadas, una causa muy importante por lo cual no se obtuvieron buenos resultados, es porque las bacterias sulfato reductoras se encuentran por lo regular localizadas en el lodo anaerobio, por lo que se dio a la tarea de adicionar inocular con lodo anaerobio el reactor para así obtener buenos resultados.

4.1.2. Inoculación del sistema de tratamiento filtro anaerobio

Después de haber realizado la inoculación de lodo anaerobio en el reactor se dejó que se establezca una semana, para posteriormente realizar los parámetros correspondientes y ver el comportamiento del reactor en un tiempo de retención hidráulica de 12 horas dando inicio a la toma de muestras. En el Cuadro 8, se muestran los parámetros realizados al agua residual cruda, con un pH básico.

Cuadro 8. Caracterización del agua residual domestica cruda después del lavado del reactor filtro anaerobio.

Día	Tiempo	pH	mg DQO/l	mg NO ₃ /l	mg SO ₄ ^{-2/l}	mg NH ₃ /l
4/11/2013	0	8.87	523	9.51	158	59.97

El nitrato se encuentra solo en pequeñas cantidades en las aguas residuales domésticas, en los datos presentados en el Cuadro 8, muestran que el agua cruda de entrada se obtuvo 9.51 mg NO₃/l, en las siguientes muestras tomadas del reactor dieron resultados

negativos es decir no hubo una generación de nitratos en el agua residual tratada, el estándar nacional para el nitrato en agua potable es de 10 mg/l nitrato (27).

Debido a la inoculación y arranque apropiado del sistema, se observó una buena eficiencia de DQO como se muestra en la Figura 16, presentando una remoción del 80% en el tiempo 12, mostrando también en el tiempo 24 y 36 un porcentaje de 3% menos degradación.

Estos resultados son similares a los obtenidos por Osorio *et al* 2007 (37), en donde demostró una eficiencia de remoción de 49 % y 80% de DQO al realizar una inoculación en un reactor de filtro anaerobio, observando un mejor rendimiento y mayor estabilidad en filtros al aumentar la carga, debido a que un mayor rendimiento se obtiene un crecimiento bacterial más alto.

Por otra parte Bodik *et al* 1999 (5) demuestran que bajo condiciones de temperatura de 15°C y un TRH de 12 horas tiene una remoción de 84% de DQO y en 24 Horas una remoción de 87%. Mostrando que a las dos primeras semanas el reactor se adapta al sobre el sustrato y trabajando anteriormente con temperaturas de 10°C, demostrando buena eficiencia de alrededor de 80% de eliminación de DQO.

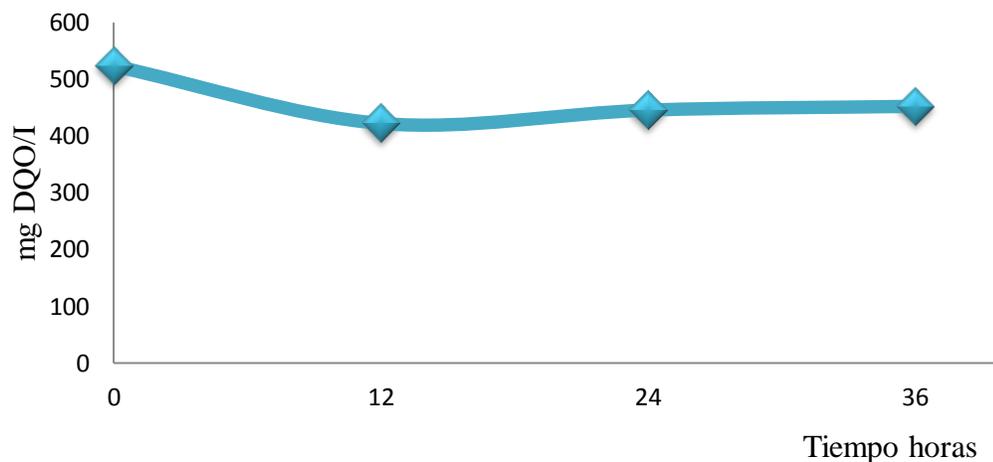


Figura 16. Remoción de la DQO de agua residual doméstica, después de inoculación del reactor filtro anaerobio con TRH de 12 Horas a 21°C.

El tratamiento anaerobio de aguas residuales con alto contenido de sulfato se da lugar a una competencia por sustratos que produce una reducción biológica, lo que genera inconvenientes sobre las bacterias presentes en el sistema.

En la Figura 17, se demuestra que no hubo una eliminación al 100% de sulfatos en las muestras puesto que en lugar de eliminar se generaron sales en el tiempo de 12 y 24 horas comparando con el tiempo de 36 horas se logró una remoción del 87% tomando también como referencia el agua residual de entrada.

Rodríguez *et al* 2001 (43) demostraron que la carga de sulfatos vario en 0.087 – 0.025 SO_4^2- L. día, dicha eficiencia se mantuvo por un periodo de tiempo de 320 días manteniendo el pH entre 7.4 y 7.8, mostrando así mismo una remoción de 90 - 100%.

Guerrero *et al* 2003 (19) elaboraron un trabajo en donde utilizaron un reactor anaerobio de flujo ascendente, el agua a tratar tenia un elevado contenido de sulfatos. Se iniciaron adiciones de sulfatos relacionadas a la carga orgánica (DQO=5000 mg/L), sobre la base de razones $\text{SO}_4^{2-}/\text{DQO}$ desde 0,091 hasta a 0.6, con concentraciones de SO_4^{2-} de 455 a 3.000mg/L. Los resultados indican que la competencia entre las bacterias metanogénicas y sulfato reductoras es poca para la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{DQO}$. En razones $\text{SO}_4^{2-}/\text{DQO}>0,3$ se aprecia una mayor producción de sulfuros totales, causante de la inhibición parcial de las metanogénicas. Los análisis de la muestra de gases tratados demostraron que el equipo fue capaz de eliminar altas concentraciones de sulfhídrico, llegando inclusive al 100% de remoción.

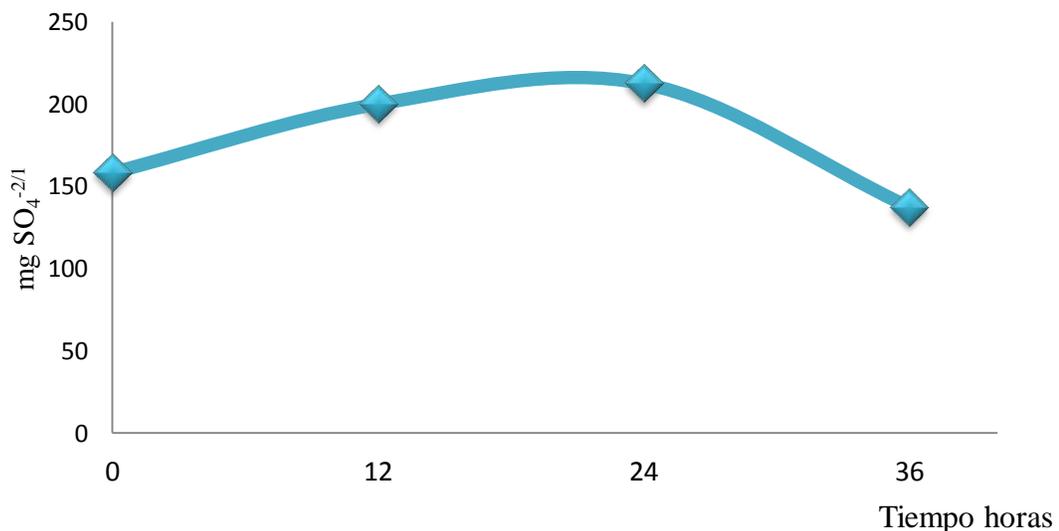


Figura 17. Comportamiento de sulfatos en agua residual doméstica, después de inoculación del reactor filtro anaerobio con un, TRH de 12 horas a 21°C.

El nitrógeno esta presente en las aguas residuales en diversos compuestos cuyas propiedades difieren. La mayor parte del nitrógeno esta en forma de urea.

Como se muestra en la Figura 18, los mg NH₃/l se observa una diferenciación de la generación de amoniaco, el tiempo 12 mostró un 4% de disminución pero en el tiempo 24 se presento hubo una elevación de amoniaco, dejando claro que la poca presencia de amoniaco no afecto mucho los otros parámetros analizados.

Fernández *et al* 2008 (16) demostraron que se puede evitar la formación NH₄, así mismo a demostrado que no solo se pueden eliminar el amonio que se forma por la degradación de la urea sino si no la reducción del NH₄ que había inicialmente manteniéndose estable el pH.

Realizaron un experimento Flores *et al* 2007 (17) a escala de laboratorio empleando agua residual sintética, la experimentación fue dividida en 2 etapas una de acondicionamiento y otra de estabilización de los reactores, en este estudio no se lograron obtener remociones de nitrógeno total debido probablemente a que se mantuvo una concentración de oxigeno disuelto de 2.5 mg/l lo cual no favoreció la desnitrificación.

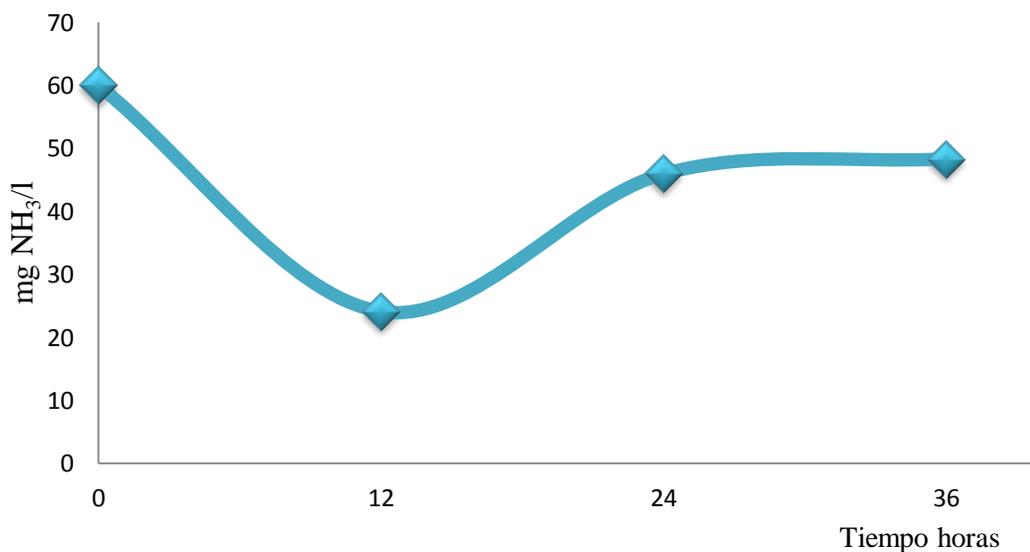


Figura 18. Remoción de amoniaco en agua residual doméstica, después de inoculación del reactor filtro anaerobio con un, TRH de 12 horas a 21°C.

Se realizaron análisis de sólidos totales de acuerdo a la Norma NMX-AA-034-SCFI-2001- Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. Los sólidos suspendidos son principalmente de naturaleza orgánica, están formados por algunos de los materiales más objetables, contenidos en el agua residual. La mayor parte de los sólidos suspendidos son desechos humanos, desperdicios de alimentos, papel, trapos, que forman una masa de sólidos suspendidos en el agua.

La concentración de sólidos suspendidos totales del agua residual doméstica del reactor anaerobio es de 1020 mg/l, es decir en comparación con el agua cruda que es de 1277 mg/l (Cuadro 9), demostrando que el reactor redujo 257 mg/l de SST, recalando también que sobrepasa los límites máximos permisibles como se muestra en el Cuadro 11. Esto debido a que no se dio un tratamiento riguroso de separación de sólidos.

Realizaron un trabajo Madera *et al* 2003 (28) en donde demuestran una eficiencia de remoción de SST, de las muestras de agua residual cruda y tratada, con un tiempo de 12 horas. Los resultados obtenidos mostraron que se obtuvo una remoción de 81-88% en SST con el sistema puesto en Ginebra. El sistema de La Voragine con tiempos de 21.5, a 62.4 hrs reportó comportamientos semejantes de remoción de SST con valor de 91.6 %. En ambos casos las variaciones del caudal no afectaron la remoción de materia orgánica, lo que permite demostrar que este tipo de tecnología es flexible ya que puede soportar variaciones significativas del flujo por encima de su valor de diseño. Estas altas eficiencias se obtuvieron en las dos unidades anaeróbicas de Filtro anaerobio y tanque séptico.

Por otra parte Osorio *et al* 2007 (37) mostraron también una eficiencia de remoción de SST de un 40 y 92 % con un tiempo de retención hidráulica de 11.8 hrs en la primera fase y 11.4 hrs en la segunda fase. Observando un mejor rendimiento y mayor estabilidad en los filtros al aumentar la carga, debido a que a una mayor carga se obtiene un crecimiento bacterial más alto.

Cuadro 9. Solidos suspendidos totales en agua residual y agua residual del reactor anaerobio del Tiempo de Retención Hidráulica de 12 horas.

TRH 12 Horas	Agua cruda	Agua del reactor filtro anaerobio
Promedio mg/l	1277	1020

En el Cuadro 10., se muestra la suma de los parámetros analizados para el TRH de 12 horas, para el agua cruda y para el agua tratada, en donde de acuerdo a la sumatoria se observa los mg/l de solidos restantes de acuerdo al Cuadro 9.

Cuadro 10. Suma de parámetros Agua cruda y reactor anaerobio.

Suma de parámetros		Suma de parámetros	
Sulfatos	158	Sulfatos	183
Nitratos	9.51	Nitratos	0
Amoniaco	59.97	Amoniaco	39.45
DQO	523.11	DQO	440
Suma	750.79	Suma	662
Restante	525.87	Restante	357.56

Cuadro 11. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes (36).

**T A B L A 1
LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES**

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes Fecales NMP/100 ml	Huevos de Helminto (h/l)	Grasas y Aceites mg/l	DBO ₅ mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≤ 1	15	20	20
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤ 5	15	30	30

4.1.3 Tiempo de Retención Hidráulica de 24 horas del agua residual doméstica

En el trayecto de la puesta en marcha del rector filtro anaerobio se realizaron inspecciones visuales en donde se presento especial atención las características del olor y apariencia del agua dentro del reactor para su debido control en esta etapa de 24 horas.

Se evaluó el comportamiento del filtro anaerobio en Tiempo de Retención Hidráulica de 24 horas este proceso comenzó el día 25 de noviembre del 2013. Las cifras mostradas en el Cuadro 12., presentan los mg/l de los parámetros correspondientes del agua cruda antes de ser procesada en el reactor anaerobio.

Cuadro 12. Caracterización del agua residual doméstica cruda en un Tiempo de Retención Hidráulica de 24 horas.

Día	Tiempo	pH	mg DQO/l	mg NO ₃ /l	mg SO ₄ ⁻²	mg NH ₃ /l
25/11/2013	0	8.71	455	0	119	42.34

La remoción de DQO, se obtuvieron resultados positivos con un valor reportado en un inicio de 455 mg/DQO/l en la fase de entrada de agua cruda, para el tiempo 24 el reactor se observó un comportamiento elevado de DQO, posteriormente el tiempo de 48 horas se redujo en un 67% progresivamente, a partir de las 72 horas este se elevó en un 3% más (Figura 19), reportando así que el uso del reactor es factible para el tratamiento de agua residual doméstica a pequeña escala.

Vieiria *et al* 2003 (52) presentaron un trabajo en un donde utilizó un sistema compuesto de flujo horizontal reactores anaerobios y aerobios de flujo radial para uso doméstico de aguas residuales aplicando una unidad de desnitrificación de espuma de poliuretano que eran matrices cúbicas con lados de 1 cm. El afluente de aguas residuales doméstica presentó la demanda química de oxígeno media de 365 ± 71 mg. l⁻¹ y la temperatura era de 23 ± 3 ° C, mostrando una eficiencia de eliminación de DQO de un 90%, dando como resultado una buena eficiencia de remoción de este sistema aplicado.

López *et al* 2008 (23) llevaron a cabo un estudio comparativo a nivel laboratorio en un proceso fisicoquímico y biológico para el tratamiento de agua residual de matadero, en donde desarrolló un sistema anaerobio/aerobio compuesto por un filtro anaerobio y un reactor aerobio por lotes (SBR). El FA operó con cargas orgánicas (CO) en un intervalo 3,7-16,5kg·m⁻³·d⁻¹, las eficiencias de remoción de DQO variaron entre 50 y 81% y fueron inversamente proporcionales al valor de la CO. La remoción de la DQO por el proceso biológico (FA+SBR) fue del 97% para un tiempo de retención hidráulico (TRH)

de 20h para el FA y de 9h de aireación para el SBR. Por lo que se logro obtener una satisfactoria remoción de DQO.

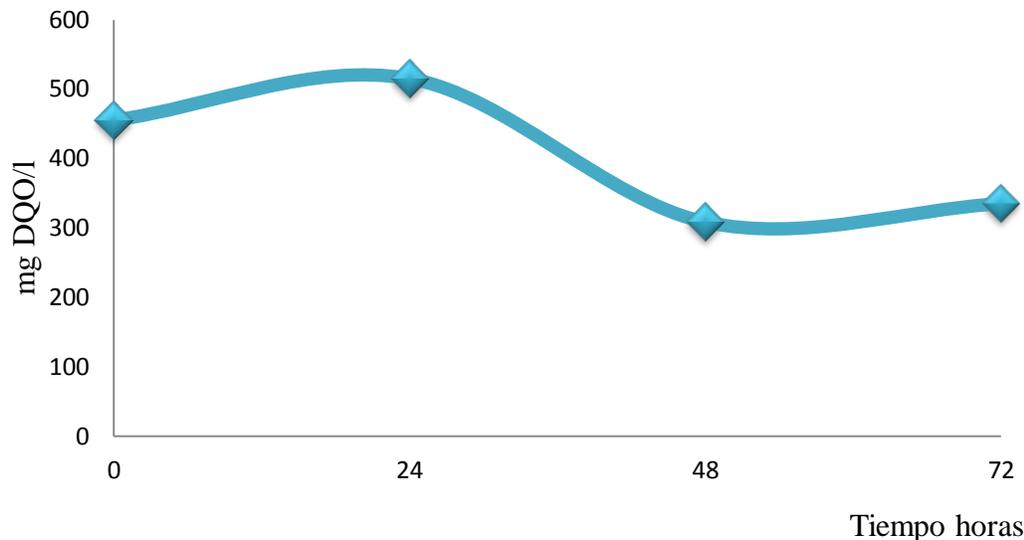


Figura 19. Remoción de la DQO de agua residual doméstica, con un TRH de 24 horas a temperatura de 21°C.

El aumento de concentración de SO_4^{2-} , presenta una relación directa en la formación de sales lo que provoco una disminución en la calidad del agua. En este parámetro de inicio el agua residual cruda presento 119 mg $\text{SO}_4^{-2/1}$, en lo que respecta el reactor presento un incremento de sales, en comparación con los tiempos mostrados en la Figura 20, reflejan más del 100% de elevación de sales generadas por el reactor, afectando en pequeña parte a las bacterias participantes en la degradación de residuos presentes en el agua.

Verstraete *et al* 1999 (53) implementaron un reactor (EGSB). El reactor se puso en marcha en cuestión de días. Poco a poco la disminución de la relación de etanol a sulfato (R) a aproximadamente estequiometría, resultado en 60-70% de eliminación de sulfato a tasas de 7 g S / L d. Esto se relacionó por el alto contenido de lavado de la biomasa. La disminución de la eficiencia de eliminación de sulfato cuando R se fijó en niveles por debajo de 6, al parecer debido a bacterias reductoras de sulfato (BSR) no podía competir con bacterias productoras de metano.

Por otra parte Espinoza *et al* 2009 (14) realizaron un trabajo en donde se implemento un reactor UASB, relacionando DQO/SO₄ , arrojando como resultado un aumento de sulfuro alcanzando los 800 mg/l, el aumento de concentración de SO₄, tuvo una relación directa de producción de sulfuros lo que favoreció el predominio de bacterias sulfato reductoras sobre las baterías metanogénicas, los resultados obtenidos en este reactor son que a concentraciones altas de sulfuros (800 mg/l,) el proceso de sulfato reducción en el reactor UASB se vio favorecido.

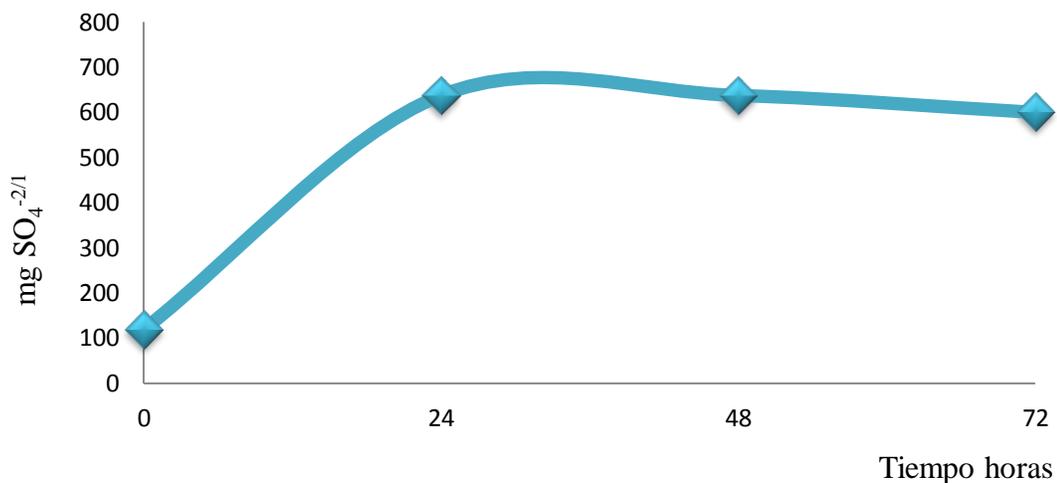


Figura 20. Comportamiento de sulfatos en agua residual doméstica, con un TRH de 24 horas a una temperatura de 21°C.

El amoníaco presente en el agua residual tratada mantuvo una relación variable en los niveles de generación de amoníaco como se muestra en la Figura 21, dando como inicio 42.34 mg NH₃/l, los datos que se observan para el tiempo de 24 horas se generó un 5% más de amoníaco, lo mismo pasó para los siguientes tiempos de 48 y 72 horas, probablemente esto sucedió por el mayor tiempo de retención y por el contenido de compuestos presentes en el reactor.

De la misma manera Gutiérrez *et al* 2009 (20) trabajaron con un tratamiento avanzado de aguas residuales utilizando reactores con cinta de polietileno, para el análisis de diferentes parámetros entre ellos el Nitrógeno amoniacal, como resultados obtenidos, presentaron una remoción de nitrógeno amoniacal y total de 71 y 66% respectivamente utilizando una carga orgánica 1.27 kg DQO m³ con un TRH de 2,4 horas y una recirculación de 100%. Con base en los resultados obtenidos se concluyó que los

biofiltros de lecho sumergido empacados con polietileno, con zonas anaerobias, aerobia y anoxica, proporcionan mayor remoción de micronutrientes comparados con sistemas convencionales de fácil operación.

Bernet *et al* 1999 (6) reportaron en un estudio realizado en tratamiento de aguas residuales para el carbón orgánico y la eliminación de nitrógeno en un sistema combinado anaerobio / aerobio, con una duración de ciclo de 24 horas obtenido como una eliminación 85 a 91% final y la inicial 10 a 28 % se dio la terminación N-NOx, mostrando que el reactor aumento las actuaciones del proceso.

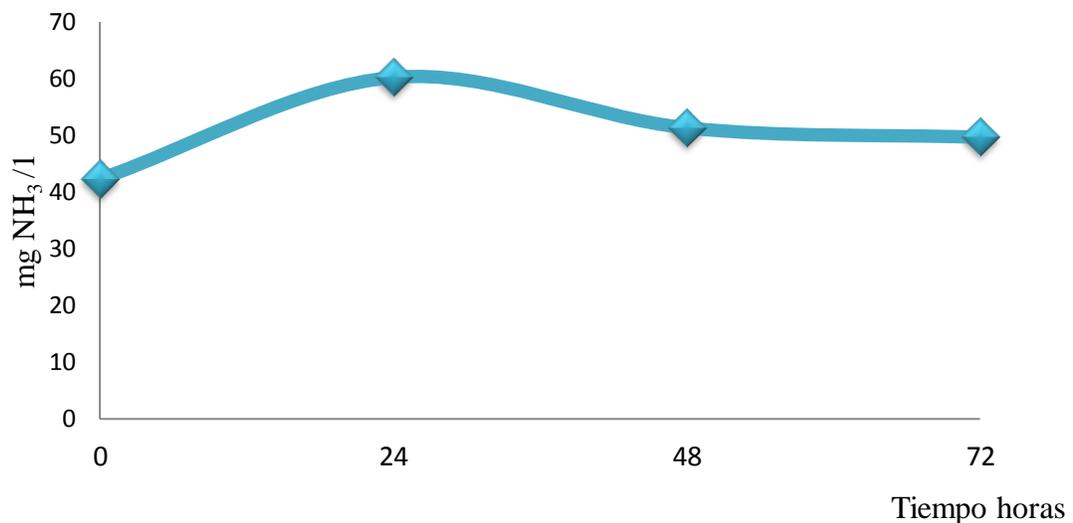


Figura 21. Remoción de amoniaco en agua residual doméstica con un TRH de 24 horas a temperatura de 21°C.

Se determinaron solidos suspendidos totales del agua residual doméstica con tiempo de retención hidráulica de 24 horas, con el propósito de ver en esta fase cuantos solidos degradado el reactor de filtro anaerobio, en el siguiente Cuadro 13, se muestran los mg/l, en donde se ven reflejados la cantidad de entrada de los solidos del agua cruda y agua tratada dando aproximadamente 715 mg/l más, sobre pasando los limites máximos permisibles (Cuadro 11) igual que el TRH de 12 horas. Debido a la presencia de biomasa, lodos entre otros componentes presentes el agua residual cruda y tratada.

Realizaron un tratamiento de aguas residuales Chaux *et al* 2010 (10) mediante reactores anaeróbicos de placas verticales de acrílico, con el fin de remover contaminantes

(materia orgánica, sólidos suspendidos totales), en donde el reactor anaeróbico se desempeño como tratamiento secundario, se alimentó con agua residual del efluente concentraciones medias de 98+/- 22 mg/l sólidos suspendidos. El reactor sobre paso el 60 % de remoción de sólidos suspendidos para un tiempo de detención de 24 horas, la facilidad en la operación del reactor lo hace viable como tratamiento biológico anaeróbico de aguas residuales previamente decantadas.

Por otra parte Chandravathanam *et al* 1999 (11) trabajaron con un biofiltro de flujo ascendente con cubos de espuma de poliuretano como medio de soporte, con una variación de TRH de 24, 8, 12 y 6 horas, mostrando eficiencias en la eliminación de sólidos suspendidos de 95 a 98%. El estudio ah revelado el mejor uso de sistema de biofiltros de flujo ascendente para aplicaciones de eliminación de sólidos suspendidos.

Cuadro 13. Sólidos suspendidos totales en agua residual y agua residual del reactor anaerobio del Tiempo de Retención Hidráulica de 24 horas.

TRH 12 Horas	Agua cruda	Agua del reactor de filtro anaerobio
Promedio mg/l	2947	3662

En el siguiente Cuadro 14, se representa la sumatoria total de los parámetros realizados en este TRH de 24 horas, en donde se observa la cantidad que degrado el reactor que son los parámetros sumados y la cantidad restante de sólidos degradados el otro restante es de parámetros que no se realizaron como puede ser la presencia de fosfatos, nitritos, ácidos grasos entre otros.

Cuadro 14. Suma de parámetros agua cruda y reactor anaerobio.

Suma de parámetros	
Sulfatos	625
Nitratos	0.44
Amoniaco	53.77
DQO	386
Suma	1065.21
Restante	1881.79

Suma de parámetros	
Sulfatos	119
Nitratos	0
Amoniaco	42.34
DQO	455.33
Suma	616.67
Restante	3045.33

V. CONCLUSIÓN

En el tratamiento de agua residual doméstica se obtuvieron resultados no muy significativos para algunos parámetros de acuerdo a los dos TRH, respecto a la degradación de material orgánico presente en el agua, así como también la generación y presencia de otros compuestos.

En la remoción de materia orgánica, DQO para el TRH de 12 horas, demostró una remoción de 80%, para el TRH de 24 horas se obtuvieron resultados similares dando una remoción de un 72% por lo que la implementación de filtro anaerobio para eliminación de DQO es factible.

Para el TRH de 36 horas, se presentó una remoción de 87% de sulfatos. Para el TRH de 24 horas, se vio una elevación de sales en el agua residual doméstica. El reactor de filtro anaerobio es factible para tiempos cortos de 12 horas. El aumento de concentración de sulfatos, presentan una relación directa en la generación de sales lo que ocasionó una disminución en el tratamiento para el tiempo de 24 horas, no es rentable poner en función este tiempo para la eliminación de sulfatos, al menos que se tenga o se implemente otro tipo de tratamiento al agua que permita que los sulfatos puedan ser eliminados, o aprovechados para otro fin (ej., como agua de riego).

Para los TRH de 12 y 24 horas, se obtuvo un 5 y 4% de incremento de la concentración de amoníaco. Este parámetro es importante en los reactores anaerobios, las concentraciones elevadas del mismo es una de las principales causas de fallos para el tratamiento de agua residual debido a que contienen una elevada concentración de proteínas, aminoácidos o urea. En este caso el reactor fue factible por que mantuvo constante la presencia baja del amoníaco.

Los sólidos suspendidos totales en este caso para el TRH de 12 horas, se logró una degradación eficiente reduciendo 257 mg/l de sólidos suspendidos en comparación con el agua cruda, para el TRH de 24 horas se generaron aproximadamente 715 mg/l de sólidos más que el agua residual de entrada, ambos TRH sobre pasaron los límites

máximos permisibles. Debido a la presencia de biomasa, lodos, entre otros parámetros no analizados como fosfatos, grasas entre otros.

Seria recomendable buscar una alternativa para la remoción, degradación y eliminación de material orgánico, más rápida y eficiente, pudiendo implementar otro tipo de soportes, o de igual manera implementando un tratamiento secuencial anaerobio – aerobio.

VI. GLOSARIO DE TÉRMINOS

DQO: expresa la cantidad de oxígeno equivalente necesario para oxidar las sustancias presentes en las aguas residuales, mediante un agente químico fuertemente oxidante.

Nitrato: los nitratos son iones formados por tres átomos de oxígeno, uno de nitrógeno y con una carga negativa (NO_3^-), no tienen color ni sabor y se encuentran en la naturaleza disueltos en el agua.

pH: el pH ó el potencial de hidrogeno indica el grado de acidez o basicidad de una solución, éste se mide por la concentración del ion hidrógeno.

TRH: es el tiempo que permanece el sustrato dentro del sistema para ser degradado. Está relacionado con la temperatura cambiante del lugar, de forma que cuando ésta es alta se puede aplicar un TRH corto, y si es baja, se necesitan TRH más largos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarado, A., A. (2011). Evaluación de Materiales de Desecho como Medio Filtrante en Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. *Tesis de Licenciatura para obtener el Título de Ingeniería Ambiental*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Pp. 71
2. Acosta, R., S. (2008). Saneamiento Ambiental e Higiene de los Alimentos. *Ed. Brujas*. Córdoba. Pp. 62-64
3. Besel S.A. (2007). Biomasa-Digestores anaerobios. *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*. 1(1): 27-28
4. Batero, C., Y., Cruz, O., E. (2007). Evaluación de filtros anaerobios de flujo ascendente (fafas) con medio de soporte en guadua para la remoción de materia orgánica de un agua residual sintética. *Tesis para obtener el Título de Ingeniería en Química*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Pp. 82
5. Bodik, I., Herdova, B., Kratochvíl, K. (1999). The Application of Anaerobic Filter for Municipal Wastewater Treatment. *Chem. Papers*. 54 (3) 159-164
6. Bernet, N. Delgenes, J. Akunna, C. Moletta, R. (1999). Combined Anaerobic-Aerobic SBR For the Treatment of Piggery Wastewater. Pergamon. Vol. 34. N°2. Pp 611-619
7. Cesvi Mexico. (2008). Fichas Técnicas de Reparación de Vehículos. Espuma de poliuretano. N° 33
8. Costerton, J., W., Philip, S. S., Greenberg, E. P. (1999). Bacterial biofilms: A common cause of persistent infections. *Science*. 284(5418):1318-22
9. Chen, Y., Cheng, J.,J., Creamer, S.,K. (2007). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*. 99 (2008) 4044–4064

10. Chaux, G. Zambrano, N. (2010). Tratamiento de Aguas Residuales Mediante Reactores Anaerobios de Placas Verticales Paralelas en Acrílico. *Biocología en el Sector Agropecuario y Agroindustria*. Vol. 9. Pp. 159-169
11. Chandravathanam, S., Murthy, D. V. S. (1999). Studies in nitrification of Municipal Sewage in an Upflow Biofilter. *Bioprocess Engineering*. Vol. 21 Pp. 117-122
12. Dunne, M., W., (2002). Bacterial Adhesion: Seen Any Good Biofilms Lately. *Clinical Microbiology Reviews*. 15(2): 155–166
13. Elmitwalli, A., T., Oahn K.,L.,T., Zeeman G., Lettinga G.(2001). Treatment of domestic sewage in a two-step anaerobic filter/anaerobic hybrid system at low temperature. *Bioresource Technology* 36(2002): 2225-2232
14. Espinoza, Ch., B. Celis, G., B. Ramírez, V., F. Monroy, H., O.(2009). Efecto del sulfato en la degradación anaerobia en un reactor UASB. Departamento de Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana. Pp. 1
15. Foresti, E. (2002). Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. *Water Science and Technology*. 45 (10) 181–186
16. Fernandez, S., Monforte, J., Estrani, C., Pujol, O., Coma, S. (2008). Eliminación de Nitrogeno Amoniacal de Aguas Residuales Sanitarias. *Tecnica Industrial*. Pp.273
17. Flores, C., E. (2007). Evaluación de la Combinación de Dos Medios de Soporte en Reactores de Lecho Móvil para la Remoción de Nitrógeno. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de México. Pp. 105
18. Garzon, J., R. (2009). Cinética de Degradación de Colorantes de Textiles de Diferentes Clases Químicas por Hongos y Bacterias Inmovilizadas sobre Fibra

de *Agave tequilana* Webber var. Tesis de Licenciatura. *Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá*. Pp. 111

19. Guerrero, S., L. Torres, B. Chamy, R. (2003). Remoción de Sulfatos en un Reactor UASB. Departamento de procesos Químicos, Biotecnológicos y Ambientales. Universidad Técnica Federico Santa Maria Pp. 8
20. Gutiérrez, M., T. (2009). Tratamiento Biológico Avanzado de Aguas Residuales Utilizando Reactores con Cinta de Polietileno. Tesis para Obtener el Grado de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 66
21. Kelleher, P., B., Leahy, J., J., Henihan, A., M., O'Dwyer, T.,F., Sutton, D., Leahy, M.,J. (2001). Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology* 83 (2002) 27–36
22. Lewandowski, Z., Webb, D., Hamilton, M., y Harkin, G. (1999). Quantifying biofilm structure. *Wat. Sci. Tech.* 39, 71-76
23. López, L., A. Fraire, B., G. Vallejo, R., R. Barahona, B., C. (2008). Estudio comparativo entre un proceso Físico Químico y uno Biológico para tratar agua residual de rastro. *Interciencia*. Vol. 33
24. Martí, O., N. (2006). Estudio del Proceso de Digestión Anaerobia para Optimizar la Recuperación de Fósforo en EDAR's. *Dissertation*. Boca Ratón, Florida. Pp. 10-13
25. Mejía, S., G. (1996). Digestión Anaerobia. *Universidad Autónoma de Yucatán. Folleto técnico*. 1(1) Pp. 49

26. Méndez, P., R., Vidal, S., G., Lorber, K., E., Márquez, R., F. (2007). Producción limpia en la industria de curtiembre. *Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico*. Santiago de Compostela. Pp. 34-36
27. Marin, O., A. Oses, P., M. (2013). Operación y Mantenimiento de Plantas Tratadoras de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados. DOP CEA Jalisco. Tomo I
28. Madera, C., A. Silvia, J., P. Peña, M., R. (2003). Sistemas Combinados de Tratamiento de Aguas Residuales Basados en Tanque Séptico-Filtro anaerobio-Humedales: Una alternativa sostenible en pequeñas comunidades de países tropicales. Instituto CINARA, Universidad del Valle. Pp. 8
29. Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 Determinación de sólidos y sales disueltas en agua naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
30. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011 Análisis de agua – Determinación del pH-método de prueba (Cancela a la NMX-AA-008-SCFI-2000) Secretaría de Economía. México.
31. Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001 Análisis de agua – Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-030-1981) Secretaría de Economía.
32. Norma Mexicana NMX-AA-074-1981 Análisis de agua – Determinación de ion sulfato. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.

33. Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001 Análisis de aguas - Determinación de Nitratos en Aguas Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-079-1986) Secretaria de Economía.
34. Norma Mexicana 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-AA- 007-1980) Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.
35. Norma Mexicana NMX-AA-026-SCFI-2001 Análisis de Agua - Determinación de Nitrógeno Total en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba (Cancela a la NMX-AA-026-1980) Secretaria de Economía.
36. Norma Oficial Mexicana Nom-003-Ecol-1997 Que establece los limites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio al publico.
37. Osorio, A., Vásquez, J. (2007). Evaluación de la Remoción de la Materia Orgánica en Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente Utilizando Aguas Residuales Sintéticas. *Tesis para Obtener Título en Tecnólogo Químico. Universidad Tecnológica de Pereira*. Pp. 56
38. Pavlostathis, S.G., Giraldo-Gómez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. *Critical reviews in environmental*. 21 (5,6):411-490
39. Phillips, P., L., Wolcott, R., D., Fletcher, J, Schutz, G., S. (2010). Biofilms made easy. *Wounds International*. Vol.1 Tercera edition.
40. Phillips, P., Sampson, E., Yang, Q., Antonelli, P., Progulske-Fox, A., & Schultz, G. (2009). Bacterial biofilms in wounds. *Wound Healing Southern Africa*. 1(2): 10-12

41. Ramalho, R., S. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales. *Ed. Reverte. S.A.* México. Pp 518-519
42. Rodríguez, V., J. (2004). Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. *Trabajo de Investigación.* Universidad el Valle. Colombia Pp. 15
43. Rodríguez, J., Carbo, A., Garza, Y. (2001). Influencia de la Concentración de Iones Sulfato en la Biotransformación anaerobia de DQO en un Reactor Piloto UASB. Departamento de Biotecnología, Facultad de Química Universidad Autónoma Venustiano Carranza. Pp. 5
44. Sanz, L., J. (2008). Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. *Master Microbiología.* Pp. 3
45. Sánchez, M., R. (2011). Tratamiento de agua residual municipal en reactores con Biopelícula aerobias. *Cienciacierta N° 26*
46. Solano, M., J., K. Rangel, Urrea., M., P. (2006). Evaluación operacional de un sistema a escala laboratorio de Biopelícula anaerobia soportada para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Tesis para obtener Título en Ingeniero Químico.* Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería Físico Químicas. Pp. 66
47. Torres, P. (2012). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *EIA, ISSN 1794-1237.* Número 18, p. 115-129
48. Urrutia, I., Serra, J., Llama, M. (1995). Nitrate removal from water by *Scenedesmus obliquus* immobilizes in polymeric foams. *Enzyme Microbiology Technology.* 17(3): 200–205

49. Van Dun., Elmitwalli, T., A., Bruning, H., Zeeman, G., Lettinga, G. (1999). The role of filter media in removing suspended and colloidal particles in an anaerobic reactor treating domestic sewage. *Bioresource Technology* 72 (2000) 235-242
50. Van Houten, R. T., Van Aelts, A. C., Letinga, G. (1995). Aggregation of sulphate-reducing bacteria and homo-acetogenic bacteria in lab-scale gas-lift Rreactors. *Wat. Sci. Tech.*, 32(8), 85-90
51. Vu, B., Chen, M., Russell, J., Ivanova, P. (2009). Bacterial Extracellular Polysaccharides Involved in Biofilm Formation. *Journal Molecules*. 14 (1), 2535-2554
52. Vieiria, A. Fazolo, A. Zaiat M., Foresti, E. (2003) Flujo Horizontal Integrado Anaerobio y de Flujo Radial Reactores Aerobios para la Eliminación de Materia Orgánica y Nitrógeno de las Aguas Residuales Doméstica. *Tecnología del Medio Ambiente*. Vol. 24 Pp. 51-58
53. Verstraete, W. Goethals, L. Smul, A. (1999) Effect of COD to sulphate ratio and temperature in expanded-granular-sludge-blanket reactors for sulphate reduction. *Science Direct*. 34 (4): 407-416
54. Zeeman, G., Lettinga, G., Sklyar, V., Elmitwalli, A., T. (2001). Low temperature pre-treatment of domestic sewage in an anaerobic hybrid or an anaerobic filter reactor. *Bioresource Technology*. 82 (2002): 233-239