

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL REACTOR ANAEROBIO TIPO *UASB*
EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL SITIO DE
DISPOSICIÓN FINAL “CARRASCO”**

**MAIRA ALEJANDRA ARIAS AVENDAÑO
YESSICA IVVONE SERRANO LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2014

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL REACTOR ANAEROBIO TIPO *UASB*
EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL SITIO DE
DISPOSICIÓN FINAL “CARRASCO”**

**MAIRA ALEJANDRA ARIAS AVENDAÑO
YESSICA IVVONE SERRANO LÓPEZ**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico

DIRECTOR:

**Liliana Del Pilar Castro Molano
Ingeniera Química Ph.D.**

SUPERVISOR:

**Oscar Armando Soto Galván
Jefe Disposición final**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

Primero a Dios por iluminarme, darme paciencia y sabiduría en este largo camino, por llenarme de fuerza para seguir adelante ante las dificultades, por poner a mi lado durante todo este proceso a personas maravillosas que me brindaron siempre su apoyo y valiosa amistad.

A mi papi por ser el hombre más trabajador, a mi mami por mantenerme siempre en sus milagrosas oraciones, a los dos por su esfuerzo y sacrificio, por su amor y apoyo incondicional, por la paciencia y por ser siempre unos padres ejemplares.

A mis hermanas Karen y Yuly por compartir conmigo los mejores momentos, por su apoyo y comprensión.

A mi sobrino Jerónimo por llenar mi vida de felicidad, por ser mi motivación.

A Rafa por su amor incondicional, por no permitirme desfallecer, por sus palabras de aliento y por su eterna compañía.

A mi nonita Lucila por su cariño, por estar siempre conmigo y por todos sus consejos.

A mi tía Celina por su apoyo incondicional, le estaré eternamente agradecida.

A mis amigas Ivonne y la Chata por su compañía y por compartir conmigo los buenos y malos momentos a lo largo de este camino.

Maira Alejandra Arias Avendaño

DEDICATORIA

A Dios, por tantas bendiciones puestas en el camino, por ser mi protector y mi guía

A mis padres por su confianza, paciencia y amor que me dan cada segundo; gracias infinitas por sus consejos sabios, dedicación y formación.

A mi hermano y hermana que son mi compañía, mis amigos incondicionales y mi apoyo diario.

A sobrinito hermoso que lo amo, gracias por darme felicidad y hacer que cada día perdure una sonrisa imborrable en mi rostro.

A mi Juan Pis por ser mi ángel de la guarda, gracias por su confianza y amor, por ser la motivación de mi vida y en especial por hacerme completamente feliz.

A mi nonita por sus oraciones, por ser mi ejemplo a seguir y por enseñarme el verdadero significado del amor.

A mis tíos y demás familiares que con sus buenos deseos han hecho realidad un sueño más.

Mil y mil gracias por este logro, que es de ustedes.....

DIOS LOS BENDIGA

Yessica Ivone Serrano López

AGRADECIMIENTOS

A la empresa de aseo de Bucaramanga EMAB S.A E.S.P. Por permitirnos desarrollar el proyecto de grado en la planta de tratamiento de lixiviados del sitio de disposición final El Carrasco.

A los ingenieros Oscar Soto Galván y Didier Serrano López por su colaboración y disponibilidad.

A la profesora Liliana por todas sus orientaciones, grandes enseñanzas y buena disposición durante la realización de este proyecto.

A los operarios de la planta don Yate y don Chucho por compartir su conocimiento, por su ayuda incondicional, por brindarnos un ambiente de trabajo agradable, por toda la alegría y consejos compartidos.

A la doctora Carolina Guzmán por su colaboración y disposición.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LA PTLX	19
1.2 GENERALIDADES Y CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS TÍPICAS DE UN LIXIVIADO	20
1.3 NORMAS DE VERTIMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS A CUERPOS DE AGUA.....	21
1.4 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (<i>UASB</i>)	22
1.5 VARIABLES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA (DA), MONITOREADAS EN EL REACTOR <i>UASB</i>	24
2. METODOLOGÍA	26
2.1 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL LIXIVIADO AFLUENTE Y EFLUENTE DE LA PTLX.....	27
2.2 CARACTERIZACIÓN BIOQUÍMICA DEL LIXIVIADO ENTRADA Y SALIDA DEL REACTOR <i>UASB</i>	27
2.2.1 Monitoreo de las variables de respuesta de la DA en el reactor <i>UASB</i>	28
2.3 CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DEL BIOSÓLIDO PRODUCIDO A PARTIR DEL LODO GENERADO EN EL REACTOR <i>UASB</i>	29
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	30
3.1 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL LIXIVIADO AFLUENTE Y EFLUENTE DE LA PTLX.....	30
3.1.1 Análisis comparativo entre capacidad de remoción de la PTLX con la norma de vertimientos.....	30

3.1.2 Análisis comparativo del lixiviado del relleno sanitario “El Carrasco” con el lixiviado del relleno sanitario “la Esmeralda” y un lixiviado estándar.....	31
3.2 CARACTERIZACIÓN BIOQUÍMICA y MICROBIOLÓGICA DEL LIXIVIADO ENTRADA Y SALIDA DEL REACTOR <i>UASB</i>	32
3.2.1 Monitoreo de las variables de respuesta en el reactor <i>UASB</i>	32
3.2.2. Ensayo de biodegradabilidad anaerobia	38
3.3 CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DEL BIOSÓLIDO PRODUCIDO A PARTIR DEL LODO GENERADO EN EL REACTOR <i>UASB</i>	39
4. CONCLUSIONES	41
BIBLIOGRAFÍA.....	42
ANEXOS	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características fisicoquímicas típicas de un lixiviado.....	21
Tabla 2. Normas de vertimiento de residuos líquidos. Artículo 74 Decreto 1594 de 1984.....	22
Tabla 3. Variables a monitorear, método analítico, unidades y periodicidad de la medición	28
Tabla 4. Características fisicoquímicas del lixiviado relleno sanitario el Carrasco.	30
Tabla 5. Características fisicoquímicas típicas lixiviado del relleno sanitario el Carrasco, lixiviado del relleno sanitario La Esmeralda y las reportadas en la literatura.	31
Tabla 6. Caracterización DQO, SSV, SST en el reactor UASB	38
Tabla 7. Caracterización microbiológica del biosólido producido a partir del lodo generado en el reactor UASB	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama del proceso de la PTLX del sitio de disposición final el carrasco	20
Figura 2. (a) Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) y (b) Reactor UASB de la PTLX	23
Figura 3. Metodología experimental para la evaluación del reactor <i>UASB</i>	26
Figura 4. Variación del tiempo de retención hidráulico (TRH) y el contenido de carga orgánica volumétrica (COV)	32
Figura 5. Variación de la COV y el porcentaje de remoción de ART	33
Figura 6. Variación de la COV y el Porcentaje de remoción de AGV	34
Figura 7. Comportamiento de la COV respecto al porcentaje de remoción de ST	35
Figura 8. Comportamiento del pH y la relación AGV/AT	36
Figura 9. Porcentaje de remoción de nitrógeno amoniacal	37
Figura 10. Producción de metano	39

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Protocolo para la toma de muestra en la PTLX.....	46
Anexo B. Determinación de la concentración de azúcares reductores totales (ART)	47
Anexo C. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (AT)	49
Anexo D. Determinación de sólidos totales fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas.	51
Anexo E. Método de desplazamiento alcalino	52
Anexo F. Determinación del N-Amoniacal	54
Anexo G. Registro fotográfico	55

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura

PTLX	Planta de tratamiento de lixiviados
DA	Digestión anaerobia
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
SV	Sólidos volátiles
ST	Sólidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
SST	Sólidos suspendidos totales
ART	Azúcares reductores totales
AGV	Ácidos grasos volátiles
AT	Alcalinidad total
VNTP	Volumen a condiciones estándar
DNS	Dinitrosalicílico
COV	Carga orgánica volumétrica
TRH	Tiempo de retención hidráulico

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL REACTOR ANAEROBIO TIPO UASB EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL SITO DE DISPOSICIÓN FINAL “CARRASCO”.*

AUTORES: MAIRA ALEJANDRA ARIAS AVENDAÑO, YESSICA IVVONE SERRANO LÓPEZ**

PALABRAS CLAVES: lixiviado, relleno sanitario, reactor *UASB*, lodo, Digestión Anaerobia.

La alta generación de residuos sólidos, la problemática de seguridad pública y el cumplimiento de la normativa, han sido la principal preocupación para los sitios de disposición final; debido a que sus productos ya sean lixiviados o gases altamente contaminantes son variantes para cada relleno sanitario. Actualmente el relleno sanitario “El Carrasco”, recibe aproximadamente 900 toneladas al día de residuos sólidos. Para el tratamiento del lixiviado como producto de la descomposición de este residuo la empresa cuenta con una PTLX operada con un sistema biológico, más específicamente con un reactor anaerobio de flujo ascendente (*UASB*) con un volumen de 60,55 m³ de volumen y caudal entre 1.5 y 2 litros por segundo, con un TRH de 10-12 horas.

En el presente estudio se evaluó el rendimiento del reactor *UASB*, caracterizando parámetros bioquímicos propios del sistema de digestión anaerobia (DA) y la clasificación microbiológica del lodo saliente del mismo.

El sistema de Digestión Anaerobia (DA), mostró una degradación del 4.11% de los Azúcares reductores totales, una remoción del 2,60% de ácidos grasos volátiles y una capacidad Buffer de 0.63; demostrando que la DA no se está llevando a cabo dentro del reactor, por lo tanto el reactor no opera de manera adecuada. La caracterización microbiológica del lodo proveniente del reactor permitió clasificarlo en categoría A; debido a las bajas concentraciones de coliformes totales y fecales y a la ausencia de salmonella sp y huevos de helmintos.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Química. Director Liliana Castro Ing. Química Ph.D. Supervisor Oscar Soto Ing. Civil

ABSTRACT

TITLE: PERFORMANCE EVALUATION OF UASB REACTOR TYPE IN ANAEROBIC TREATMENT PLANT SITE LEACHATES OF FINAL DISPOSITION "CARRASCO".*

AUTHOR: MAIRA ALEJANDRA ARIAS AVENDAÑO, YESSICA IVVONE SERRANO LÓPEZ**

KEYWORDS: leachate, landfill, UASB reactor, sludge, Anaerobic Digestion

The high waste generation, the issue of public safety and fulfillment of regulations, have been the main concern for final disposal sites; because their products either leachate or highly polluting gases are variants for each landfill. Actually the landfill "El Carrasco" recives approximately 900 tn per day of wastes. Treatment of leachate as product of descomposition of this residue, the enterprise have a PTLX operated with a biological system, specifically with an upflow anaerobic reactor (UASB) with a volume of 60.55 m³ volume and flow rate of 1.5 and 2 liters per second, with an HRT of 10-12 hours.

In this study was evaluated the performance of the UASB reactor, biochemical parameters characterizing of system of anaerobic digestion (AD) and the microbiological classification of same sludge outlet

System Anaerobic Digestion (AD) showed a degradation of 4.11% of the total redactors sugars, a removal to 2.60% volatile fatty acids and Buffer capacity of 0.63; demonstrating that the DA is not carried out within the reactor so the reactor does not operate properly. Microbiological characterization of sludge from the reactor allowed classification in category A; due to low concentrations of total and fecal coliforms and Salmonella sp and absence of helminth eggs.

* Thesis

** Faculty of Engineering physic-chemical. School of Chemical Engineering. Director Liliana Castro Chemical Engineering Ph.D. Supervisor Oscar Soto Civil Engineering

INTRODUCCIÓN

La Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga (EMAB S.A. ESP) es la entidad encargada del servicio de aseo: barrido, recolección, transporte y disposición final de los residuos sólidos de la ciudad de Bucaramanga. En la actualidad presta el servicio de disposición final de residuos al Área Metropolitana y otros municipios aledaños (EMAB S.A. ESP., 2014)

Debido a la alta generación de residuos sólidos se han buscado alternativas para su disposición final, que sean favorables para el ambiente; una respuesta son los rellenos sanitarios, que surgen como método para depositar permanentemente los residuos sólidos y proporcionar condiciones controladas para que ocurra su degradación sin causar daños al medio, la salud y la seguridad pública (Robayo., 2012).

El relleno sanitario “El Carrasco”, se encuentra ubicado en la parte suroccidental de Bucaramanga, entre la vía Bucaramanga- Girón, donde se recibe aproximadamente 900 toneladas al día de residuos sólidos provenientes de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Lebrija, Rionegro, El Playón, Charta, Matanza, Zapatoca y Suratá.

La mayor parte de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario son de tipo orgánico, los cuales se van degradando con el tiempo por medio de varias etapas tanto biológicas, químicas y físicas. El lixiviado proviene principalmente de la fracción orgánica fácilmente biodegradable, aunque este contenido es variable dependiendo de la forma de almacenamiento, recolección de los residuos y el clima (Tchobanoglous *et al.*, 1994). También puede presentar una gran variedad de materia sólida que puede expresarse de diferentes formas: disuelta o particulada (suspensión).

La composición del lixiviado está determinada por un conjunto de elementos los cuales prevalecen fundamentalmente, la composición de la basura y las condiciones específicas en el relleno sanitario, como la temperatura, contenido de humedad, edad del relleno, capacidad del suelo para remover contaminantes y la cantidad de agua que entra en contacto con la masa de residuos dispuestos. Generando así un líquido altamente contaminante y agresivo para el medio ambiente principalmente por su alta carga orgánica.

La encargada del tratamiento del líquido residual proveniente de las aguas lluvias y la degradación de los residuos sólidos, que han sido confinados en el sitio de disposición final “el Carrasco”, es la planta de tratamiento de lixiviados (PTLX). La PTLX está en funcionamiento desde hace tres años, y cuenta con un sistema de tratamiento preliminar, primario, secundario, terciario y lechos de secado.

Debido a la alta cantidad de materia orgánica generada por la sociedad y confinada en relleno sanitario “el Carrasco” y dando cumplimiento al decreto (artículo 74 Decreto 1594 de 1984), la PTLX implementa un sistema de tratamiento fisicoquímico (aplicación de coagulante y floculante) y uno biológico (aerobio-anaerobio). El sistema aerobio (implementado hace 2 meses) consta de dos lagunas de oxidación y el tratamiento anaerobio se lleva a cabo en un reactor tipo *UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)* de 60,55 m³ de volumen (altura 7,53 m y 3,20 m de diámetro) y caudales entre 1.5 y 2 litros por segundo, con un tiempo de retención hidráulico (TRH) total de aproximadamente de 10-12 horas. Los lodos son evacuados mediante purgas (2 veces al día) y enviados a los lechos de secado por gravedad.

Debido a la actual emergencia sanitaria del relleno, unido con la ampliación que dio el ministerio de medio ambiente en cuanto al funcionamiento del mismo (Septiembre de 2015); actualmente, la PTLX se encuentra en monitoreo de cada una de los procesos implementados con el fin de identificar las falencias de los

equipos usados para el tratamiento del lixiviado. En este sentido, el sistema anaerobio (implementado hace tres años) es un proceso que no ha sido controlado desde su instalación, por lo tanto no se cuenta con registros que garanticen una adecuada biodegradación de la materia orgánica que garantice la efectividad de los procesos fisicoquímicos posteriores. (EMAB S.A. ESP., 2014).

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo (modalidad práctica) fue la evaluación del reactor *UASB*. Con el desarrollo de este objetivo fue posible cuantificar los porcentajes de remoción en términos de materia orgánica disuelta (azúcares reductores, ácidos grasos volátiles y sólidos volátiles) y evaluar la estabilidad e inhibición del reactor mediante la valoración de la relación ácidos/ alcalinidad y concentración de amonio respectivamente.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LA PTLX

El proceso de tratamiento de lixiviado consta de cinco etapas: (I) preliminar, (II) primaria, (III) secundaria, (IV) terciaria y (V) lechos de secado (Figura 1). Donde en el transcurso de este proceso el agua residual es sometida a sedimentación de arenas presentes y degradación de materia orgánica dentro del reactor *UASB*.

La etapa preliminar consiste en la eliminación de arenas gruesas y regulación del caudal, se realiza mediante lagunas de oxidación y un desarenador distribuido en seis módulos de sedimentación. El objetivo del tratamiento primario es someter el lixiviado a un proceso anaerobio por medio de microorganismos que degradan la materia orgánica dentro del reactor *UASB*. En la etapa secundaria el lixiviado es bombeado al filtro percolador (biológico), donde se hace pasar el lixiviado a través de unas rosetas de material filtrante. Posteriormente, se completa el proceso de remoción de carga orgánica en una tercera etapa mediante sedimentadores; el lixiviado tratado se vierte en la quebrada la iglesia. Por último se encuentran los

lechos de secado que reciben los lodos provenientes del reactor y los sedimentadores, el lixiviado filtrado es recirculado al proceso.

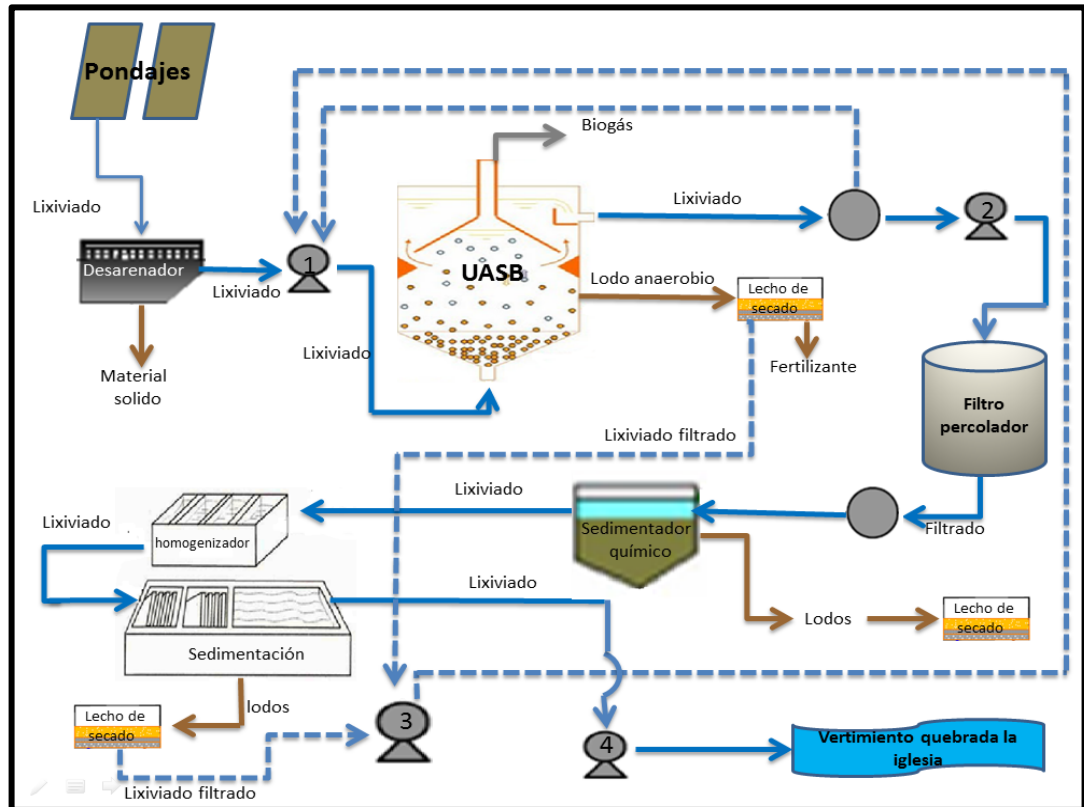


Figura 1. Diagrama del proceso de la PTLX del sitio de disposición final el carrasco

1.2 GENERALIDADES Y CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS TÍPICAS DE UN LIXIVIADO

El lixiviado (Guía ambiental ministerio del medio ambiente et al., 2002) se define como un líquido residual producto de la descomposición bioquímica de los residuos sólidos y el agua lluvia que se filtra en el relleno sanitario, saliendo por gravedad.

El agua que se introduce en los residuos depositados, debido principalmente a fuentes externas (agua lluvia, drenaje superficial, aguas subterráneas, entre otras),

se filtra a través de los residuos sólidos en descomposición lo que produce la lixiviación de materiales biológicos y compuestos químicos, tanto orgánicos como inorgánicos. Este proceso da lugar a la aparición de unas corrientes líquidas caracterizadas principalmente por presencia de sustancias con pH variable, alta carga orgánica y metales pesados, así como por su mal olor (Erigh.,1989). En la Tabla 1 se presentan las características fisicoquímicas típicas de un lixiviado con diferentes edades del relleno.

Tabla 1. Características fisicoquímicas típicas de un lixiviado

Edad del relleno	Nuevo (<2 años)	Nuevo (>2años)	Viejo (>10 años)
Constituyentes (mg/l)	Rango	Valor típico	Rango típico
ALCALINIDAD CaCO ₃	1000-10000	3000	200-1000
DQO	3000-60000	18000	100-500
DBO	2000-30000	10000	100-200
SST	200-2500	500	100-400
COT	1500-20000	6000	80-160
pH	5 - 8	6	6.6-7.5
Nitrógeno total	20-1500	400	100-200
Fósforo total	5-100	30	6.6 - 7.5

Fuente: GLYNN & HEINKE, "Environmental science and engineering"

1.3 NORMAS DE VERTIMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS A CUERPOS DE AGUA

Todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, por lo menos con las siguientes condiciones:

Tabla 2. Normas de vertimiento de residuos líquidos. Artículo 74 Decreto 1594 de 1984

PARÁMETRO	VALOR ACEPTADO
pH	5 a 9 unidades
Temperatura	< 40° C
Material flotante	Ausente
Grasas y aceites	Remoción > 80% en carga
Sólidos suspendidos	Remoción > 80% en carga
Demanda química de oxígeno	Remoción > 80% en carga
Demanda bioquímica de oxígeno	Remoción > 80% en carga

Fuente: Decreto 1594 de 1984

Este decreto regula parcialmente los usos del agua y residuos líquidos, aplicable a los residuos sólidos en lo referente a la disposición final de lodos y al vertimiento de lixiviados a los cuerpos de agua como producto de la disposición final de residuos sólidos (Guía ambiental ministerio del medio ambiente., 2002).

1.4 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB)

Reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente, comúnmente conocido como reactor *Up flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)* (Figura 2), es un sistema desarrollado en Holanda por el grupo de Lettinga *et al.*, 1980. Donde el lodo presenta características de sedimentación y actividad metanogénica, lodos con estas características facilitan la segregación de las fases gaseosa, sólida y líquida, y evitan la pérdida de la biomasa del reactor permitiendo el desarrollo de todos los grupos bacterianos involucrados en el proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica.

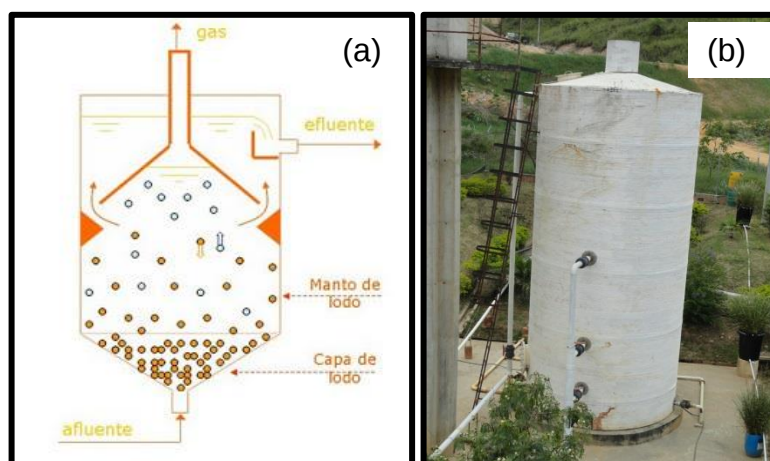


Figura 2. (a) Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) y (b) Reactor UASB de la PTLX

En el proceso, denominado digestión anaerobia (DA), la materia orgánica es convertida en biogás rico en metano y un lodo efluente producto de la materia orgánica no degradada y de la lisis celular. (Díaz Báez *et al.*, 2002).

La DA se lleva a cabo en cuatro etapas: a) la hidrólisis implica la transformación por enzimas, de compuestos con alto peso molecular en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y carbono celular, b) durante la acidogénesis los productos obtenidos son transformados en ácidos grasos volátiles (AGV) como ácido propiónico, acético, butírico entre otros (Pandey *et al.*, 2012). c) En la acetogénesis, los ácidos grasos volátiles junto con el etanol se convierten en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, d) y finalizando en la etapa metanogénica las bacterias convierten el acetato en metano y dióxido de carbono (Parawira *et al.*, 2005)

Los resultados obtenidos de las experiencias a escala piloto y escala real de este tipo de reactores efectuadas en varias partes del mundo, proporcionaron avances importantes en el desarrollo del proceso y tecnología del tratamiento anaerobio. El éxito de estas experiencias, han establecido al reactor *UASB* como una opción de tratamiento para una amplia variedad de residuos líquidos (Díaz Báez *et al.*, 2002).

1.5 VARIABLES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA (DA), MONITOREADAS EN EL REACTOR UASB

Las variables monitoreadas durante el proceso de digestión anaerobia son:

AZÚCARES REDUCTORES TOTALES (ART)

El rendimiento en la etapa hidrolítica de la DA puede ser expresada por la cinética y el consumo de ART. La alta concentración de azúcares reductores totales favorece el buen rendimiento del reactor; ya que son compuestos solubles que son fácilmente metabolizados por los microorganismos, permitiendo llevar a cabo la DA (Madigan *et al.*, 2006).

ACIDOS GRASOS VOLÁTILES (AGV)

La concentración de AGV es un parámetro importante para monitorear el rendimiento del reactor (Yadvika *et al.*, 2004); como resultado de la fase de acidogénesis. La inhibición de microorganismos metanogénicos se presentan por cambios en los factores ambientales o nutrientes, provocando la acumulación de AGV, ocasionando una disminución en los valores de pH (Vavilin *et al.*, 2008).

ALCALINIDAD TOTAL (AT)

Es la capacidad del sistema para soportar y amortiguar la presencia de ácidos sin disminuir su pH. Esto ocurre por el efecto buffer generado por la presencia de iones hidroxilos (OH^-), carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (H_2CO_3^-).

pH

Se ha demostrado que el intervalo óptimo del pH para obtener máxima producción de biogás en la digestión anaerobia es 6.5 a 8 (Pog y Chong, 2009); valores de pH inferiores a 4 y superiores a 9.5 pueden llevar a un desequilibrio en el proceso (Yadvika *et al.*, 2004).

TEMPERATURA

La temperatura afecta directamente a la DA, los rangos de temperatura en los que se puede llevar son: psicrófila (menor a 30°C), mesófila (30°C a 40°C), termófilas (50°C a 60°C). Particularmente para los sistemas anaerobios es recomendable el rango mesófilico (Yadvika *et al.*, 2004), con el fin de evitar la presencia de inhibición por AGV en especial para la etapa de acidogénesis.

SOLIDOS VOLÁTILES (SV)

El contenido de sólidos volátiles, describe el contenido de materia orgánica en el residuo. El protocolo se basa en el hecho de que la mayoría de los materiales orgánicos se encienden y se queman a una temperatura de 550°C (Angelidaki *et al.*, 2004).

INHIBICIÓN

En la DA, los inhibidores más representativos son el: amonio libre, los ácidos grasos de cadena larga y el sulfuro de hidrógeno (Mata *et al.*, 2000). Así mismo los metales pesados son considerados inhibidores. La concentración de amoníaco libre depende de la concentración de amoníaco total, la temperatura y el pH. Si se presenta aumento de estos últimos factores; favorece la concentración de amoníaco libre y por lo tanto la inhibición.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 3 se presenta el desarrollo metodológico

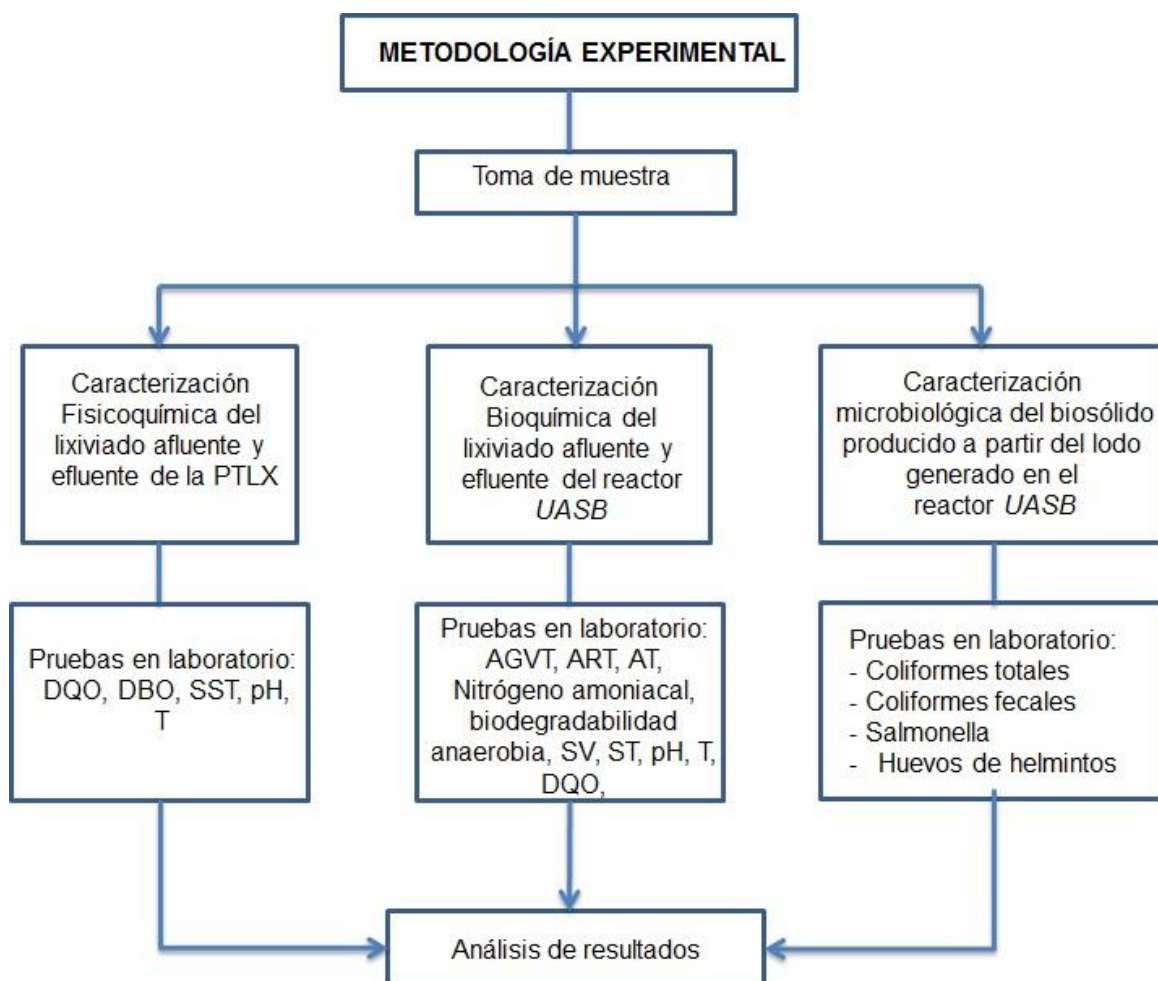


Figura 3. Metodología experimental para la evaluación del reactor *UASB*

2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL LIXIVIADO AFLUENTE Y EFLUENTE DE LA PTLX

Se realizó un monitoreo cada 60 minutos durante 8 horas en dos puntos: caja de recepción de lixiviados ubicada antes de las piscinas y estación de bombeo número 4; Este monitoreo fue contratado por la empresa de aseo de Bucaramanga (EMAB S.A. E.S.P) con el Laboratorio de Análisis Químico de Aguas Residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Se cuantificaron, a la entrada y a la salida de la PTLX los siguientes parámetros: DQO, DBO, SST, Sólidos sedimentables, T, pH, oxígeno disuelto, caudal. Las mediciones fueron realizadas por el Laboratorio de Análisis Químico de Aguas Residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana.

2.2 CARACTERIZACIÓN BIOQUÍMICA DEL LIXIVIADO ENTRADA Y SALIDA DEL REACTOR UASB

El muestreo se llevó a cabo cada 8 días durante un período de 10 semanas con la ayuda del operario de turno de la planta, el protocolo utilizado para la recolección de la muestra se presenta en el anexo A. La muestra se tomó en dos puntos entrada y salida del reactor *UASB*; en la estación de bombeo número 1 (entrada) y la caja de distribución (salida). Se recolectó en recipientes de plástico de capacidad 500 ml.

Se caracterizó el inóculo (lixiviado) a la entrada y la salida del reactor *UASB* para evaluar la viabilidad de la DA, además se realizaron las pruebas de DQO en el afluente y efluente y SSV, SST en el afluente; con el fin de determinar el desempeño del reactor. Las Condiciones de operación para la DA del lixiviado son: Temperatura de 29 ± 2 °C y un volumen de reactor de 60.55 m^3 . La

caracterización fue realizada en el laboratorio de biotecnología de la Universidad Industrial de Santander.

2.2.1 Monitoreo de las variables de respuesta de la DA en el reactor *UASB*.

Durante el tiempo de operación (10 semanas) se monitorearon las variables de respuesta características de este tipo de biodegradación (DA) (Angelidaki *et al.*, 2011): AGV, ART, AGV/AT, pH; con el fin de monitorear la estabilidad del reactor.

La tabla 3 representa las variables de respuesta del proceso, el método analítico usado, las unidades y la periodicidad

Tabla 3. Variables a monitorear, método analítico, unidades y periodicidad de la medición

Parámetro	Método analítico	Unidades	Periodicidad
AGVT	Titulación (Anexo C)	mg/L	cada 8 días
AT	Titulación (Anexo C)	mgCaCO ₃ /L	cada 8 días
pH	Potenciométrico/NTC 5167	-	Cada 8 días
SV	Gravimétrico (Anexo D)	g/ml	cada 8 días

Con el objeto de evaluar la capacidad de producción de metano del lixiviado se determinó el potencial de biometanización en unidades de ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$) mediante ensayos de biodegradabilidad anaerobia. Este experimento se llevó a cabo en reactores discontinuos de 50 mL con volumen de operación de 30 mL a condiciones mesofílicas (Temperatura controlada en incubadora $39 \pm 2^\circ\text{C}$) realizado en el laboratorio de biotecnología de la Universidad Industrial de Santander. Los bioreactores fueron gaseados con nitrógeno por 5 minutos para desplazar el aire contenido en orden de alcanzar las condiciones anaerobias y sellados con corchos de butilo y agrafe de aluminio. El ensayo se llevó a cabo por

triplicado. El volumen de metano producido fue cuantificado por el método de desplazamiento alcalino (Anexo E).

2.3 CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DEL BIOSÓLIDO PRODUCIDO A PARTIR DEL LODO GENERADO EN EL REACTOR *UASB*

La muestra se tomó en la caja de recepción de lodos del reactor *UASB* con la ayuda del operario de la planta. Se recolectó en dos recipientes de vidrio estériles.

Para dar cumplimiento a la normativa del uso de los biosólidos producidos a partir de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (Decreto 1287 del 10 de julio 2014) se hizo una caracterización microbiológica. Esta caracterización consistió en cuantificar microorganismos indicadores de contaminación como Coliformes totales y fecales, salmonella y huevos de Helmintos; parámetros exigidos por la norma, para determinar sus posibles usos o una adecuada disposición final. La caracterización microbiológica se hizo en los laboratorios de microbiología de la Universidad Industrial de Santander.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL LIXIVIADO AFLUENTE Y EFLUENTE DE LA PTLX

El análisis de resultados de la caracterización se desarrolló con dos enfoques: el primero, consistió en realizar un análisis comparativo entre los porcentajes de remoción de la PTLX y los porcentajes de remoción exigidos por la norma de vertimientos de residuos líquidos a cuerpos de agua (emitida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible) y en el segundo se contrasta la caracterización del lixiviado del relleno el “carrasco”, con un lixiviado del relleno sanitario “La esmeralda” (lixiviado colombiano) y un lixiviado estándar.

3.1.1 Análisis comparativo entre capacidad de remoción de la PTLX con la norma de vertimientos.

En la tabla 4 se presentan los resultados del estudio de caracterización realizado a la PTLX del sitio de disposición final el carrasco.

Tabla 4. Características fisicoquímicas del lixiviado relleno sanitario el Carrasco.

Variables	Parámetro		Unidades	Método
	Afluente	Efluente		
Ph	7,49	8,20	Unidades de pH	SM 4500 H^+ -B
Temperatura	33,08	29	°C	SM 2550-B
DQO	24784	4274	mg O ₂ /l	SM 5220-C
DBO5	9983	2238	mg O ₂ /l	SM 5210-B
Sólidos sedimentables	26,4	0,50	ml /l	SM 5540-F
Sólidos Suspendidos Totales	348	136	mg /l	SM 2540-D
Caudal	1,426	0,527	m ³ /l	Volumétrico
Oxígeno disuelto	0,14	0,10	mg/l O ₂	SM4500-O-C

Fuente: Reporte de resultados de ensayo, laboratorio de análisis químico de aguas residuales

Los resultados obtenidos muestran que la PTLX tiene un porcentaje de remoción del 82,75, mayor al exigido por la norma (artículo 74 del decreto 1594 de 1984; los porcentajes de remoción de DQO, DBO y SST deben ser mayores a 80%). Respecto al DBO y los SST, el porcentaje de remoción cuantificado fue de 77,58 y 60,91 respectivamente, incumpliendo con la norma.

Para los parámetros pH y Temperatura, se evidencia que los valores obtenidos durante la jornada del monitoreo dan cumplimiento a lo establecido en la norma; debido a que se presentaron valores de pH entre 7,49 y 8,20 unidades de pH. En cuanto a la temperatura, el valor máximo registrado en el efluente fue de 29 °C valor inferior a 40 °C requerido.

3.1.2 Análisis comparativo del lixiviado del relleno sanitario “El Carrasco” con el lixiviado del relleno sanitario “la Esmeralda” y un lixiviado estándar.

En la tabla 5 se resumen las características fisicoquímicas típicas del lixiviado del relleno sanitario el Carrasco, las del lixiviado del relleno sanitario La Esmeralda (lixiviado colombiano) y la composición estándar de un lixiviado.

Tabla 5. Características fisicoquímicas típicas lixiviado del relleno sanitario el Carrasco, lixiviado del relleno sanitario La Esmeralda y las reportadas en la literatura.

Parámetro	Unidades	Lixiviado Carrasco	Lixiviado La Esmeralda	Lixiviado estándar
DQO	mg O ₂ /l	24784	39150	3000-60000
DBO ₅	mg O ₂ /l	9983	30500	2000-30000
SST	mg/ l	348	1382	200-2500
pH	Unidades de pH	7,49	6,7	5-8

Fuente: MORILLO F et al., 2005, modificado por autores.

La composición del lixiviado evaluado en este trabajo, presenta menor contenido de carga orgánica representada en concentraciones de DQO y DBO en comparación con el lixiviado del relleno sanitario “La Esmeralda”. De acuerdo a los resultados obtenidos se infiere que los procesos de separación en la fuente, las

condiciones climáticas y la edad del relleno son factores que influyen en la concentración de carga orgánica del lixiviado y consecuentemente en los porcentajes de remoción. Sin embargo, la caracterización de los lixiviados para cada uno de los rellenos se encuentra dentro de los rangos de un lixiviado estándar el cual es el promedio de lixiviados generados en diferentes rellenos a nivel mundial.

3.2 CARACTERIZACIÓN BIOQUÍMICA y MICROBIOLÓGICA DEL LIXIVIADO ENTRADA Y SALIDA DEL REACTOR UASB

3.2.1 Monitoreo de las variables de respuesta en el reactor UASB.

En la figura 4 se observa la variación del tiempo de retención hidráulico (TRH) y el contenido de carga orgánica volumétrica (COV) expresado como sólidos volátiles del afluente (SV). Las variables son expresadas en función del caudal y volumen del reactor.

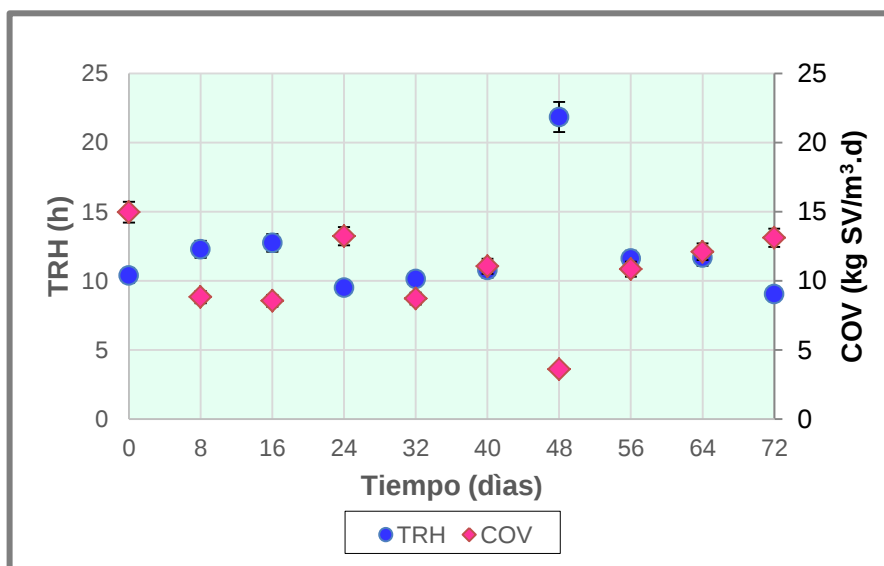


Figura 4. Variación del tiempo de retención hidráulico (TRH) y el contenido de carga orgánica volumétrica (COV)

El TRH osciló entre 9 y 13 horas, a diferencia del día 48 en el que se presentó una disminución significativa del caudal de entrada a la planta, debido a la ruptura de un tubo que conduce el lixiviado de las cárcavas hacia las lagunas de oxidación lo cual se corrobora con un descenso de la COV para el mismo día.

Se realizaron pruebas de SV del afluente para conocer el contenido de materia orgánica presente en el lixiviado, encontrándose valores máximos de 14,96 kg SV/m³.d en el día 0 y mínimos de 3,60 kg SV/m³.d en el día 48 en el reactor UASB. La materia orgánica disponible para la degradación, se presenta en bajas concentraciones de SV (entre 3 y 6,5 g/l).

Las variaciones de la COV y el porcentaje de remoción de ART se presentan en la figura 5.

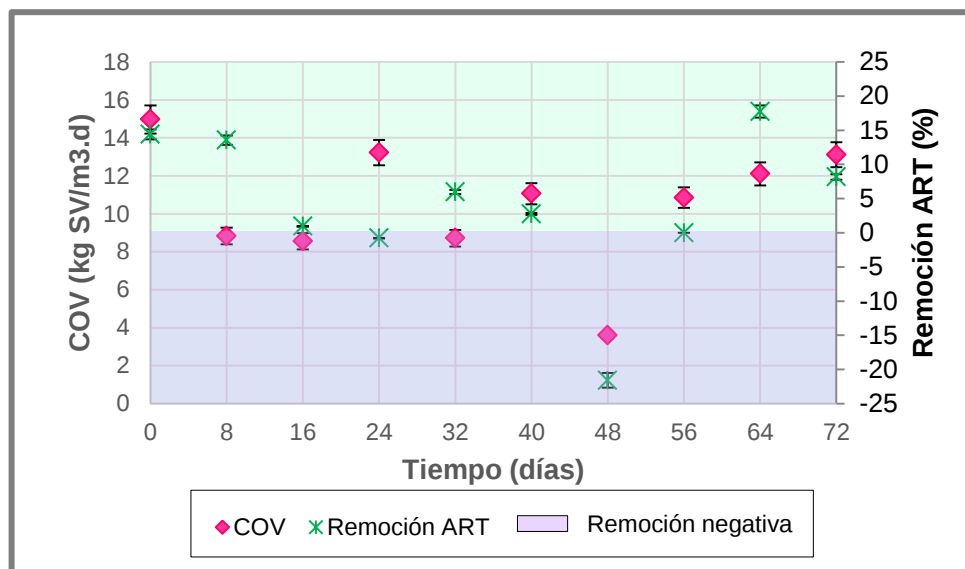


Figura 5. Variación de la COV y el porcentaje de remoción de ART

El bajo porcentaje de remoción de ART indican una baja concentración de sólidos volátiles evidenciando un deficiente arranque de la DA.

Se evidencia una mínima hidrólisis de la materia orgánica por parte de los microorganismos facultativos encargados de esta etapa (Angelidaki *et al.*, 2011), lo cual muestra una inestabilidad hidrolítica perjudicando de esta manera las posteriores etapas de DA y el rendimiento del reactor.

Se presenta un porcentaje de remoción de ART máximo de 17,73 en el día 64, muy inferior al consumo de ART registrado para la DA.

Los resultados mostrados en la figura 6 presentan la relación existente entre la Carga Orgánica volumétrica y el porcentaje de remoción de AGV, evidenciando que la variación de concentraciones bajas de ácidos grasos volátiles se debe a la baja carga orgánica volumétrica encontrada dentro del reactor.

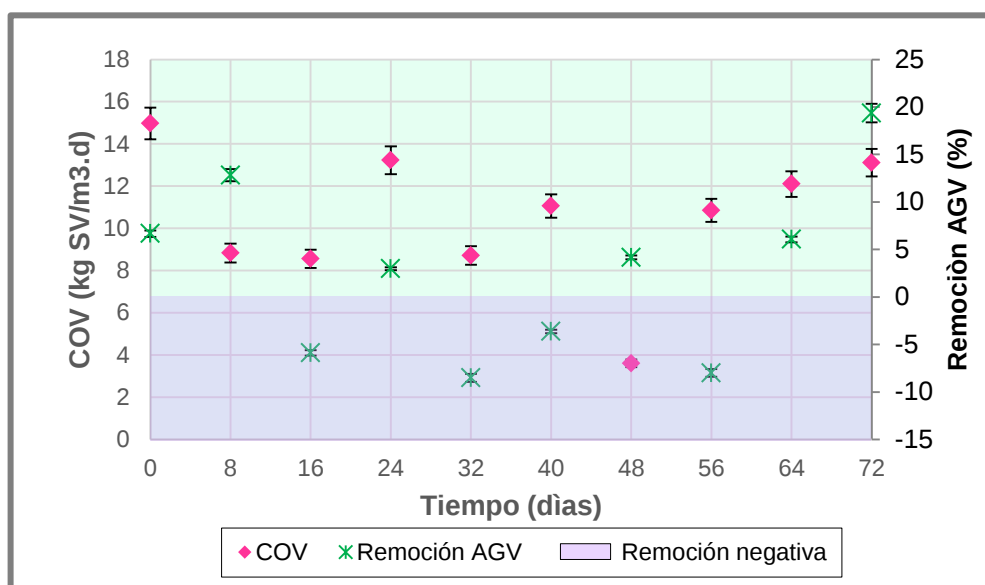


Figura 6. Variación de la COV y el Porcentaje de remoción de AGV

Los porcentajes de remoción de AGV presentan un comportamiento aleatorio. En los días 16, 32, 40 y 56 se encuentran con porcentajes de remoción negativos, debido a un incremento en la concentración de los AGV a la salida del reactor insinuando algún problema en el funcionamiento; que podría deberse a que la

velocidad a la que se producen los ácidos orgánicos es mayor que la velocidad de consumo de éstos, lo que origina una acumulación de AGV no degradados (Monroy *et al*, 1994).

El aumento de la concentración de los AGV en el efluente podría asociarse a una sobrecarga de la alimentación o a una posible inhibición; a su vez una gran concentración de AGV podría llevar a acidificar el reactor produciendo el fallo del proceso de digestión (Hernández, 1995).

En el día 48 la COV presenta el valor más bajo y el TRH (21,84 h) más alto, por consiguiente el porcentaje de remoción de AGV es superior a la carga orgánica volumétrica.

La figura 7 muestra el comportamiento de la COV respecto al porcentaje de remoción de ST.

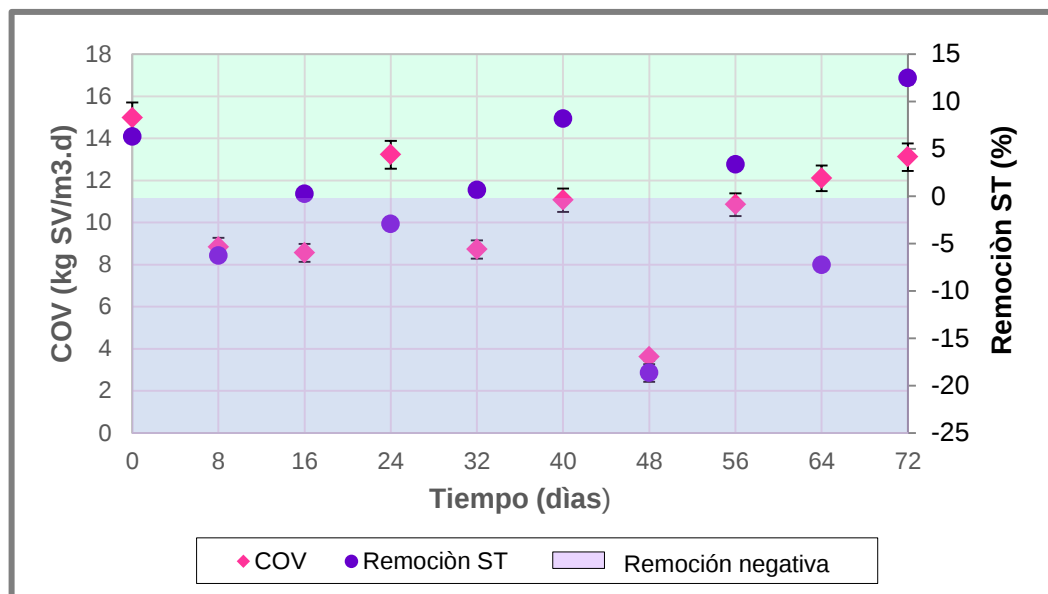


Figura 7. Comportamiento de la COV respecto al porcentaje de remoción de ST

En los días 8, 24, 48, 64 se presentan porcentajes de remoción de sólidos totales negativos debido a que en el efluente del reactor *UASB* se alcanzaron concentraciones mayores de sólidos. Este comportamiento pudo ser causado por arrastre de las partículas más finas del lodo, incluso para TRH altos. Los porcentajes de remoción de los sólidos totales están por debajo de la carga orgánica volumétrica, ni siquiera el porcentaje más alto (12,44) que se presenta en el día 72 es significativo para este tipo de reactor.

La figura 8 describe el comportamiento del pH y la relación de AGV/AT durante el tiempo de monitoreo del reactor.

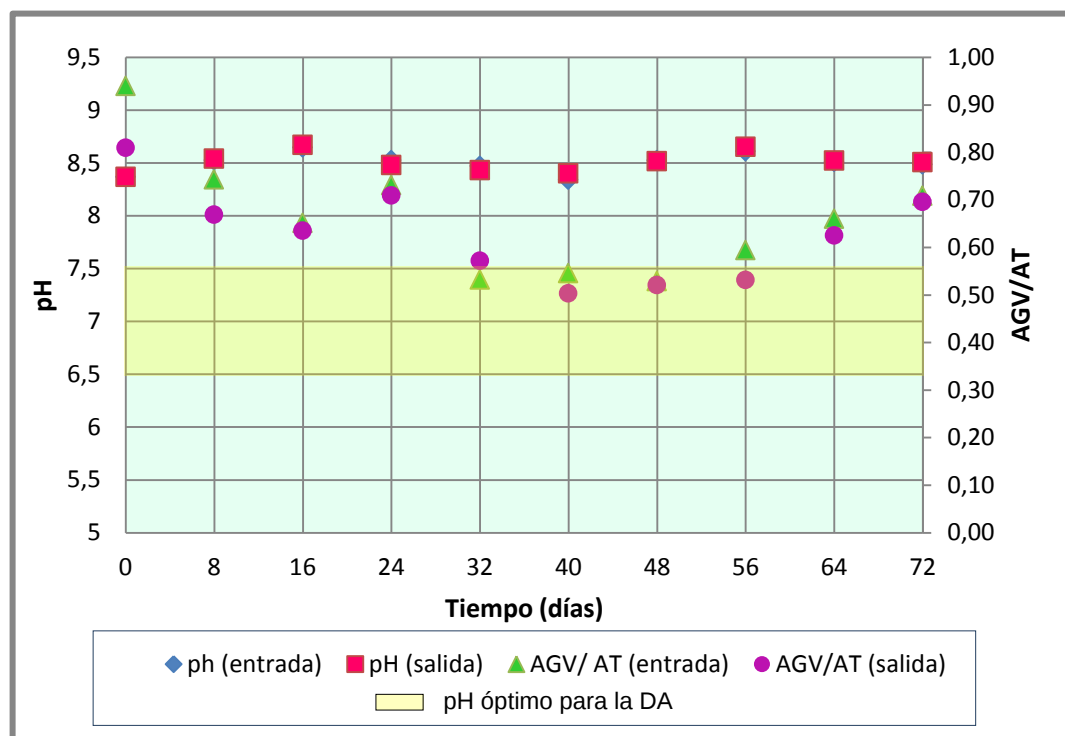


Figura 8. Comportamiento del pH y la relación AGV/AT

Se observa que durante el tiempo de monitoreo el pH a la entrada y la salida estuvo estable en un rango de 8,44-8,6; intervalo en el que opera de forma adecuada un reactor (Obaja *et al.*, 2003). Así mismo los altos valores de la AT

neutralizaron los ácidos, amortiguando el sistema sin disminuir el pH. No se presentaron caídas drásticas de pH debido a que el reactor contaba con suficiente capacidad de tamponamiento, producto de la alcalinidad del afluente.

La relación AGV/AT se puede utilizar como una medida de la estabilidad del proceso anaerobio (Raposo *et al.*, 2009). Cuando esta relación es superior a 0,3 sugiere la presencia de disturbios en el proceso de la digestión (Rodríguez *et al.*, 2013). Como se puede observar en la gráfica tanto para la entrada como para la salida se presentan valores entre 0,5-0,9, lo que indica una inestabilidad del reactor *UASB* durante todo el monitoreo. Ya que la capacidad Buffer para todos los puntos se mantiene por encima de 0,5 puede ser un indicativo de que se presentan problemas de inhibición de la digestión anaerobia y que el sistema no puede resistir incrementos mayores de carga orgánica (Charles *et al.*, 2009).

La figura 9 representa el porcentaje de remoción de nitrógeno amoniacal durante el tiempo de monitoreo.

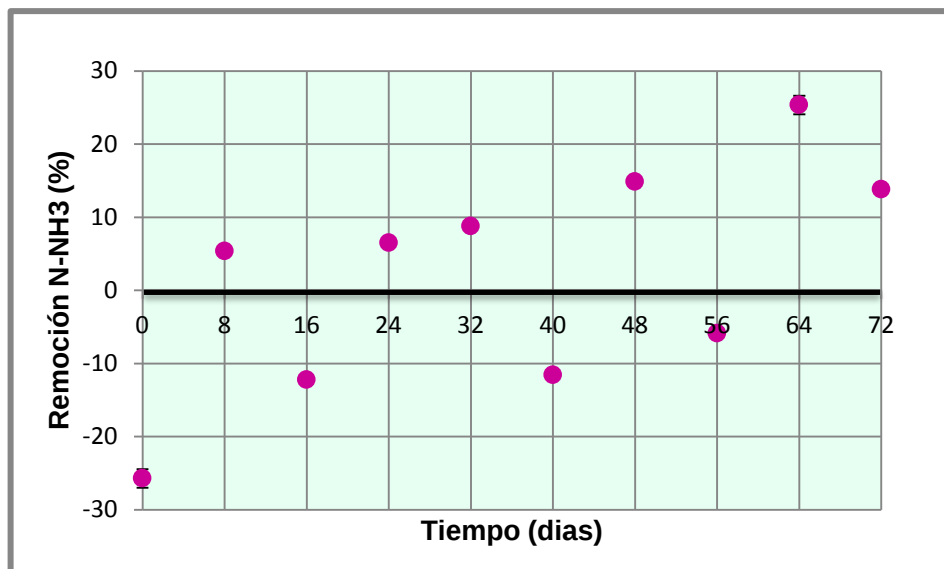


Figura 9. Porcentaje de remoción de nitrógeno amoniacal

El comportamiento mostrado en la gráfica permite establecer una inhibición por amonio en el reactor *UASB* en los días 0, 16, 40 y 56, dado que la concentración de N-NH₃ es mayor en el efluente del reactor. Para los demás días se presentan porcentajes de remoción bajos que oscilan entre 5-25. A partir de estos resultados se demuestra que el proceso de degradación anaerobia no se desarrolla de forma satisfactoria, debido a que una alta concentración de iones amonio, provocan inhibición de tipo no competitivo en el metabolismo del consorcio microbiano, causando reducción drástica de la producción de biogás (Salminen E *et al.*, 2002)

Los resultados de los parámetros DQO, SSV, SST se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización DQO, SSV, SST en el reactor *UASB*

Parámetro	Unidades	Afluente	Efluente	% Remoción
DQO	mg O ₂ /l	24880	21560	13,34
SSV	mg/l	155	-	-
SST	mg/l	158	-	-

De la caracterización se obtuvo que la eficiencia del reactor fue de 13,34% en DQO. La baja eficiencia en remoción de carga orgánica encontrada se debe a que el reactor no está operando correctamente. Lo anterior se debe a la falta de inoculación en el periodo de arranque del reactor y a la baja concentración de SSV que representan la biomasa activa.

3.2.2. Ensayo de biodegradabilidad anaerobia.

La producción de metano (Figura 10) alcanzó la estabilidad en el día 5. Los bajos rendimientos del proceso son atribuidos a la concentración de SSV dentro del reactor (155 mg/l) y a las bajas remociones de amonio. Estos resultados se corroboran con los discutidos anteriormente en términos de remoción de azúcares, ácidos y sólidos volátiles). El potencial de biometanización del lixiviado fue de 0,14 m³ CH₄/kg SV, que corresponde al 37% del metano teórico (Angelidaki *et al.*,

2011), este valor es bajo comparado con los potenciales de aguas residuales y estiércoles (Quintero *et al.*, 2011)

Estos resultados muestran que el reactor *UASB* de la PTLX, no tiene actividad metanogénica, y consecuencia de ello son las fallas operacionales en el reactor, y mal desempeño del sistema anaerobio en la PTLX. De acuerdo a lo anterior, se hace necesario realizar el arranque del *UASB* con previa inoculación.

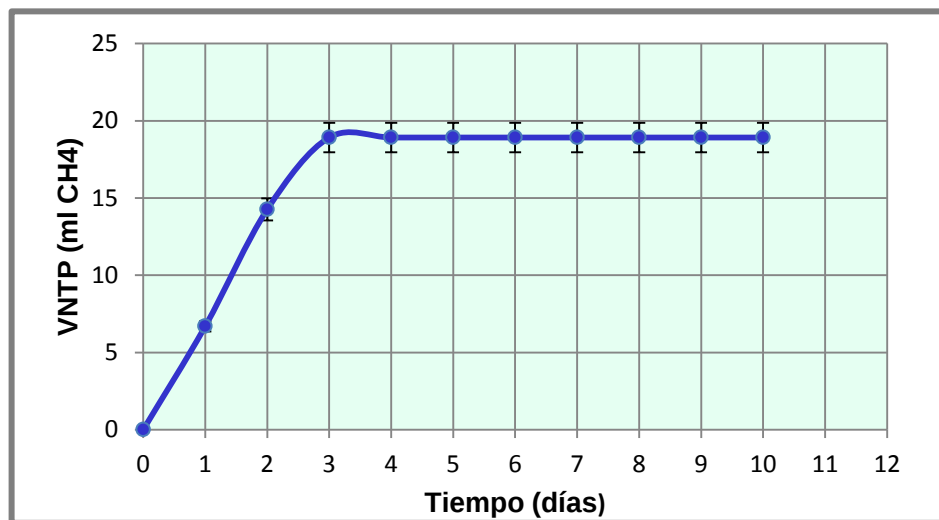


Figura 10. Producción de metano

3.3 CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DEL BIOSÓLIDO PRODUCIDO A PARTIR DEL LODO GENERADO EN EL REACTOR *UASB*

Durante la caracterización microbiológica, se encontró la presencia de organismos patógenos como Coliformes totales y fecales (Tabla 7). Los resultados muestran que hay ausencia de *Salmonella* sp. y huevos de helmintos que pudieron ser inhibidos en el proceso aerobio o probablemente que el lixiviado no contenga esta clase de patógenos. La caracterización microbiológica permitió clasificar el lodo efluente como biosólido clase A, con lo cual el lodo no requiere estabilización posterior. Las alternativas de uso de estos biosólidos puede destinarse para zonas

verdes (cementerios, separadores viales, campos de golf, lotes vacíos), como producto para uso en áreas privadas (jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización), en agricultura y demás usos de la categoría B (Decreto 1287 del 10 de julio de 2014).

Tabla 7. Caracterización microbiológica del biosólido producido a partir del lodo generado en el reactor UASB

Análisis microbiológico	Unidad	Resultado	Técnica de medición	Categoría biosólido valores máximos permisibles	
				A	B
Coliformes totales	NMP/ g ó ml	210	NMP en caldo LMX Fluorocult.	-	-
Coliformes fecales	NMP/ g ó ml biosólido	210	NMP en caldo LMX Fluorocult.	< 1000	< 2×10^6
Salmonella sp.	Presencia	Ausencia	Pruebas bioquímicas e identificación serológica	Ausencia	< 1000
Huevos de Helmintos	Huevos de helmintos/ 4g de biosólido	0	Flotación en ZnSO ₄	< 1	< 10

Fuente: Decreto 1287 del 10 de julio de 2014

4. CONCLUSIONES

El reactor UASB fue evaluado en términos de materia orgánica disuelta, alcanzando remoción de azúcares reductores, ácidos grasos y sólidos volátiles de 4.11%, 2.60% y 1.23 % respectivamente; una mínima remoción de carga orgánica expresada en DQO, del 13.34%. Estos resultados indican un mal desempeño del proceso de digestión anaerobia y una baja eficiencia del reactor.

La caracterización del biosólido producido del lodo generado en el reactor *UASB* de la PTLX del relleno sanitario “Carrasco” permitió clasificarlo en categoría A; debido a las bajas concentraciones de coliformes totales y fecales y a la ausencia de salmonella sp. y huevos de helmintos.

La planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario “El Carrasco” presenta una remoción en el sistema aerobio/anaerobio de DQO y DBO de 82,75% y 77,58% lo que indica una adecuada remoción de materia orgánica. Sin embargo, la remoción de DBO no es suficiente para dar cumplimiento a la normatividad que exige valores de remoción mayores al 80%.

En la práctica empresarial se comprobó el mal desempeño del reactor *UASB*, supone que al mal arranque del mismo y al no contar con un inóculo debidamente caracterizado que contenga biomasa activa. Así mismo para hacer seguimiento a las variables más representativas para este tipo de sistema se necesita Implementar un laboratorio básico.

BIBLIOGRAFÍA

ANGELIDAKI I., SANDERS W. *Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants*. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 3, 2004, 117-129.

ANGELIDAKI I.; KARAKASHEV D.; BATSTONE D.; PLUGGE C.; STAMS A. *"Biomethanation and Its Potential" En: Methods in Methane Metabolism*. Editor Rosenzweig and Ragsdale. Editorial Elsevier Applied Science, Inglaterra, 2011, 328-347.

DÍAZ B., ESPITIA MS., MOLINA F. *Digestión Anaerobia una Aproximación a la Tecnología*. UNIBIBLIOS. Bogotá, Colombia 2002. pp. 27-35.

Documento técnico generalidades del Relleno Sanitario el Carrasco. Empresa de Aseo de Bucaramanga EMAB S.A. ESP.

EMPRESA DE ASEO DE BUCARAMANGA.2014. Disponible en [/www.emab.esp.com](http://www.emab.esp.com)

HERNÁNDEZ A. "Depuración de aguas residuales". Segunda Edición. Colección senior N° 9. Madrid. Capítulo 10.1995, 765-792.

Informe Optimización del sistema de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario el Carrasco. Diseños sistema de tratamiento segunda etapa. Gradex Ingeniería S.A. Empresa de aseo de Bucaramanga S.A E.S.P. Capítulo 8.

LETTINGA G., VAN VELSEN A., HOBMA S., DE ZEEUW W., KLAPWIJK A. *Use of the Upflow Sludge Blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment*. Biotechnology & Bioengineering, 22, 1980, 699-734.

LUQUE J., MENDEZ A., RODRIGUEZ T., *Evaluación de un reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos tratando aguas residuales hospitalarias*. Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada. 2013.

MADIGAN M., MARTINKO J., PARKER J., BROCK. *Biología de los microorganismos*. Pearson Prentice Hall, 10, 2006, p. 151-168.

MATA J. *Fundamentals of the Anaerobic Digestion Process*. In: *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA Pub, London. (2003) Cap 1. pp. 1-18.

MATA-ALVAREZ J., MACÉ S., LLABRÉS P. *Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives*. Bioresource Technology, 74, 2000, 3-16.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. *Guía Ambiental para Rellenos Sanitarios*. 2002.

MONROY O. *“Control de la digestión anaerobia”*. III Taller y Seminario Latinoamericano sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Uruguay. (1994) 185-194.

MORALES C., *Estudio para la remoción de metales pesados en los lixiviados de Rellenos Sanitarios*. Tesis especialista en ingeniería ambiental-sanitaria. Manizales. Universidad Nacional de Colombia. 2007.

MORILLO F., FAJARDO E., *Estudio de los reactores UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda*. Tesis especialista en ingeniería ambiental-sanitaria. Manizales. Universidad Nacional de Colombia.2005

OBAJA D., MACÉ S., COSTA J., SANS C., MATA-ALVAREZ J. *Nitrification, desnitrification and biological phosphorus removal in piggery waster using a sequencing batch reactor*. Bioresource Technology, 87, 2003, 103-111.

PARAWIRA, W., MURTO, M., READ, J.S & MATTIASSON, B. *Profile of hydrolases and biogas Production during two-stage mesophilic anaerobic digestion of solid potato Waste*. Process Biochemistry 40, 2003, 2495-2952.

POH.P, CHONG. M. *Development of anaerobic digestion methods for palm oil*. Bioresource Technology, 100, 2009, 1-9.

QUINTERO M; CASTRO L; ORTIZ C; GÚZMAN C; ESCALANTE H. *“Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: fique’s bagasse as an example”* Bioresource Technol. DOI 10.1016/j.biortech.2011.12.052.

RAPOSO F., BORJA F., MARTÍN M., RINCON B. *Influence of inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation*. Chemical Engineering Journal, 149, 2009, 70-77.

ROBAYO C. *Diseño de rellenos sanitarios*. Bogotá. Universidad Nacional abierta y a distancia Escuela de ciencias agrícolas, pecuarias y del medio ambiente. 2012.

(SALMINEN E., RINTALA J., (2002). *Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review*. Bioresource Technology. 83, 13 26. Salminen y col., 2002; Abouelenien y col., 2010).

TCHOBANOGLOUS G., THEISEN H., VIGIL S. Gestión integral de residuos sólidos. Ed. McGraw Hill. Madrid.1994

VAVILIN V., FERNANDEZ B., PALATSI J., FLOTATS X. Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. Waste Management, 28, 2008, 939-951.

Verificación de las estructuras que hacen parte de la planta de lixiviados del Relleno Sanitario el Carrasco de la EMAB SA ESP. Contrato de prestación de Servicios No. 032 de 2012. COINGFRA. Agosto de 2012.

YADVIKA., SANTOSH., SREEKRISHNAN T., KOHLI S., RANA V. *Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques –a review* Bioresource Technology, 95, 2004,1-10.

ANEXOS

Anexo A. Protocolo para la toma de muestra en la PTLX.

Materiales

- Recipientes de plástico de 500 de capacidad 500 ml
- Tapa bocas
- Guantes
- Balde
- Cinta de enmascara
- Lazo
- Marcador permanente
- Bolsas de cierre hermético

Procedimiento para la entrada y salida del reactor UASB

1. Rotular las muestras con la fecha y lugar de la toma de muestra.
2. Recolectar la muestra en un balde.
3. Traspasar la muestra en recipientes de 500 ml.
4. Depositar el recipiente en bolsa de cierre hermético.
5. Trasladar la muestra al laboratorio.

Anexo B. Determinación de la concentración de azúcares reductores totales (ART)

El método DNS o del ácido 3-5 dinitrosalicílico es un método calorimétrico, desarrollado para la cuantificación de azúcares reductores totales.

Materiales y Reactivos:

- Agua destilada
- DNS
- Hielo
- Micropipeta
- Tubos de ensayo
- Espectrofotómetro

Reactivo DNS

- Mezclar y disolver en 250 ml de agua destilada 8 g de NaOH y 150 g de tartrato sodio potasio.
- Se agregan 5 g de ácido dinitrosalicílico.
- Aforar a 500 mL con agua destilada.
- Almacenar a temperatura ambiente y proteger de la luz

Procedimiento:

1. Tomar una muestra aproximadamente de 7mL en tubos falcon de 15 mL.
2. Centrifugar las muestras por 15 minutos a 10000 rpm.
3. Llevar el sobrenadante a otro falcon.
4. Medir 5mL del sobrenadante y llevarlo a un tubo de ensayo.
5. Agregar 5 mL de DNS
6. Dejar en baño con agua en ebullición durante 5 minutos.

7. Detener la reacción en un baño de hielo.
8. Agregar 5mL de agua destilada y dejar reposando durante 15 minutos.
9. Calibrar el equipo usando un blanco obtenido en el procedimiento anterior pero agregando agua destilada en lugar de nuestra.
10. Leer la densidad óptica a 540 nm de la muestra. Usando la curva estándar de glucosa hallar las concentraciones de ART.

Curva estándar de glucosa

Se preparan las muestras de glucosa con concentraciones conocidas, se aplica el método DNS y se lee su absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 540 nm.

Con los datos obtenidos se traza un gráfico lineal de la concentración de glucosa (azúcar reductor) como una función de absorción, y así se determina la ecuación que relaciona las dos cantidades.

Anexo C. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (AT)

Materiales:

- Vaso de precipitado de 100 mL.
- Probeta de 25 mL.
- Centrífuga.
- pH-metro.
- Agitador magnético.
- Plancha de agitador magnética.
- 2 balones esmerilados de fondo redondo o plano.
- Condensador.
- Plancha de calentamiento.
- 2 Buretas.
- Soporte de plancha.
- Soporte universal.
- Pinzas con nuez.
- Solución de NaOH al 0,1 N
- Solución de HCl al 0,1 N

Procedimiento:

1. Tomar una muestra aproximadamente de 40 mL en tubos falcon de 50 mL.
2. Centrifugar las muestras por 30 minutos a 5000 rpm.
3. Llevar el sobrenadante a frascos plásticos, medir pH y registrar valor.
4. Medir 5 mL del sobrenadante y llevarlo a un vaso de precipitado de 100 mL.
5. Medir en una probeta 25 mL de agua destilada y agregarla a los 5 mL de sobrenadante.

6. Titular con una solución previamente preparada de HCl 0,1 N hasta alcanzar un pH de 3 y registrar volumen (V1), manteniendo agitación continua.
7. Llevar la muestra a un balón esmerilado, adaptarlo al condensador.
8. Calentar hasta ebullición y mantener por 2 minutos.
9. Titular con una solución previamente preparada de NaOH 0,1 N hasta alcanzar un pH de 6,5 y registrar volumen (V2).

Cálculos

$$\text{Alcalinidad} = \frac{V1 * N_{HCl} * 50000}{5} \left[\frac{mg}{L} \right]$$

$$AGV = \frac{V2 * N_{NaOH} * 60000}{5} \left[\frac{mg}{L} \right]$$

N_{HCl} = Concentración de ácido clorhídrico (Normalidad).

N_{NaOH} = Concentración hidróxido de sodio (Normalidad).

V1 = Volúmen de HCL para llevar la muestra a pH 3 (mL).

V2 = Volúmen de NaOH para llevar la muestra a pH 6,5 (mL).

Anexo D. Determinación de sólidos totales fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas.

Este método se aplica a la determinación de sólidos totales y fracciones volátiles en muestras sólidas y semisólidas como lodos aislados en procesos de tratamientos de aguas limpias y residuales entre otros.

Materiales:

- Placas de evaporación.
- Horno de mufla para operar a $550 \pm 50^\circ\text{C}$.
- Horno de secado operaciones $103-105^\circ\text{C}$.
- Balanza de análisis.
- Desecador provisto de un descante que contiene un indicador colorimétrico de concentración de humedad.
- Crisoles.

Procedimiento:

1. Pesar un crisol (P1), previamente secado (1 día en el horno de secado).
2. Tomar una muestra de 40 mL en el crisol.
3. Trasladar la muestra al horno de secado por 24 horas. Después durante 10 minutos dejar la muestra en el desecador para equilibrar la temperatura y pesar (P2).
4. Incinerar la muestra en un horno de mufla a 550°C durante una hora.
5. Dejar en el desecador por 10 minutos y pesar (P3).

Cálculos:

$$\text{Sólidos Totales} = \frac{(P2-P1)}{V} \left[\frac{g}{L} \right]$$

$$\text{Sólidos Volátiles} = \frac{(P3-P1)}{V} \left[\frac{g}{L} \right]$$

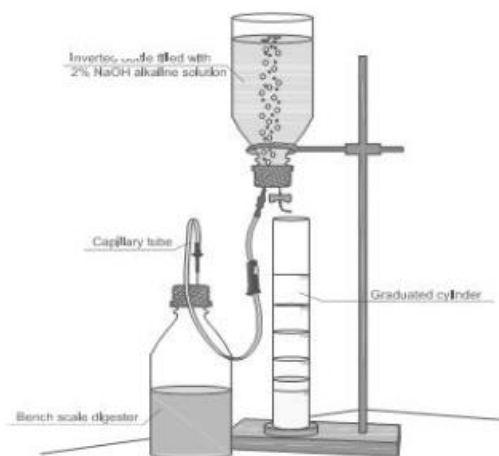
Anexo E. Método de desplazamiento alcalino

Materiales:

- Biodigestor anaerobio.
- Solución 0,1 N NaOH.
- Fenolftaleína.
- Mangueras y agujas.
- Probeta.

Procedimiento:

Cada reactor se conecta con la botella de desplazamiento alcalino por medio de una red de mangueras de plástico y agujas como se muestra en el esquema. El biogás producido en el reactor se burbujea en la solución alcalina con fenolftaleína como indicador y pH mayor que 12, en el cual el CO_2 es absorbido y el volumen de gas metano desplaza un volumen igual de la solución alcalina. El volumen de la solución desplazada fuera de la botella en la probeta es equivalente al volumen de metano y otros gases en menor proporción generados por el sistema.



Esquema de montaje para la medición de metano

Cálculo del volumen de biogás a condiciones normalizadas (VNTP).

Para poder comparar las producciones de biogás y por lo tanto el rendimiento, es necesario llevar el volumen de biogás a condiciones normalizadas.

$$VNTP = V \frac{(P_{atm} - P_v) * T_0}{P_0 * T}$$

V = Volumen de gas generado (mL)

P_{atm} = Presión atmosférica

T_0 = Temperatura estándar 273,15 K

P_0 = Presión estándar 1013.25 (mbar)

P_v = Presión de vapor del agua

$$P_v = 10 * e^{\left(16.573 - \frac{3988.842}{T(K) - 3947}\right)}$$

T = Temperatura al momento de medir (K).

Anexo F. Determinación del N-Amoniacal

Materiales:

- Vaso de precipitado de 100 mL.
- Centrífuga.
- Electrodo selectivo de amoniacal.
- Agitador magnético.
- Plancha de agitación magnética.
- Solución ISA (hidróxido de sodio- Etanol).

Procedimiento:

Con anterioridad se debe verificar el equipo y realizar la curva de calibración, de acuerdo al manual.

1. Tomar una muestra aproximadamente de 25 mL en tubos falcom de 50 mL.
2. Centrifugar las muestras por 30 minutos a 5000 rpm.
3. Llevar el sobrenadante a un tubo falcom.
4. Medir 20 mL del sobrenadante y llevarlos a un vaso de precipitado de 100 mL.
5. Agregar 4 mL de la solución ISA; agitar continuamente.
6. Sumergir el electrodo en la muestra por 3 minutos para obtener lecturas estables.

Curva de calibración

Preparar soluciones de 1, 10, 100, 1000 mg/l de NH_4Cl . Disponer del equipo en modo calibración. Medir 25 ml de las soluciones y agregar a cada una 3 ml de ISA; agitación continua. Sumergir el electrodo en el nivel de concentración más baja. Medir la concentración de N- Amoniacal, para cada concentración. El equipo asocia un mV para cada concentración y realiza la curva.

Anexo G. Registro fotográfico



Recolección de la muestra
afluente del reactor UASB



Recolección de la muestra
efluente del reactor UASB



Recolección de la muestra lodo
saliente del reactor UASB



Reactor *UASB* de la PTLX