

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA BIOLÓGICO  
U.A.S.B. A NIVEL PILOTO DE LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO  
DE LOS LIXIVIADOS PRODUCIDOS EN EL RELLENO SANITARIO DEL  
MUNICIPIO DE SAN GIL**

**JOSE LUIS DELGADO AYALA  
JULIAN ALBERTO OTERO FLOREZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2008**

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA BIOLÓGICO  
U.A.S.B. A NIVEL PILOTO DE LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO  
DE LOS LIXIVIADOS PRODUCIDOS EN EL RELLENO SANITARIO DEL  
MUNICIPIO DE SAN GIL**

**JOSE LUIS DELGADO AYALA  
JULIAN ALBERTO OTERO FLOREZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
Ingeniero Químico**

**Director  
Ing. LIGIA PATRICIA ARENAS BELTRAN  
Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2008**

*Doy gracias a Dios y a mi familia por darme la oportunidad de alcanzar esta meta tan importante en el camino que elegí para mi vida. A mis padres y mis hermanos gracias por su cariño, amor y comprensión, que hicieron posible que el sueño sea realidad.*

*A Yineth, quien compartió a mi lado este sueño y quien recorrió conmigo este camino, gracias por tu amor, cariño y comprensión y por ser esa persona que hace latir mi corazón con más fuerza, gracias por creer en mí.*

*A mis amigos y compañeros de estudio, gracias por compartir las alegrías y los triunfos alcanzados, así como por el apoyo brindado en los momentos difíciles que hacen parte de toda vida Universitaria.*

*Gracias por creer en mí.*

***Julián Alberto Otero Flórez***

*Dedico este logro a Dios y a la virgen, por toda la sabiduría y el amor que me brindaron para desarrollar mi proyecto de grado.*

*Por el amor, la fortaleza, confianza y apoyo moral, dedico esta meta cumplida a mis padres, hermanos y demás familiares; personas que siempre estuvieron pendientes de mí brindándome pensamientos y oraciones de ánimo.*

*Y Por supuesto a mis amigos por todo el acompañamiento y las alegrías que me dieron durante el desarrollo de todos mis estudios muchas gracias.*

***José Luis Delgado Ayala***

## **AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto fue posible gracias al apoyo económico y del laboratorio de la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de San Gil ACUASAN E.I.C.E-E.S.P. y a todo su personal.

A la Universidad Industrial de Santander, por su formación integral, ética y profesional.

Al Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales CEIAM-UIS

A la Ingeniera Ligia Patricia Arenas Beltrán, por la dirección y orientación durante el desarrollo de esta investigación.

Al Ingeniero José Luis Velázquez Murillo, por su orientación y apoyo en el laboratorio de ACUASAN.

A todas aquellas personas que nos brindaron su apoyo y confianza para llevar a cabo esta investigación.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
1.INTRODUCCIÓN	1
2.DESARROLLO EXPERIMENTAL	10
2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE REACTORES U.A.S.B.	10
2.2 FORMA DE LOS REACTORES [12]	12
2.3 DISEÑO DE LOS REACTORES [12]	12
2.4 SEPARADOR GAS-SÓLIDO-LIQUIDO-(GSL)	14
2.5 OPERACIÓN DEL SISTEMA DE REACTORES U.A.S.B.	16
2.6 PARÁMETROS EVALUADOS	17
2.7 ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA	17
3.EVALUACIÓN DE RESULTADOS	19
3.1 CAUDAL Y TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH)	19
3.2 CARGA ORGÁNICA Y EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE DQO	20
3.3 COMPORTAMIENTO Y REMOCIONES DE DQO Y DBO5	22
3.4 COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN AGV/ALCALINIDAD	25
3.5 COMPORTAMIENTO DEL pH	27
3.6 SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV)	27
CONCLUSIONES	30
RECOMENDACIONES	32
BIBLIOGRAFÍA	33
ANEXOS	35

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura [1] Degradación biológica de la materia orgánica	3
Figura [2] Principales etapas de digestión anaerobia y grupos bacterianos involucrados	3
Figura [3]. Esquema de un reactor UASB.	4
Figura [4]. Diseño del Reactor U.A.S.B.	16
Figura [5]. Variación del caudal del sistema.	19
Figura [6]. Tiempo de Retención Hidráulico.	20
Figura [7]. Carga Orgánica y Remoción de DQO	21
Figura [8]. Comportamiento de DQO	22
Figura [9]. Remoción de DQO	23
Figura [10]. Comportamiento de DBO	24
Figura [11]. Remoción de DBO	25
Figura [12]. Relación AGV/Alcalinidad	26
Figura [13]. Comportamiento del pH	27
Figura [14]. Vista de Lodos al final de la etapa de operación	28

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla [1]. Criterios de Diseño	12
Tabla [2]. Condiciones Iniciales del Sistema	17
Tabla [3]. Sólidos Suspendidos Volátiles	28

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A.	36
RELLENO SANITARIO DE SAN GIL “EL CUCHARO”	36
ANEXO B.	39
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL LIXIVIADO GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO DE SAN GIL “EL CUCHARO”.	39
ANEXO C.	41
MICROBIOLOGÍA DE LA DIGESTION ANAEROBIA [5]	41
ANEXO D.	49
INSTALACIÓN FINAL DEL SISTEMA DE REACTORES EN PARALELO	49
Instalación del sistema	49
Sistema de alimentación	50
ANEXO E.	52
MÉTODOS Y FRECUENCIAS DE LOS ANÁLISIS Y SEGUIMIENTO DE LOS PARAMETROS DURANTE LA	52
OPERACIÓN DE LOS REACTORES UASB	52
Métodos y Frecuencia de los Análisis Físicos y Químicos para el monitoreo del sistema UASB	52

## RESUMEN

**TITULO:** DISEÑO, CONSTRUCCION Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA BIOLÓGICO U.A.S.B. A NIVEL PILOTO DE LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS PRODUCIDOS EN EL RELLENO SANITARIO DEL MUNICIPIO DE SAN GIL.\*

**AUTORES:** DELGADO AYALA, José Luis  
OTERO FLOREZ, Julián Alberto\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Lixiviado, Digestión Anaerobia, Reactor U.A.S.B., Inoculo

### CONTENIDO

El objetivo de este trabajo fue evaluar la aplicación de la tecnología anaerobia mediante reactores U.A.S.B. (Upflow Anaerobic Sludge Blanquet) a escala piloto de laboratorio para la degradación biológica de los lixiviados producidos en el relleno sanitario del municipio de San Gil. En la primera etapa del proyecto se realizó el diseño, construcción e instalación de dos reactores U.A.S.B. en paralelo, con iguales parámetros de diseño, cuyo volumen específico de cada reactor fue 27,36 litros. Después, se realizó la inoculación de los reactores con dos lodos anaerobios diferentes en cada reactor. El reactor **R-1** se inoculó con 13.9 litros de lodo de sedimento, proveniente de las piscinas sedimentadoras de la empresa de acueducto de San Gil ACUASAN. El reactor **R-2** se inoculó con 13.9 litros de lodo proveniente de un reactor U.A.S.B. de la PTAR Río Frío del municipio de Floridablanca. Lo anterior se realizó con el fin de evaluar la eficiencia de cada lodo y seleccionar el inoculo más adecuado para la degradación biológica de los lixiviados. En la etapa de arranque y puesta en marcha del sistema se disminuyó lentamente el TRH pasando de 1.1 d a 0.85 d, obteniendo valores de remoción para **R-1** de 65% en DQO y 68% en DBO y para **R-2** de 70% en DQO y 72% en DBO, lo cual indica una mayor eficiencia del inoculo de R-2 sobre el inoculo de R-1 a las variaciones de concentración que se presentaron.

---

\* Proyecto De grado

\*\* Facultad De Ingenierías Físico-Químicas, Escuela De Ingeniería Química, Director, Ing. Ligia Patricia Arenas Beltran.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATION OF A BIOLOGIC SISTEM U.A.S.B. ON PILOT SCALE LABORATORY FOR THE TREATMENT OF THE PRODUCED LEACHED IN THE SANITARY FILLING OF THE SAN GIL CITY.

**AUTHORS:** DELGADO AYALA, José Luis  
OTERO FLOREZ, Julián Alberto\*\*

**KEY WORDS:** Leached, Anaerobic, Reactor U.A.S.B., mud.

## CONTENT

The objective of this work was to evaluate the application of the anaerobic technology by means of Reactors U.A.S.B. (Upflow Anaerobic Sludge Blanquet) on pilot scale laboratory for the biological degradation of the produced leached ones in the sanitary filling of the municipality of San Gil. In the first stage of the project was realized the design, construction and installation of two reactors U.A.S.B. in parallel, with equal parameters of design. The specific volume of each reactor was 27,36 liters. Later was realized the inoculation of the reactors with two different muds of anaerobic mud in each reactor. The R-1 reactor was inoculate with 13,9 liters of sediment's mud that comes from the sedimentator swimming pools of the aqueduct company of San Gil; it calls ACUASAN. The R-2 reactor was inoculate with 13,9 liters of mud that comes from a reactor U.A.S.B. of the Rio Frio's PTAR of the municipality of Floridablanca. The previous thing was realized with the purpose of to evaluate the efficiency of each mud and to select the most suitable mud for the biological degradation of the leached ones. In the starting and beginning stage of the system was diminished the TRH and TRH changed from 1,1 d to 0,85 d obtaining values of removal: 65% for R-1 in DQO and 68% in DBO; 70% for R-2 in DQO and 72% in DBO; it indicates that R-2's mud is more effective than R-1's mud with the variations in the concentration that they showed.

---

\* Grade project

\*\* Ability Of Physical-chemical Engineerings, School Of Chemical Engineering, Director, Engineer Ligia Patricia Arenas Beltran.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de municipios y ciudades colombianas, el acelerado crecimiento demográfico ocasiona un incremento en la demanda de servicios de limpieza, así como la generación de elevadas cantidades de residuos sólidos. Para la disposición final de estos, actualmente se utiliza el denominado relleno sanitario, el cual es un sitio previamente seleccionado para enterrar los residuos generados, evitando así la dispersión y la generación de focos de infección; siendo esta con frecuencia, la alternativa más económica a pesar de la clara conciencia de que las prioridades las fijan las tres R (Reducción, Reuso y Reciclaje en ese orden) [1]. (En el Anexo A se describe el relleno sanitario del municipio de San Gil).

Una vez se han enterrado los residuos es necesario minimizar los impactos de esta práctica. Todos aquellos líquidos que han entrado en contacto con los desechos de rellenos sanitarios, producto de la disolución de uno o más compuestos de los residuos sólidos en contacto con el agua se denominan lixiviados. De no recogerse adecuadamente y luego tratarse, este lixiviado puede contaminar aguas subterráneas, aguas superficiales y suelos. El lixiviado es considerado como el principal y gran contaminante de un relleno sanitario; principalmente por sus elevadas concentraciones de productos tóxicos como metales pesados, compuestos organoclorados y por cargas orgánicas representadas en parámetros de DQO en un rango de 10.000 a 30.000 mg/l, valor que depende del tipo de residuo depositado y de el tiempo de permanencia del residuo [2].

En la producción de lixiviados influyen reacciones fisicoquímicas (solubilización, precipitación, oxido-reducción, intercambio iónico de gases de algunos materiales contaminantes) y reacciones de degradación biológica de

materiales suspendidos y disueltos que, según las condiciones del medio, pueden ser aerobias o anaerobias. En la degradación aerobia, se aprovecha la presencia del oxígeno que se encuentra en los espacios vacíos (intersticios) en las capas superiores de las pilas que están en mayor contacto con el aire; sin embargo, cuando la altura de las capas de desecho se incrementa, la transformación por vía anaerobia prevalece.

Los compuestos orgánicos presentes en los lixiviados son: proteínas, carbohidratos, compuestos hidroxiaromáticos, alcoholes, y principalmente los ácidos grasos volátiles (AGV); adicionalmente, los lixiviados contienen gran cantidad de nitrógeno amoniacal [3]. En el Anexo 2 se presentan las características fisicoquímicas y microbiológicas del lixiviado del Relleno sanitario del Municipio de San Gil.

La tecnología U.A.S.B. proveniente de Bélgica y Holanda fue desarrollada por Lettinga y sus colaboradores en los años 70, es aplicada especialmente al tratamiento de sustratos con alto contenido de materia orgánica [4].

La operación de los reactores U.A.S.B. se basa en la actividad autorregulada de diferentes grupos de bacterias que degradan la materia orgánica convirtiéndola en metano y dióxido de carbono (figura [1]); formando un lodo o barro biológicamente activo en el reactor. Dichos grupos bacterianos establecen entre sí relaciones simbióticas de alta eficiencia metabólica bajo la forma de gránulos cuya densidad les permite sedimentar en el reactor. La formación de metano y dióxido de carbono corresponde a la última etapa del proceso de digestión anaerobia [5].



Figura [1] Degradación biológica de la materia orgánica

Las diferentes etapas del proceso de digestión anaerobia, así como los grupos bacterianos que intervienen se observan en la figura [2].

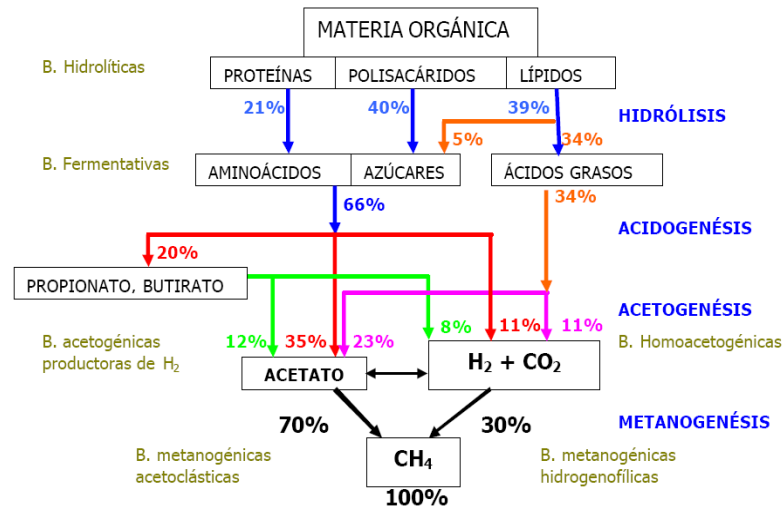
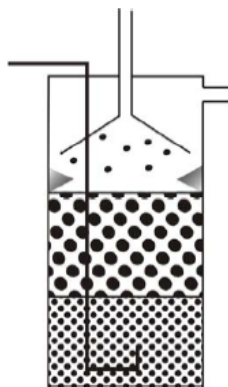


Figura [2] Principales etapas de digestión anaerobia y grupos bacterianos involucrados

Los reactores U.A.S.B logran eficiencias de remoción comprendidas entre el 60 y 80% de la DQO y la DBO<sub>5</sub> en función de la concentración inicial del sustrato; estos funcionan como tratamiento primario o tratamiento secundario, pero no llegan a eficiencias de remoción superiores al 82%. Para lograrlo, deben ser complementados por sistemas aerobios tradicionales como lodos activados, filtros percoladores o lagunas. El tratamiento anaerobio se recomienda para el lixiviado con una relación de DBO<sub>5</sub>/DQO entre 0,7 y 0,3 (Residuos parcialmente estabilizados) [6].

El afluente es alimentado por el fondo del reactor, donde se pone en contacto con el lodo; la degradación anaerobia del sustrato ocurre en el lecho del lodo, y allí se produce el biogás, es decir, tanto la acidificación como la metanogénesis ocurren en el mismo reactor. El flujo combinado ascendente del sustrato, puede hacer que algunos de los sólidos del lodo lleguen a la parte superior del reactor, donde un separador gas-sólido-líquido, impide la salida de los sólidos del reactor separándolos del gas producido y del efluente líquido. El biogás es captado bajo una campana y conducido hacia la superficie del reactor. Algunos sólidos son arrastrados con el agua hacia el sedimentador, allí sedimentan y retornan al manto de lodos, el efluente cae a un canal situado en la parte superior del reactor, donde es descargado [4].

La biomasa activa puede estar en forma de gránulos compactos o en forma de lodos floculentos con buena sedimentabilidad lo cual convierte en su característica principal la retención de la biomasa sin necesidad de soporte [7].Figura [3].



**Figura [3]. Esquema de un reactor UASB.**

Las principales ventajas que ofrece el reactor U.A.S.B. frente a los demás sistemas de tratamiento biológico (sistemas aerobios, humedales artificiales) son los bajos requerimientos nutricionales del lodo, ya que pueden manejar cargas orgánicas muy variables y se conservan sin alimentación por largo tiempo, además, los costos de inversión y operación son bajos y la

producción de metano como un producto del proceso puede ser aprovechable.

El largo tiempo de arranque, el pulimento posterior de su efluente, la generación de malos olores y la inhibición de las bacterias anaeróbicas por un gran número de compuestos, son las desventajas que presenta este sistema [7]. La operación del reactor está basada en el monitoreo de varios parámetros. Estos parámetros están relacionados con el sustrato a alimentar, el lodo, el reactor y el contacto del sustrato con el lodo. Los parámetros más importantes a evaluar en la operación de reactores U.A.S.B. son:

#### *TEMPERATURA*

La temperatura es una de las variables que más influyen en el proceso, cuya eficacia decrece por debajo de 15°C ya que la depuración se debe fundamentalmente a la sedimentación, mientras que por encima de 15 °C la biodegradación se incrementa. La temperatura afecta la actividad de los microorganismos, determina la cantidad de energía neta producida e influye en la relación pH-alcalinidad.

#### *PH*

El valor y estabilidad del pH en el reactor anaerobio es muy importante, por que la actividad metanogénica es altamente vulnerable a los cambios de pH comparada con las demás poblaciones presentes: si el pH esta por debajo de 6,3 o por encima de 8,6 la metanogénesis disminuye significativamente. A bajos valores de pH la fermentación ácida prevalece sobre la fermentación metanogénica, resultando en la acidificación del contenido del reactor.

## DBO<sub>5</sub>

Es una prueba analítica que permite determinar el contenido de materia orgánica biodegradable en una muestra de aguas residuales midiendo el consumo de oxígeno por una población microbiana heterogénea (durante 5 días generalmente), a una temperatura de incubación de 20 °C y en presencia de nutrientes.

La importancia de esta prueba radica en que es un parámetro ambiental que da una medida del grado de contaminación por compuestos orgánicos. Medida en el afluente y efluente del reactor permite calcular la remoción de materia orgánica.

## DQO

Es una medida de la materia orgánica en la muestra, equivale a la cantidad de oxígeno que se puede oxidar químicamente en un medio ácido. Puede relacionarse con la DBO<sub>5</sub>. La oxidación se realiza con un agente oxidante fuerte en un medio ácido. Tiene la misma importancia que la DBO<sub>5</sub>.

## ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES (AGV)

Son la mayoría de los productos intermedios de la digestión anaeróbica del material degradable a metano: ácidos acético, propiónico, butírico y valérico. Se mide en mg Ac. Acético/L.

La concentración de AGV en el efluente debe ser muy baja y debe mantenerse así, ya que los incrementos de éstos por encima de la capacidad buffer del sistema tienen un efecto inhibitorio de los compuestos intermedios que se produce en función de su grado de ionización.

La actividad metanogénica está, así mismo, relacionada con la capacidad de tiempo que el lodo tiene para adaptarse a los AGV del sustrato usado. Los AGV son degradados por bacterias acetogénicas hasta ácido acético, que constituye el mayor sustrato de las bacterias metanogénicas.

### *ALCALINIDAD*

Cuantifica la capacidad del sustrato para neutralizar ácidos. Se mide en mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ . Es debida principalmente a la presencia de iones bicarbonato, carbonato e hidroxilo. Se ha demostrado que cuando la relación entre AGV y la alcalinidad del medio supera 0,4 es indicador de fallo inminente en el sistema de digestión anaerobia [8].

### *SÓLIDOS*

El material suspendido o disuelto presente en el agua residual se denomina “sólidos”, y en el se pueden distinguir tres categorías: sólidos totales, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales. En cada una de estas tres categorías también se hace diferencia entre los sólidos fijos y los sólidos volátiles: los primeros son sólidos que aparecen después de incinerar la muestra, mientras que los segundos son los sólidos oxidados o volatilizados al incinerar la muestra.

La determinación de los sólidos es una prueba indispensable para la operación de reactores biológicos, que junto con otros parámetros, proporciona información de la eficiencia de remoción del proceso, e indirectamente, de la concentración de biomasa bacteriana en el reactor. [9]

Existen varios antecedentes de tratamiento anaerobio de lixiviados, que van desde experiencias a escala laboratorio a experiencias a escala real, donde el sistema de mayor difusión es el reactor U.A.S.B. el cual ha reportado muy buenos resultados.

Agudelo [10] evaluó reactores UASB y filtros anaerobios (FAFA) a escala laboratorio. En el primero se manejaron Cargas Orgánicas entre 1 y 25 KgDQO/m<sup>3</sup>/día, Tiempos de Retención Hidráulico (TRH) entre 3 y 5 días y se alcanzaron eficiencias de remoción de DQO entre el 30 y 90%. El lodo usado tenía una Actividad Metanogénica Específica (AME) entre 0.08 y 0.20 KgDQO/m<sup>3</sup>/día. En el filtro anaerobio (FAFA), el inóculo estaba aclimatado al sustrato, y el arranque duró 9 meses, aplicándose concentraciones de DQO hasta de 15.500 mg/l con TRH entre 5h y 1 día con recirculación continua. Se alcanzaron eficiencias de remoción en DQO de 90%.

Berrueta y Castrillon [3] evaluaron reactores de flujo discontinuo, y posteriormente un reactor UASB de flujo continuo, con lo cual consiguieron reducciones de la DQO del orden de 90 a 95%. Dadas las características alcalinas del lixiviado, fue necesario controlar el pH en un valor de pH cercano a 7 con la adición de un ácido. El efluente obtenido presentó concentraciones de DQO alrededor de 1.200 mg/l, lo que indica la necesidad de complementar el tratamiento con otro proceso.

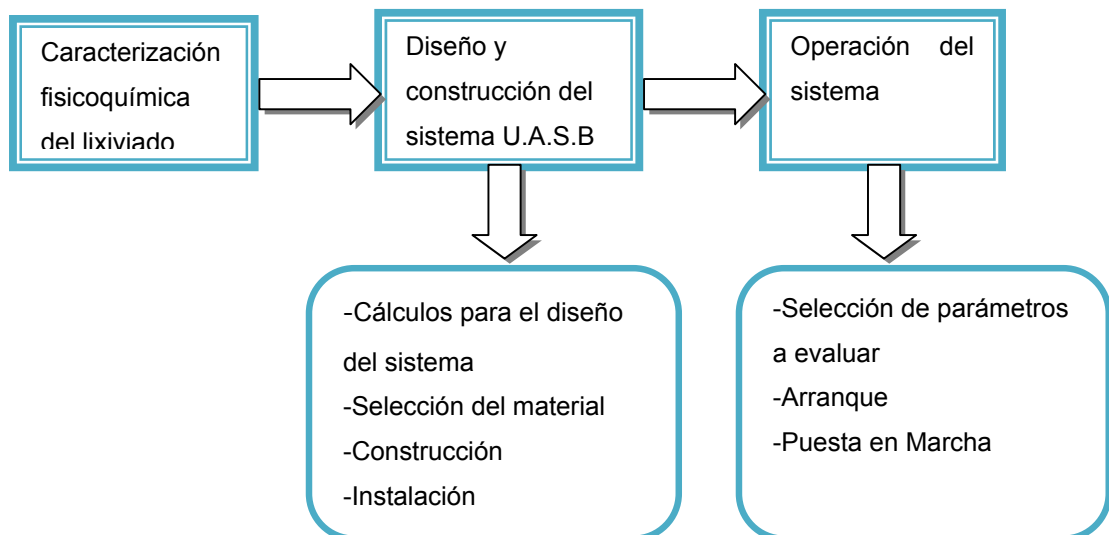
Torres *et al.* [11] realizaron estudios de tratabilidad biológica tanto aerobia como anaerobia de los lixiviados de un vertedero de RSU de 6 años de existencia de un municipio de 230.000 habitantes. El lixiviado presentó dos características: altas concentraciones de DQO (11.000 mg/l) en período seco y concentraciones menores (3.000 mg/l) en el período lluvioso. Los resultados obtenidos demostraron la viabilidad del tratamiento del lixiviado

tanto en condiciones aerobias como anaerobias, alcanzándose eficiencias de remoción de DQO cercanas al 90%.

Para encontrar y desarrollar una tecnología adecuada en el tratamiento de los lixiviados producidos en el relleno sanitario de San Gil, se tomo como objeto de estudio un sistema biológico anaerobio. Con este fin se realizaron el diseño, la construcción y la instalación de dos reactores U.A.S.B. (reactor de manto de lodos de flujo ascendente) a nivel piloto de laboratorio, además de un seguimiento en la etapa de arranque y puesta en marcha de los reactores.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo del proyecto se inicio con la caracterización fisicoquímica del lixiviado producido en el relleno sanitario de San Gil (Anexo 2), posteriormente se realizo el diseño y construcción del sistema de reactores U.A.S.B. y finalmente se operó.



### 2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE REACTORES U.A.S.B.

Para el diseño y la construcción de los reactores U.A.S.B a nivel piloto de laboratorio, se tuvo en cuenta las referencias bibliograficas y además, las recomendaciones de personas que han trabajado en esta área y tienen un amplio conocimiento y experiencia al respecto. El diseño y la construcción del sistema de reactores se realizó tomando en cuenta los siguientes aspectos:

El sistema consta de dos reactores U.A.S.B operados en paralelo, presentando iguales parámetros de diseño. Cada reactor operando con un inóculo diferente y alimentados con la misma carga orgánica. Lo anterior se realizó con el fin de evaluar la eficiencia de cada lodo y seleccionar el inóculo más adecuado para la degradación biológica de los lixiviados.

El tiempo de retención hidráulico de diseño (TRH)<sub>d</sub> para cada reactor se tomó inicialmente de un día, tomando en cuenta las recomendaciones de la literatura para operación de reactores U.A.S.B a nivel piloto y se fue disminuyendo de acuerdo con la operación de los reactores.

El caudal de diseño se determinó teniendo en cuenta que el sistema de flujo se realizó por gravedad. El sistema de flujo por gravedad fue controlado manualmente por la disposición de una válvula tipo cortina en cada reactor. De esta manera se estableció un caudal mínimo de operación de 19 ml/min, que fue aumentado con el tiempo de operación.

Teniendo en cuenta que la concentración del lixiviado es tan variable, se tomó como base de cálculo para el diseño 6 Kg DQO/m<sup>3</sup>·d, basado en datos experimentales que se obtuvieron de la caracterización fisicoquímica de los lixiviados, que se realizó al iniciar el proyecto (Anexo 2), con la colaboración de la empresa de acueducto y aseo de San Gil ACUASAN E.I.C.E – E.S.P.

Los equipos fueron construidos en material novafort, ya que este material presenta buena resistencia a la corrosión por CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, así como resistencia al ataque que ocasiona el biogás al estar en contacto con el oxígeno atmosférico y formarse H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, sobre todo en la parte superior del reactor. Este material también es utilizado en la tubería que recoge los lixiviados de las fosas del relleno sanitario, así como en las chimeneas de dichas fosas para el escape de gas. La tubería y los accesorios utilizados

para el sistema de flujo por gravedad fue en Policloruro de vinilo (PVC) de 1 pulgada y las válvulas tipo cortina en bronce. La instalación final del sistema se describe en el Anexo 4.

## 2.2 FORMA DE LOS REACTORES [12]

Los reactores U.A.S.B. piloto se pueden construir de forma cilíndrica o rectangular. Para este diseño se escogió la forma cilíndrica por presentar ventajas hidrodinámicas sobre la forma rectangular, por ejemplo la menor posibilidad de formación de zonas muertas, además de las ventajas en la construcción, el tamaño y el volumen que se propuso manejar.

## 2.3 DISEÑO DE LOS REACTORES [12]

El diseño de los reactores se realizó basado en el método descrito en la bibliografía como “Calculo basado en la carga orgánica y en el criterio de velocidad de flujo.”

Para la determinación de la velocidad de flujo ascendente como uno de los parámetros de diseño, se partió de variables conocidas tales como: Área y volumen del reactor a partir del diámetro y la altura efectiva, carga típica máxima de diseño y concentración promedio de lixiviado. Con estos datos se realizó el diseño de una manera satisfactoria, así:

**Tabla [1]. Criterios de Diseño**

<b>Parámetros de Diseño: Variables conocidas</b>			
<b>Diámetro de la tubería (cm)</b>	<b>Caudal mínimo (ml/min)</b>	<b>Carga (KgDQO/m<sup>3</sup>*d)</b>	<b>Tiempo de residencia (d)</b>
28.4	19	6	1

Volumen de reactor:

$$V_R = TRH * Q; \quad (\text{ec. 1})$$

$$V_R = 1 d * (19 \text{ ml} / \text{min}) * (1440 \text{ min} / d) = 27.360 \text{ ml};$$

Área del reactor:

$$A_R = \pi \frac{D^2}{4}; \quad (\text{ec. 2})$$

$$A_R = \pi \frac{(28.4)^2 (\text{cm}^2)}{4} = 633,47 \text{ cm}^2;$$

Altura efectiva del reactor:

$$L = \frac{4 * V_R}{\pi * D^2}; \quad (\text{ec. 3})$$

$$L = \frac{4 * 27360 \text{ cm}^3}{\pi * (28.4 \text{ cm})^2} = 43,2 \text{ cm};$$

Flujo másico:

$$F = V_R \cdot C \text{ arg } a; \quad (\text{ec. 4})$$

$$F = 0.02736 \text{ m}^3 \cdot 6 \frac{\text{KgDQO}}{\text{m}^3 d} = 0,164 \frac{\text{KgDQO}}{d}$$

Carga hidráulica:

$$C_H = \frac{Q}{A_R}; \quad (\text{ec. 5})$$

$$C_H = \frac{19 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}}{633.47 \text{ cm}^2} = 0,025 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

## 2.4 SEPARADOR GAS-SÓLIDO-LIQUIDO-(GSL)

Una de las partes mas importantes y críticas en el proceso de diseño de un reactor U.A.S.B. es la campana o separador GSL, el cual es fundamental para lograr un buen funcionamiento del reactor a fin de mantener un lodo sedimentable (en su mayoría granular), un efluente clarificado (libre de gases) y unos gases adecuadamente separados. Los objetivos que se quieren alcanzar con la implementación de las campanas para cada reactor son:

- Separación y descarga adecuadas del biogás en cada reactor.
- Servir como una clase de barrera (stopper) para expansiones excesivas rápidas del manto de lodos (en su mayoría), dentro del sedimentador.
- Prevenir el lavado (salida) de lodo granular flotante (y floculento)

Los parámetros básicos de diseño para las campanas fueron:

*Área de abertura:*

$$A_{ABERTURA} = \frac{Q}{V_F} ; \quad (\text{ec. 6})$$

$$A_{ABERTURA} = \frac{19 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}}{0.1 \frac{\text{cm}}{\text{min}}} = 190 \text{ cm}^2$$

*Área de sección transversal de la campana:*

$$A_{CAMPANA} = A_R - A_{ABERTURA} = \pi R_C^2 ; \quad (\text{ec. 7})$$

$$633.47 - 190 = \pi R_C^2 ;$$

$$R_C = 11,88 \text{ cm} ;$$

Donde  $R_c$  es el radio mayor de la campana. Por lo tanto:

$$A_{\text{CAMPANA}} = 443,47 \text{ cm}^2;$$

Ancho de la abertura:

$$W_A = 0,5 \text{ cm} \quad (\text{ec. 8})$$

Se asumieron para el diseño, tanto el ancho mínimo interno de la campana ( $H_T$ ) y la altura tope del separador GSL sobre la superficie del líquido iguales a 2 cm. Por lo tanto:

$$W_G = R_R - W_A - 0.5(H_T); \quad (\text{ec. 9})$$

$$W_G = 14,2 - 0,5 - 0.5(2) = 13,7 \text{ cm};$$

Angulo de inclinación de la campana ( $\alpha$ ): el ángulo elegido para la campana fue de  $60^\circ$  debido a que se acomodaba mejor a las condiciones de diseño.

Altura de la campana:

$$H_G = W_G \tan \alpha; \quad (\text{ec. 10})$$

$$H_G = 13,7 * \tan 60^\circ = 23,9 \text{ cm};$$

Traslapo:

$$T_V = 1.5(W_A); \quad (\text{ec. 11})$$

$$T_V = 1.5(0.5 \text{ cm}) = 0,75 \text{ cm};$$

Ancho de los deflectores:

$$W_D = T_V + W_A; \quad (\text{ec. 12})$$

$$W_D = 0,75 \text{ cm} + 0,5 \text{ cm} = 1,25 \text{ cm};$$

Longitud de los deflectores:

$$L_D = 2W_D \tan 45^\circ; \quad (\text{ec. 13})$$

$$L_D = 2,5 \text{ cm}$$

El diseño de los reactores quedó finalmente de la siguiente manera:

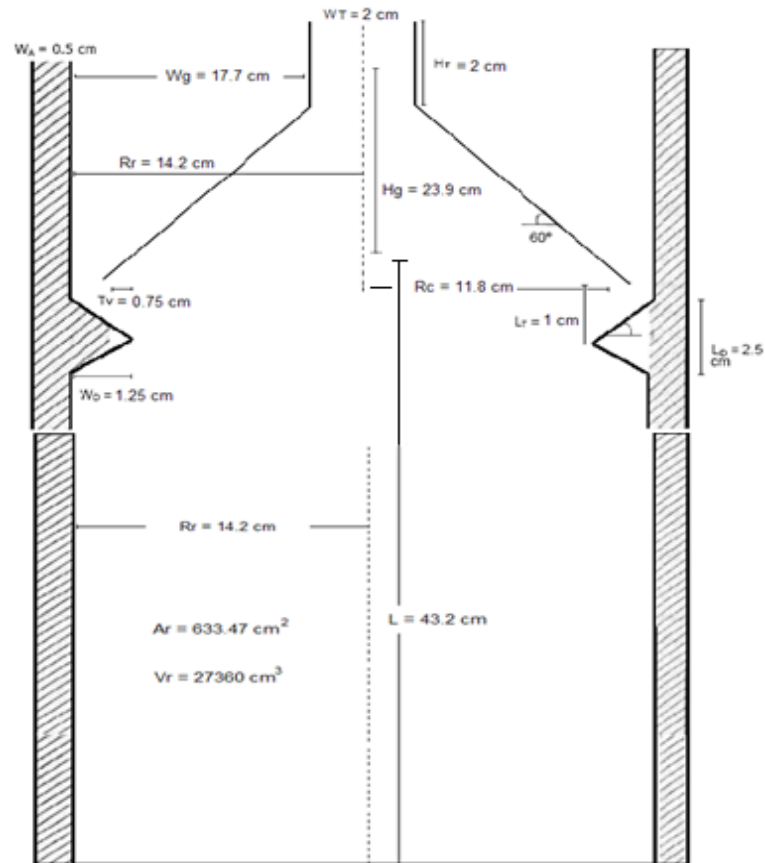


Figura [4]. Diseño del Reactor U.A.S.B.

## 2.5 OPERACIÓN DEL SISTEMA DE REACTORES U.A.S.B.

Durante 16 semanas comprendidas entre el 12 de junio y el 25 de septiembre de 2008, se realizó el estudio detallado de la etapa de operación (arranque y puesta en marcha) del sistema de reactores U.A.S.B. en paralelo; se programaron una serie de análisis fisicoquímicos para seguir el comportamiento del sistema, los cuales fueron realizados en el laboratorio de la empresa de acueducto y aseo de San Gil ACUASAN E.I.C.E – E.S.P.

## 2.6 PARÁMETROS EVALUADOS

Las valoraciones fueron realizadas generalmente, en el afluente y efluente de los reactores. Los parámetros valorados fueron: pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, Ácidos Grasos Volátiles, Alcalinidad total, Carga Orgánica Volumétrica, TRH, Caudal y Sólidos Suspendidos Volátiles, estos últimos se evaluaron en los inóculos. Los métodos analíticos y la frecuencia del monitoreo al sistema se describen en el Anexo 5.

*Las condiciones iniciales para la operación del sistema fueron las siguientes:*

Fecha de arranque: 12 junio 2008	Lodo	Volumen de lodo	DQO alimento	Carga orgánica	TRH	Caudal
R-1	Lodo de sedimento de los sedimentadores de ACUASAN	13,9 l	2.135 mg/l	2,13 KgDQO/m <sup>3</sup> *d	1,08 días	17,5 ml/min
R-2	Lodo de Reactor UASB de la PTAR Río Frío	13,9 l	2.135 mg/l	2,13 KgDQO/m <sup>3</sup> *d	1,10 días	17 ml/min

**Tabla [2]. Condiciones Iniciales del Sistema**

## 2.7 ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA

Durante la etapa de arranque, la carga orgánica se aumentó a medida que los inóculos de cada reactor mostraban señales de incremento de actividad (evaluando la relación AGV/ALK) y a medida que la eficiencia en la remoción de DQO aumentaba para cada reactor. De esta manera, para la etapa de arranque que se llevó a cabo desde el 12 de junio hasta el 21 de agosto, cuando la remoción de DQO superaba el 60% para ambos reactores, el sistema se alimentó haciendo las respectivas diluciones al lixiviado crudo que era traído del relleno sanitario de San Gil.

Luego de superada la etapa de arranque, el sistema se operó alimentado con el lixiviado crudo, es decir, sin ser diluido previamente. Durante esta etapa la carga orgánica se aplicó de acuerdo a la variabilidad que presentaban los lixiviados con el clima, ya que en épocas de lluvia el lixiviado presentaba concentraciones entre 4,5 y 4,8 Kg DQO/m<sup>3</sup>\*d mientras que en épocas secas el lixiviado presentó concentraciones superiores a 5 Kg DQO/m<sup>3</sup>\*d, durante este periodo las remociones fueron superiores al 60% para ambos reactores.

### 3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados del seguimiento durante la fase de arranque y puesta en marcha del sistema de reactores U.A.S.B.

#### 3.1 CAUDAL Y TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH)

Inicialmente se operó con caudales de 17,5 ml/min para R-1 y 17 ml/min para R-2 los cuales se aumentaron progresivamente con el tiempo de operación hasta alcanzar un valor máximo de 22,7 ml/min para R-1 y 22,9 ml/min para R-2. La diferencia de caudales entre ambos reactores no supero los 1,5 ml/min ya que siempre se procuro alimentar el sistema teniendo el mismo caudal para ambos reactores como se muestra en la figura [7], con el fin de mantener iguales las condiciones de operación.

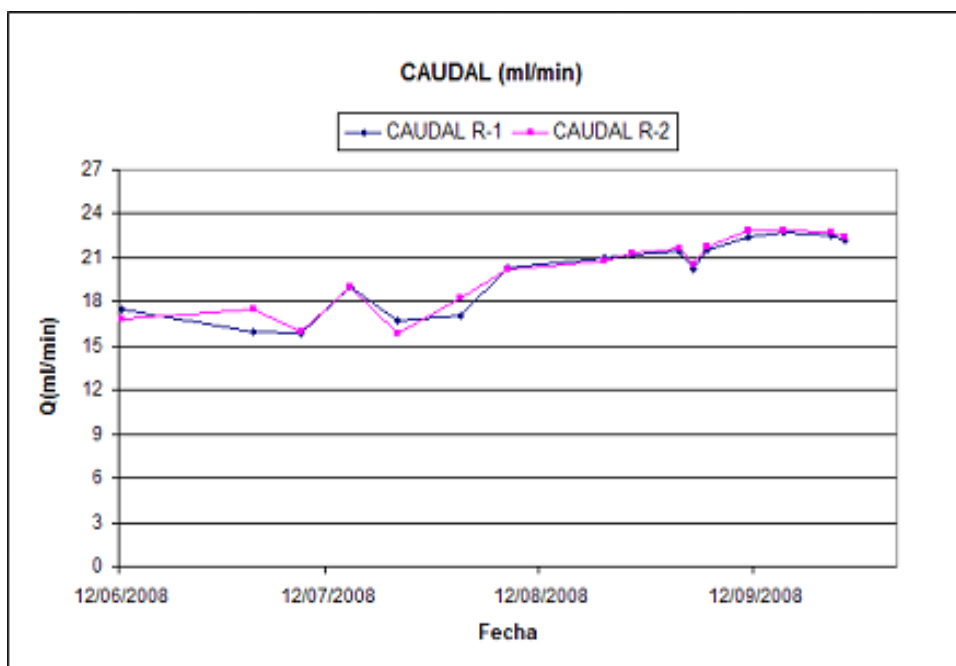
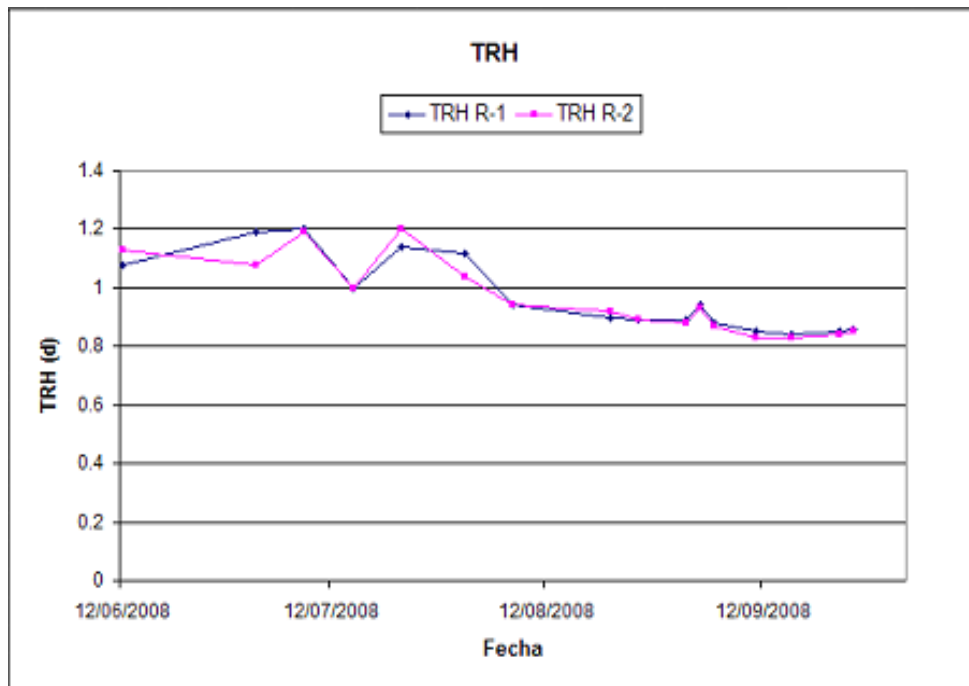


Figura [5]. Variación del caudal del sistema.

De igual forma al variar el caudal se presentaron variaciones en el tiempo de retención hidráulico como se observa en el siguiente gráfico:



**Figura [6]. Tiempo de Retención Hidráulico.**

A medida que el caudal aumenta, el tiempo de retención hidráulico disminuye con el tiempo de operación del sistema, llegando a un valor mínimo de 0,85 días tanto para R-1 como para R-2. Así se logró cumplir con el objetivo de disminuir el tiempo de Retención Hidráulico a medida que el sistema aumentaba la eficiencia en remoción y se aumentaba la carga orgánica.

### **3.2 CARGA ORGÁNICA Y EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE DQO**

Durante la etapa de arranque, el sistema de reactores se alimentó con cargas orgánicas partiendo de 2,13 Kg DQO/m<sup>3</sup>\*d hasta un valor de 4,3 Kg DQO/m<sup>3</sup>\*d, donde los reactores presentaron remociones superiores al 60 % en DQO como se resalta en la figura [9].

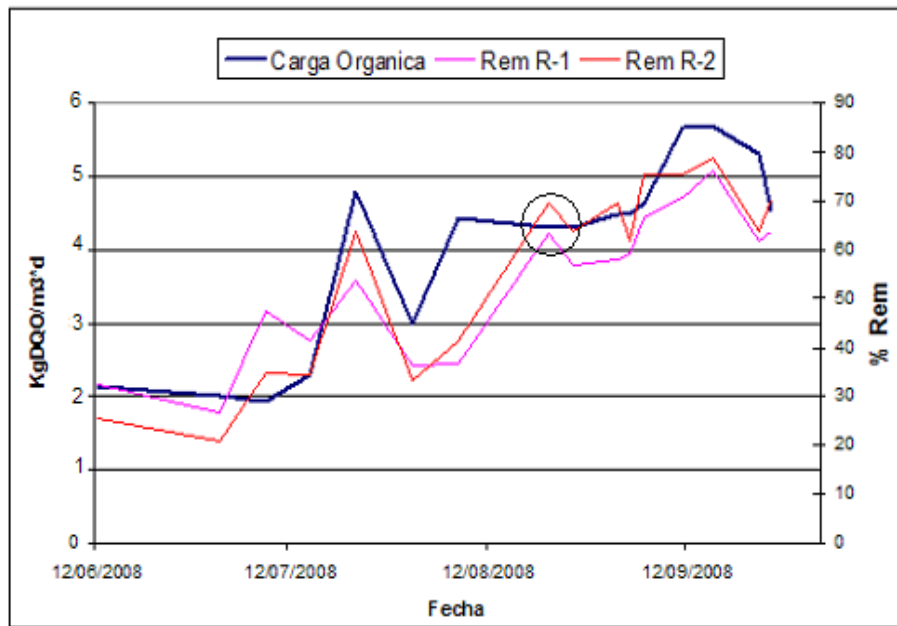


Figura [7]. Carga Orgánica y Remoción de DQO

Superada la etapa de arranque, el sistema operó con la máxima concentración de carga orgánica los días 11 y 16 de Septiembre, con un valor de 5,67 Kg DQO/m<sup>3</sup>\*d, además, se presentó la mayor eficiencia de remoción en ambos reactores con un 75,8% para el reactor **R-1** y un 79% para el reactor **R-2**.

Posteriormente, en las dos últimas semanas de operación se volvieron a presentar lluvias y por consiguiente la carga orgánica bajó al igual que la eficiencia en remoción pero se mantuvo por niveles sobre el 65 % para R-1 y sobre el 70% para R-2.

### 3.3 COMPORTAMIENTO Y REMOCIONES DE DQO Y DBO<sub>5</sub>

Durante la etapa de arranque y puesta en marcha del sistema, se incrementó la concentración de DQO de entrada a medida que el sistema presentaba mayores eficiencias de remoción y las concentraciones de DQO en la salida eran menores.

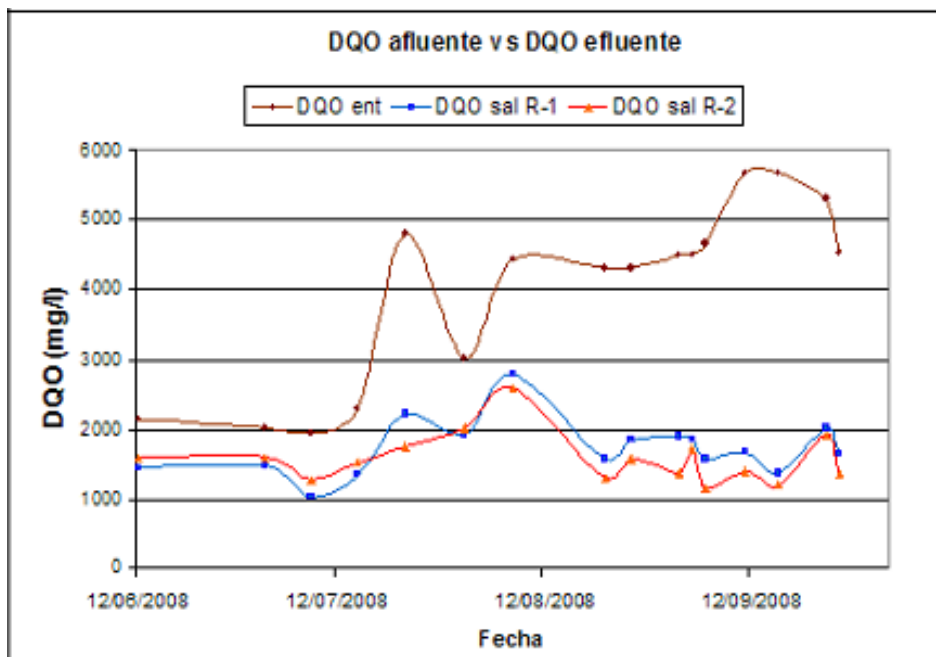


Figura [8]. Comportamiento de DQO

Los valores para la DQO de entrada varían entre 2.000 y 5.000 mg/l, presentándose los máximos valores en 5.670mg/l, mientras que la salida tiene la mayoría de valores de concentración por debajo de los 2.000 mg/l para ambos reactores, sin embargo el reactor R-2 presenta los valores más bajos de salida con valores por debajo de los 1.300 mg/l DQO presentados en el ultimo mes de operación con un valor mínimo de 1.150 mg/l DQO mientras que para el reactor R-1 el valor mínimo en la salida fue de 1.370 mg/l DQO el cual también se presentó en el ultimo mes de operación.

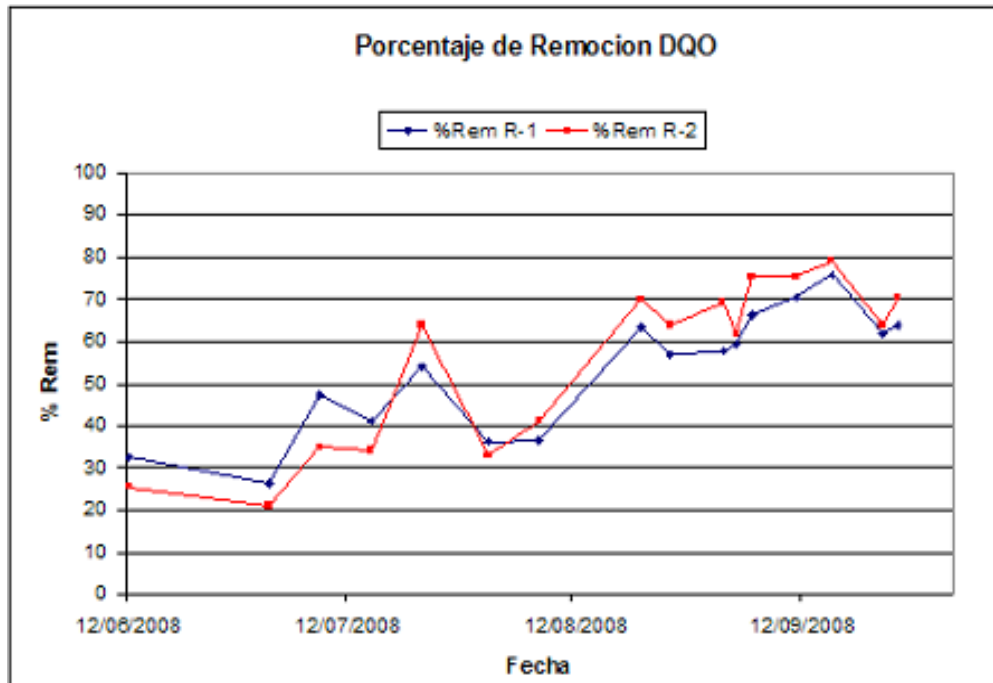


Figura [9]. Remoción de DQO

Lo anterior da como resultado eficiencias de remoción que aumentan desde la etapa de arranque con el 32% para R-1 y el 26 % para R-2 y alcanzan los máximos valores de remoción en las tres ultimas semanas de operación, con un 75% para R-1 y un 79% para R-2. Estas remociones se presentaron cuando la carga orgánica alimentada fue máxima 5,67 Kg DQO/m<sup>3</sup>\*d y las condiciones climáticas eran las mas favorables con tiempo seco.

Hay que anotar que la caída de la eficiencia en ambos reactores el día 23 de septiembre, se presento debido a una baja significativa en la carga orgánica alimentada, ya que en esos días se presentaron lluvias que diluyeron la concentración del lixiviado crudo traído del relleno sanitario, y a la vez se ocasionó un cambio brusco en la temperatura del sitio de operación, ya que el sistema fue operado en un sitio abierto al ambiente. Sin embargo, como se

puede apreciar en la figura [11] hay una recuperación después de esta baja, con porcentajes de remoción del 70% para R-2 y del 64% para R-1.

La entrada al sistema presento concentraciones de DBO5 entre 1.000 y 1.250 mg/l, pasando por un máximo de 1.800 mg/l, los cuales, disminuyen a la salida a valores por debajo de 600 mg/l, en donde el reactor R-2 presenta los valores más bajos, inferiores a 500mg/l, con respecto a R-1.

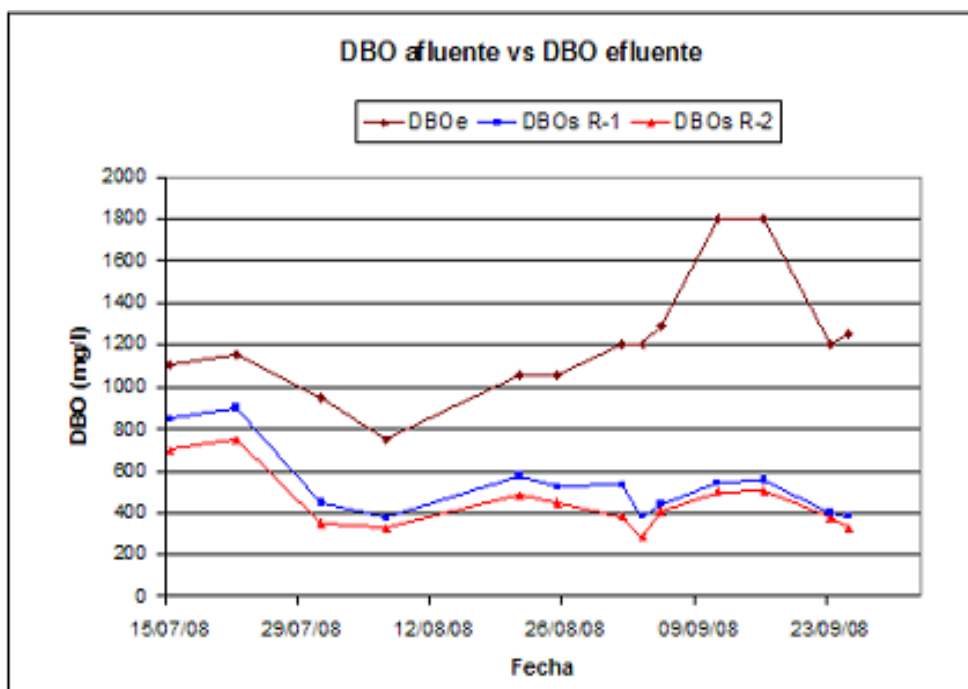


Figura [10]. Comportamiento de DBO

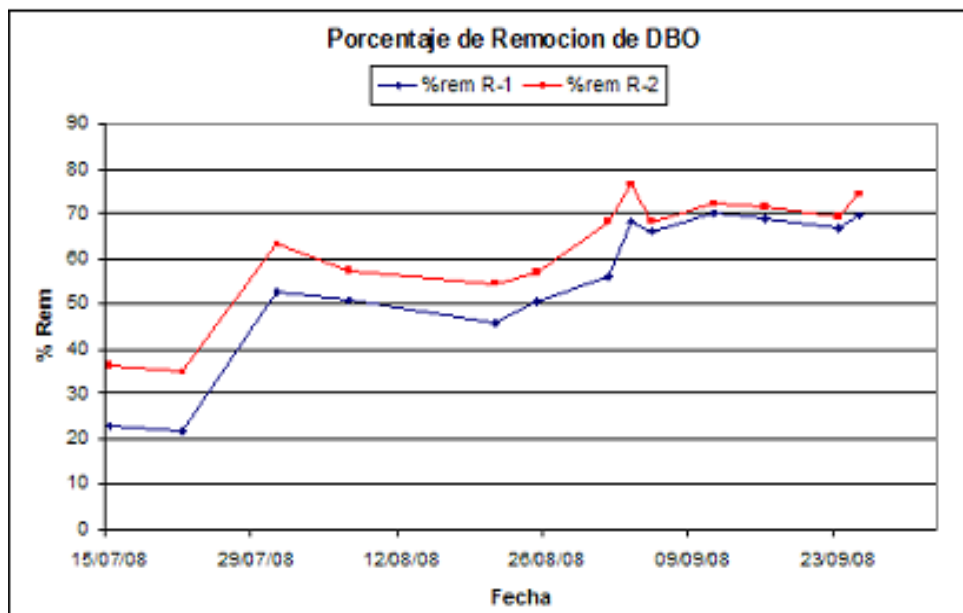


Figura [11]. Remoción de DBO

Como se observa en la figura [13] la remoción del sistema alcanza un valor máximo de 77 % para el reactor R-2 y 70% para el reactor R-1, aumentando progresivamente desde el arranque. La recuperación del sistema en cuanto a remoción después de una caída es buena.

Finalmente, se observa que el reactor R-2 presentó mejores eficiencias de remoción tanto en DQO como en DBO<sub>5</sub> durante la mayor parte de la etapa de arranque y operación con respecto al reactor R-1, lo cual indica una mayor capacidad de respuesta del inóculo de R-2 a las variaciones de concentración que se presentaron.

### 3.4 COMPORTAMIENTO DE LA RELACIÓN AGV/ALCALINIDAD

La relación entre los ácidos grasos volátiles (AGV) y la alcalinidad, para cada reactor, es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta en la

evaluación del sistema anaerobio UASB, ya que esta relación nos indica si hay fallas o no en el funcionamiento del mismo.

La relación AGV/ALK óptima para este tipo de digestores se encuentra en valores por debajo de 0,4; cuando este valor tiene una tendencia a aumentar indica una falla inminente en el sistema, y por consiguiente la inhibición a la digestión anaerobia.

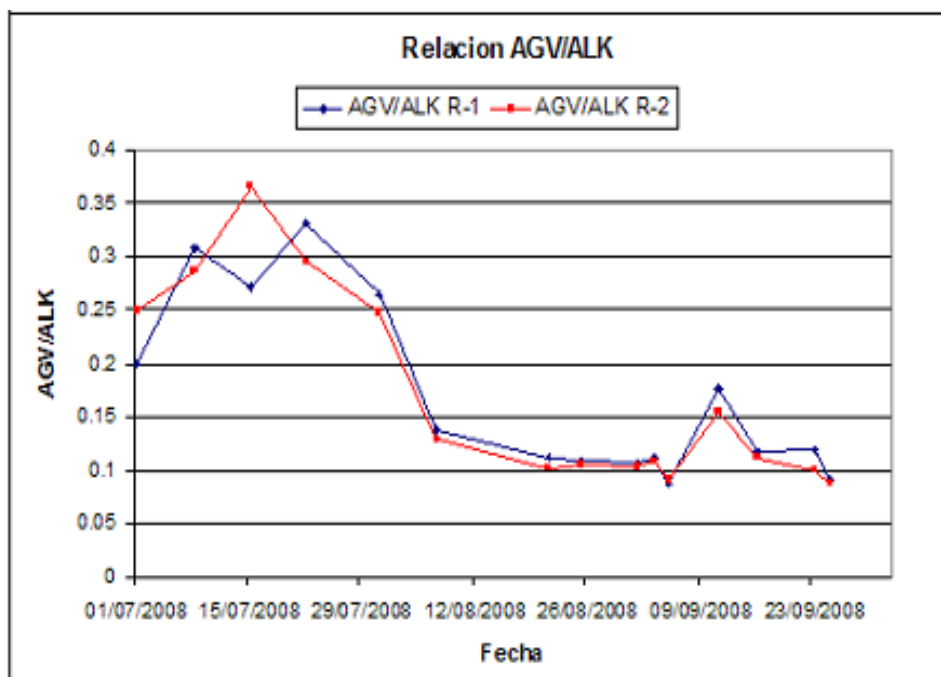


Figura [12]. Relación AGV/Alcalinidad

En la figura [14] se muestra el comportamiento de la relación AGV/ALK para la salida de cada reactor. Como se puede ver la relación para todos los puntos se mantiene por debajo de 0,4 en ambos reactores, lo cual es un indicativo de que no se presentan problemas de inhibición de la digestión anaerobia. Además, se puede observar que a partir del día 56, la relación alcanzo un valor por debajo de 0,15 y de ahí en adelante nunca supero el valor de 0,2, llegando a alcanzar valores por debajo de 0,1 para cada reactor

en el último mes de operación. Lo anterior indica que ambos reactores pueden resistir incrementos mayores de carga orgánica.

### 3.5 COMPORTAMIENTO DEL pH

Los valores promedios de pH obtenidos en el sistema están en el rango de 8,48 para el reactor R-1 y 8,42 para el reactor R-2 según la figura [15]. Lo anterior indica que el sistema de reactores en ningún momento se acidificó pudiendo producir efectos tóxicos en el cuerpo de cada inoculo de lodo anaerobio.

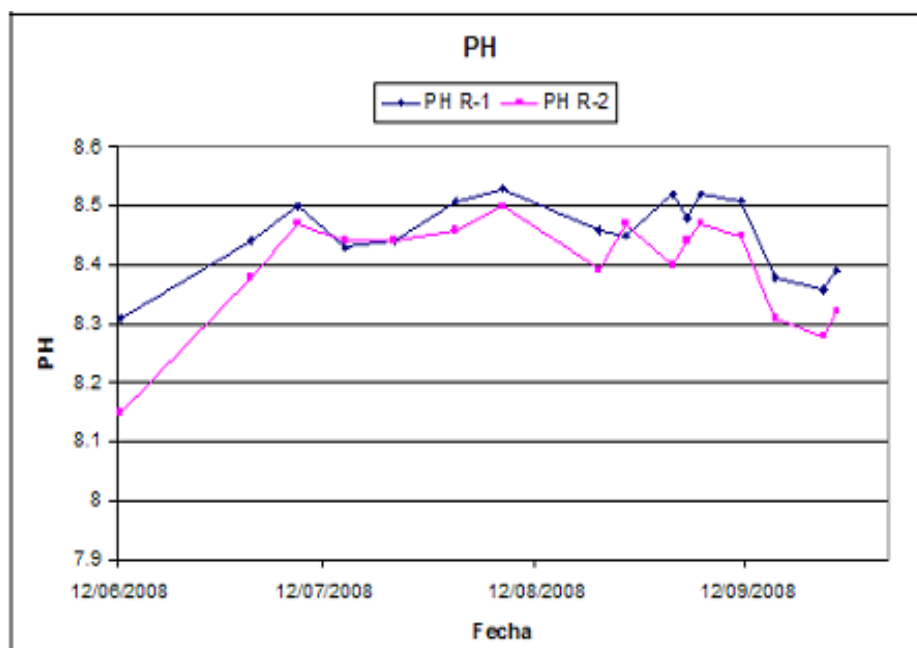
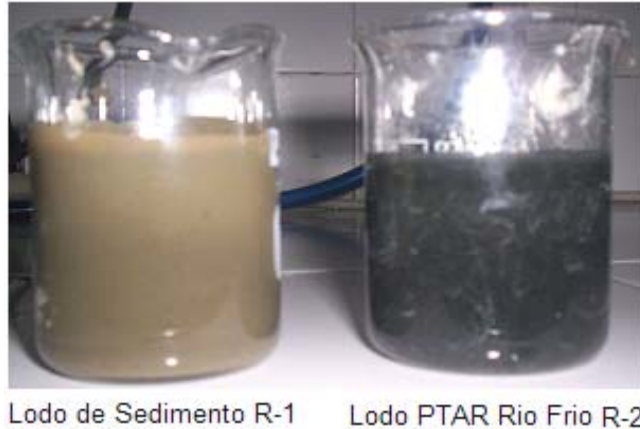


Figura [13]. Comportamiento del pH

### 3.6 SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV)

La determinación de los sólidos es una prueba indispensable para la operación de reactores anaerobios, ya que proporciona información de la concentración de biomasa bacteriana en el reactor.



**Figura [14]. Vista de Lodos al final de la etapa de operación**

Durante el periodo de monitoreo, los lodos presentaron un grado de sedimentabilidad favorable, ya que nunca se presento arrastre, debido al tamaño de los gránulos del lodo que aumentaron progresivamente con el tiempo de operación, observándose un tamaño de granulo mayor en el lodo del reactor R-2 así como un color mas oscuro (ver figura [16]).

En la tabla [3] se muestra la concentración inicial de los sólidos suspendidos volátiles para cada inoculo de lodo y la concentración final tomada a una altura de 10cm del fondo de los reactores después de 16 semanas de operación.

	<b>LODO R-1</b>	<b>LODO R-2</b>
<b>SSV (mg/l) inicial</b>	24.853,33	28.922,65
<b>SSV (mg/l) final</b>	46.020	55.406,67

**Tabla [3]. Sólidos Suspendidos Volátiles**

Como se puede observar, se presenta un aumento significativo en la concentración de sólidos suspendidos volátiles con el tiempo de operación de los reactores. Además, el aumento en los sólidos suspendidos volátiles indica un crecimiento de lodo con el tiempo y un incremento en la actividad metanogénica en cada reactor.

## CONCLUSIONES

Durante el monitoreo realizado en la etapa de operación a los reactores U.A.S.B., se encontró una relación directamente proporcional entre la carga orgánica y la eficiencia que presentaba el sistema; al aplicar cargas orgánicas mayores, el sistema presentaba mayor remoción, de igual forma al presentarse descenso en la carga orgánica se observó una disminución en la remoción. Así mismo se observó que el lixiviado puro, utilizado como afluente en las últimas semanas de monitoreo es óptimo y no requiere dilución alguna, lo que se corrobora con los resultados de eficiencias de remoción obtenidos.

Las eficiencias de remoción para el reactor R-2, superada la etapa de arranque, están en valores superiores al 70% en DQO con un máximo de 79%, y un 72% en DBO con un máximo de 77%. Con respecto al reactor R1, en esta misma etapa se presentaron remociones superiores al 65% en DQO con un máximo de 75% y en un 68% en DBO con un máximo de 70%. Lo anterior indica que el reactor R-2 presentó mejores eficiencias de remoción tanto en DQO como en DBO con respecto al reactor R-1, lo cual indica una mayor capacidad de respuesta del inóculo de R-2 (lodo PTAR) sobre el inóculo de R-1 (lodo de Sedimento) a las variaciones de concentración que se presentaron.

La relación AGV/ALK se mantuvo en valores por debajo de 0,3 y 0,2 en la mayor parte de la operación del sistema, mucho menor que el valor reportado en la literatura, relación de 0,4 como indicativo de problemas de inhibición del proceso de digestión anaerobia. Esto indica que el sistema puede resistir incrementos mayores de carga orgánica. Al igual, el pH se mantuvo en

valores entre 8,3 y 8,46 para ambos reactores, por lo cual, el sistema nunca se acidificó pudiendo producir efectos tóxicos en el cuerpo de cada inóculo.

Al finalizar la etapa de arranque y puesta en marcha del sistema, se presenta un aumento significativo en la concentración de sólidos suspendidos volátiles, lo cual indica un crecimiento de la biomasa bacteriana con el tiempo y un incremento en la actividad metanogénica en cada reactor. Con los resultados de este estudio se reafirma que los sistemas U.A.S.B pueden trabajar con cargas orgánicas muy elevadas y además, que es uno de los mejores tratamientos biológicos utilizando lixiviados; también cabe resaltar el bajo costo en operación que es requerido.

## RECOMENDACIONES

Adicional al estudio realizado sobre la tecnología anaerobia, y por las buenas características que presentaron los lodos, el siguiente paso en la investigación sería el seguimiento al biogas producido, implementando un dispositivo de control para cuantificarlo y darle un posterior aprovechamiento.

Debido al crecimiento que presentaron los lodos, es necesaria una purga de ellos por lo menos cada 4 meses en las dos llaves de cada reactor, para mantener una actividad biológica homogénea en todo el lecho.

Debido a que el sistema sufrió bajas en la eficiencia de remoción al ser operado en un sitio abierto al ambiente, por las variables condiciones climáticas; sería necesario disponer de un mecanismo que permita controlar la temperatura del sistema (enterramiento o utilizando material aislante), y de esta manera estudiar el efecto de la temperatura en la eficiencia del sistema, y realizar la automatización del mismo.

Si se requieren eficiencias de remoción superiores a las obtenidas durante la operación del sistema anaerobio, sería necesario un estudio posterior para implementar un tratamiento que permita degradar la materia orgánica remanente del efluente, como nutrientes y patógenos. Este postratamiento puede referirse a sistemas convencionales aerobios como lagunas de estabilización, plantas de lodos activados y otros.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. GIRALDO Eugenio. Tratamiento de Lixiviados en rellenos sanitarios. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes.
- [2]. Cruz R., Orta M., Sánchez J. y Rojas M., 2001, "Estimación de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios mediante un balance de agua en serie", Memorias del AMCRESPAC, Querétaro, México.
- [3]. BERRUELA, J. & CASTRILLON, L. (1997, junio). Efecto del N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> sobre el tratamiento anaerobio de lixiviados de vertederos. *Ingeniería Química*, N° 336, p. 121-125.
- [4]. LETTINGA, G. VAN VELSEN, A. HOBMA, S. DE ZEEUW, W. y KLAPWIJK, A. use of the upflow sludge blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering* (1980), Vol 22, N° 4, p 699-734.
- [5]. RODRIGUEZ V. Yenny Alexandra. Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Universidad Del Valle. Cali-Colombia.
- [6]. PUBLICACIONES Ph.CONIL. 1995-1996.
- [7]. RUIZ, I. ÁLVAREZ, J. SOTO, M. El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica. Universidad de La Coruña. Facultad de Ciencias. 1999. p 51-55.

[8]. TCHOBANOGLIOUS, G. y BURTON, F. MERCALF & EDDY, INC. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. 3° ed.: Editorial Mc Graw Hill. interamericana de España, 1995.

[9]. DIAZ- BAEZ María Consuelo. Digestión Anaerobia. Instituto de Biotecnología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá junio de 2002.

[10]. AGUDELO, R. IV seminario – taller latinoamericano sobre el Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales. Bucaramanga, 1998. Ponencia: Tratamiento de lixiviados producidos en el Relleno Sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín utilizando reactores UASB y filtros anaerobios FAFA. Medellín, 1996, p. 579 - 591.

[11]. TORRES, P., BARBA, L., RIASCOS, J. & VIDAL, J. (1997). Tratabilidade biológica de Chorume Produzido em Aterro ñao Controlado. Revista *Engenharia Sanitária e Ambiental*, abril - junio, vol. 2, N° 2, Río de Janeiro, p. 55 - 62.

[12]. CONVENIO DE COOPERACIÓN TÉCNICO – CIENTÍFICO UNIVERSIDAD DEL VALLE – CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA, CVC – UNIVERSIDAD AGRÍCOLA DE WAGENINGEN. Criterios de diseño para sistemas de tratamiento anaerobio, U. A. S. B. Universidad del Valle – Facultad de Ingeniería, Departamento de procesos químicos y biológicos, sección de saneamiento ambiental. Santiago de Cali. 1989.

[13]. Standard. Methods for the examination of water and wastewater. (21 st Edition). Ed. APHA. AWWA WEF. 2005 Centennial Edition.

# **ANEXOS**

**ANEXO A.**  
**RELLENO SANITARIO DE SAN GIL “EL CUCHARO”**

El relleno sanitario “El Cucharó” está ubicado a doce (12) kilómetros del municipio de San Gil; el área total del relleno es de quince (15) hectáreas, de las cuales cinco (5) se encuentran habilitadas actualmente; allí San Gil y 23 municipios aledaños depositan las basuras en una fosa. Actualmente se depositan 50 ton/d de residuos sólidos aproximadamente, su disposición la realizan por capas de desechos los cuales son cubiertos con capas de tierra. El relleno Sanitario de San Gil tiene dos fosas, de las cuales una de estas (fosa seis) ya ha sido clausurada y actualmente se encuentra en funcionamiento la fosa cinco.

Las fosas se encuentran cubiertas por una capa de geomembrana en su interior que brinda impermeabilidad al terreno evitando que los lixiviados resultantes se filtren en el suelo y no lleguen a los acuíferos tal y como lo exige la norma. El diseño interior de cada fosa consta de una estructura de tubos perforados que se asemeja a una espina de pescado, los cuales se encargan de drenar los lixiviados al interior de la fosa; esta estructura de tubos se encuentra cubierta por un filtro constituido por el suelo natural, grava de diferentes diámetros, arena y bala de río. Finalmente esta estructura de tubos y su filtro es recubierta con una capa de geotextil la cual recibe los residuos sólidos depositados en la fosa.

Fosa(6) del relleno sanitario de San Gil "El Cucharo"



**Recolección de lixiviados:**

La recolección de lixiviados inicia en el interior de la fosa donde se recogen a través de la estructura de tubos (espina de pescado) que los llevan a un tubo principal el cual comunica la fosa con las piscinas recolectoras.

**Descripción de las piscinas de recolección:**

Actualmente el relleno cuenta con tres piscinas recolectoras, de las cuales dos reciben lixiviados. La piscina 2 recibe los lixiviados de la fosa cinco y esta comunicada con la piscina 3, la cual actúa como una piscina de emergencia en caso de rebosarse la piscina 2.

La piscina 1 recibe los lixiviados de la fosa seis (clausurada), pero que actualmente sigue generando lixiviados.

Dimensiones de las piscinas de recolección de lixiviados del relleno sanitario de San Gil “El Cucharo”

PISCINA	LONGITUD (m)	ANCHO (m)	PROFUNDIDA (m)
PISCINA 1	21	20	1,40
PISCINA 2 Y 3	41,3	9,50	1,40

Piscinas recolectoras de los lixiviados del relleno sanitario de San Gil “El Cucharo”



Vertimiento de lixiviado de la piscina 2 del relleno sanitario de San Gil “El Cucharo”



**ANEXO B.  
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL  
LIXIVIADO GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO DE SAN GIL “EL  
CUCHARO”.**

. Caracterización Físicoquímica y microbiológica del Lixiviado. Relleno Sanitario de San Gil

PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADO
PH	UND	8,6
DQO	mg /L O <sub>2</sub>	5627
DBO <sub>5</sub>	mg /L O <sub>2</sub>	1800
Sólidos Totales	mg /L	10588
Sólidos Suspendidos	mg /L	336
Color	UPC	2500
Turbiedad	UNT	289
Hierro Total	mg /L Fe	8
Alcalinidad	mg /L CaCO <sub>3</sub>	10800
Cloruros	mg /L Cl <sup>-</sup>	2300
Dureza Total	mg /L CaCO <sub>3</sub>	750
Dureza Cálcica	mg /L CaCO <sub>3</sub>	150
Dureza Magnésica	mg /L CaCO <sub>3</sub>	600
Calcio	mg /L Ca	60
Magnesio	mg /L Mg	144
Conductividad	µS/cm	14210
Sulfatos	mg /L SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	36
Tensoactivos	mg /L ABS	9,5
Fenoles	mg /L Fenol	No Detectado < 0,10
Nitritos	mg /L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	11,4
Nitratos	mg /L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	16,3
Nitrógeno Amoniacal	mg /L NH <sub>3</sub>	5,4
Cobre	mg /L Cu	1,6
Zinc	mg /L Zn	2,8
Cromo	mg /L Cr	0,41

Cadmio	mg /L Cd	0,85
Plomo	mg /L Pb	0,22
Mercurio	mg /L Hg	No Detectado < 0,15
Níquel	mg /L Ni	1,8
Cianuros	mg /L CN <sup>-</sup>	No Detectado < 0,05
Mesofilos	UFC/100 ml	10140
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	26100
Coliformes Totales	NMP/100 ml	75180

## **ANEXO C. MICROBIOLOGÍA DE LA DIGESTION ANAEROBIA [5]**

### **DEGRADACIÓN ANAEROBIA DE LA MATERIA ORGÁNICA**

En el proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica intervienen diversos grupos de bacterias anaerobias facultativas y anaerobias estrictas las cuales utilizan en forma secuencial los productos metabólicos generados por cada grupo, según se esquematiza en la Figura 2. El flujo de carbonos y electrones generado durante la degradación anaerobia de los compuestos orgánicos involucra tres grandes grupos tróficos:

- Grupo I: bacterias hidrolíticas y fermentativas.
- Grupo II: bacterias acetogénicas.
- Grupo III: bacterias metanogénicas.

El proceso se inicia con la hidrólisis de polisacáridos, proteínas y lípidos por la acción de enzimas extracelulares producidas por las bacterias del grupo I. Los productos de esta reacción son moléculas de bajo peso molecular como los azúcares, los aminoácidos, los ácidos grasos y los alcoholes, los cuales son transportados a través de la membrana celular; posteriormente son fermentados

A ácidos grasos con bajo número de carbonos como los ácidos acéticos, fórmico propiónico y butírico, así como compuestos reducidos como el etanol, además de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Los productos de fermentación son convertidos a acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por la acción de las bacterias del grupo II, las cuales son conocidas como “bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno”.

Finalmente, las del grupo III o metanogénicas convierten el acetato a metano y dióxido de carbono, o reducen el dióxido de carbono a metano. Estas transformaciones involucran dos grupos metanogénicos que son los encargados de llevar a cabo las transformaciones mencionadas anteriormente. En menor proporción, compuestos como el metanol, las metilaminas y el ácido fórmico pueden también ser usados como sustratos del grupo metanogénico.

Reacciones Bioquímicas en la Digestión Anaerobia de la Materia Orgánica

<b>TIPO DE REACCION</b>	<b>ECUACION</b>
Fermentación de glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}$
Fermentación de glucosa a butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{H}_2$
Fermentación del butirato a acetato e H <sub>2</sub>	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Fermentación del propionato a acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Acetogénesis a partir de H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub>	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

Fuente: Zinder, 1984

## **MICROBIOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

### **Grupo I: Bacterias Hidrolíticas – Fermentativas**

Son las bacterias que llevan a cabo las reacciones de hidrólisis y acidogénesis, son anaerobias facultativas y los géneros más frecuentes que participan son los miembros de la familia Enterobacteriaceae, además de los géneros Bacillus, Peptostreptococcus, Propionibacterium, Bacteroides, Micrococcus y Clostridium. Las bacterias con actividad proteolítica son en su mayoría especies de los géneros Clostridium, Peptococcus, Bifidobacterium y Staphylococcus. Bacterias como Anaerovibrio lipolytica con actividad lipolítica han sido aisladas del rumen; igualmente la Butyrovibrio fibrisolvens hidroliza fosfolípidos cuando crece con azúcares fermentables como fuente de carbono.

### **Grupo II: Bacterias Acetogénicas**

Para que tenga lugar una eficiente metanogénesis, los productos de fermentación como el propionato y el butirato deben ser oxidados a acetato, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, esta oxidación es llevada a cabo por un grupo denominado “organismos acetógenos productores obligados de hidrógeno (OHPA)”, mediante un proceso conocido como acetogénesis. Aunque la mayoría de este tipo de reacciones consume energía, en ambientes anaerobios donde la energía disponible es baja, el acoplamiento de la actividad de las bacterias OHPA con las bacterias consumidoras de H<sub>2</sub> (metanógenos hidrogenofílicos) permite un balance energético favorable. Este último grupo, consume el hidrogeno generado por las OHPA manteniendo una presión parcial de H<sub>2</sub> a un nivel adecuado para que termodinámicamente pueda darse la conversión de los AGV a acetato e hidrógeno. Esta asociación se conoce como “relación sintrófica” o “transferencia interespecífica de hidrógeno”. Solamente un

limitado número de especies del grupo OHPA han sido aisladas; probablemente existan más, pero aún no son conocidas.

Dentro de las especies aisladas se pueden mencionar:

- *Syntrophomonas sapovorans*
- *Syntrophobacter wolinii*
- *Syntromonas wolfei*
- *Syntrophospara bryantii*
- *Syntrophus buswellii*

Dentro del grupo de acetógenos existe un grupo de bacterias conocidas como

“bacterias homoacetogénicas” las cuales son anaerobias obligadas y utilizan el CO<sub>2</sub>, como aceptor final de electrones, produciendo acetato como producto único de la fermentación anaerobia. Aunque este grupo no es un grupo taxonómico definido, en el se incluyen una variedad de bacterias Gram (+) y Gram (-) formadoras de esporas como: *Clostridium aceticum*, *Clostridium formicoaceticum* y *Acetobacterium woodii*.

### **Grupo III: Bacterias Metanogénicas**

Las bacterias metanogénicas pertenecen al grupo actualmente conocido como Archaea, cuyos miembros presentan características diferentes. Estas características están relacionadas fundamentalmente con la composición química de algunas estructuras celulares. Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas y producen metano como principal producto del metabolismo energético. A pesar de los requerimientos estrictos de anaerobiosis obligada y el metabolismo especializado de este grupo, estas bacterias se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza. La actividad metanogénica es mucho mayor en ecosistemas de aguas dulces y terrestres, la menor actividad detectada en océanos, se debe a la alta

concentración de sulfatos, condición que favorece la sulfato reducción en sedimentos marinos.

Con base en el tipo de sustrato utilizado, las bacterias metanogénicas se subdividen en tres grupos:

- Grupo 1: utiliza como fuente de energía  $H_2$  formato y ciertos alcoholes, el  $CO_2$  es el aceptor final de electrones el cual es reducido a metano
- Grupo 2: utiliza una amplia variedad de compuestos que tienen el grupo metilo. Algunas de las moléculas son oxidadas a  $CO_2$ , el cual actúa con aceptor final de electrones y se reduce directamente a metano
- Grupo 3: aunque la mayor parte del metano que se genera en la naturaleza proviene del rompimiento del acetato, la habilidad de catabolizar este sustrato esta limitada a los géneros: Methanosarcina y Methanosaeta (Methanotrix). Es frecuente encontrar en reactores anaerobios, una competencia por el acetato entre estos dos géneros, sin embargo, las bajas concentraciones de acetato que usualmente predominan al interior de los reactores favorece el crecimiento de las Methanosaeta (Díaz-Báez, 2002).

## SULFATO REDUCCIÓN

La sulfato reducción es el proceso durante el cual el sulfato se reduce a sulfuro de hidrógeno, mediante la participación de las bacterias sulfato reductoras (BSR)

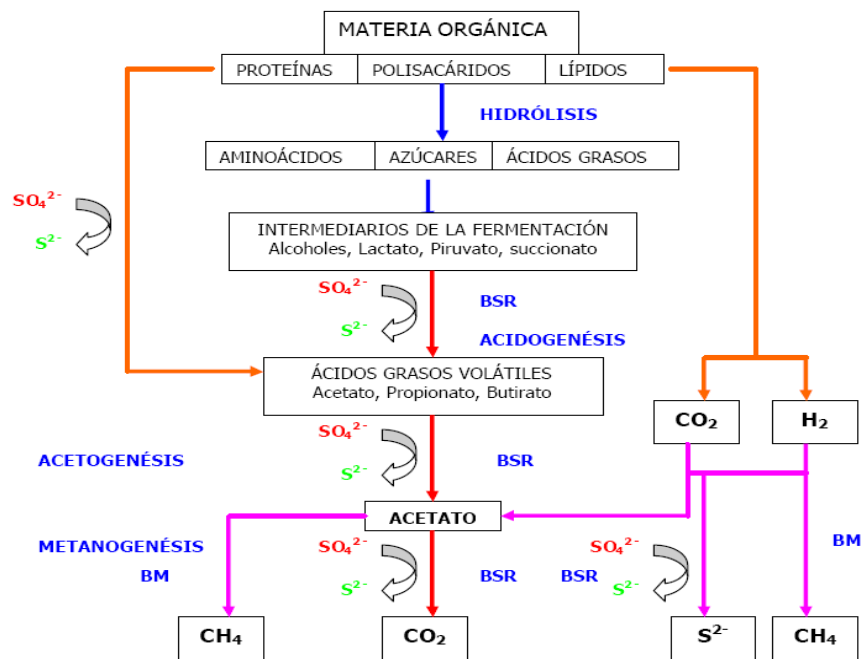
Reducción Biológica del Sulfato



Durante la degradación anaerobia de la materia orgánica, puede ocurrir que las BSR utilicen el sulfato como aceptor de electrones, aunque pueden utilizar también compuestos como el tiosulfato, el tetratiónato y el azufre elemental. Los donadores de electrones más utilizados por las BSR son  $H_2$ , lactato, piruvato entre otros. Las BSR son anaerobios estrictos, ampliamente distribuidas en ambientes acuáticos y terrestres, cumplen un importante papel en las etapas finales de la degradación de la materia orgánica, especialmente en la remoción de los sulfatos presentes en el afluente.

Pueden crecer en presencia o ausencia de sulfatos, utilizando vías metabólicas diferentes; una fermentativa y la otra oxidativa.

Sulfato Reducción en la Degradación de la Materia Orgánica (Gibson, 1990)



En presencia de sulfatos las BSR compiten con las bacterias metanogénicas (BM) por sustratos comunes como: formato e hidrógeno, con las bacterias

acetogénicas (BA) por componentes como propionato y butirato. Esto no significa que la metanogénesis y la sulfato reducción sean excluyentes, pues pueden ocurrir simultáneamente cuando el metano se genera a partir del metanol y/o aminas metiladas, sustratos por los cuales las BSR tienen poca afinidad. Los reactores anaerobios operan a valores umbrales para el consumo de hidrógeno por la población metanogénica. Sin embargo, el valor umbral de las BSR es más bajo, por lo que en presencia de sulfato, el hidrógeno es consumido principalmente por las BSR. Esta población tiene ventajas cinéticas frente a las BM que favorecen su proliferación al interior de los reactores. En reactores anaerobios con alta concentración de sulfato, las BRS también compiten con las BA por sustratos como propionato y butirato, por lo que la relación sintrófica entre las BM y BA para la oxidación de estos compuestos es superada por las BSR.

En ausencia de sulfato, las BSR pueden constituir el 15% del total de la biomasa presente en el reactor anaerobio. Bajo estas condiciones fermentan sustratos como: piruvato, lactato, etanol, fructuosa, propanol y acetato entre otros, y crecen como organismos acetogénicos.

En general, durante la degradación anaerobia de la materia orgánica, la sulfato reducción puede interferir con la metanogénesis, generando problemas como:

1. Competencia entre las BSR y las BM, por sustratos comunes y la consecuente disminución en la producción de metano
2. Inhibición de varios grupos bacterianos por la presencia de H<sub>2</sub>S

3. Toxicidad generada por el  $H_2S$ , malos olores y corrosión. A pesar de los problemas que ocasiona la sulfato reducción al interior de los reactores anaerobios, este proceso puede presentar algunas ventajas:

- Contribuye a mantener un bajo potencial de óxido-reducción en el sistema;
- Constituye un método biotecnológico para la remoción de sulfato;
- Los complejos Metal-S<sup>2-</sup> tienen baja solubilidad, propiedad que puede ser utilizada para la precipitación de metales pesados como Co, Ni, Pb, y Zn.

## **ANEXO D. INSTALACIÓN FINAL DEL SISTEMA DE REACTORES EN PARALELO**

El sistema de reactores en paralelo se dispuso teniendo la precaución de realizar un adecuado trabajo de plomería. Finalmente el sistema quedó instalado como se muestra en la figura:



Instalación del sistema

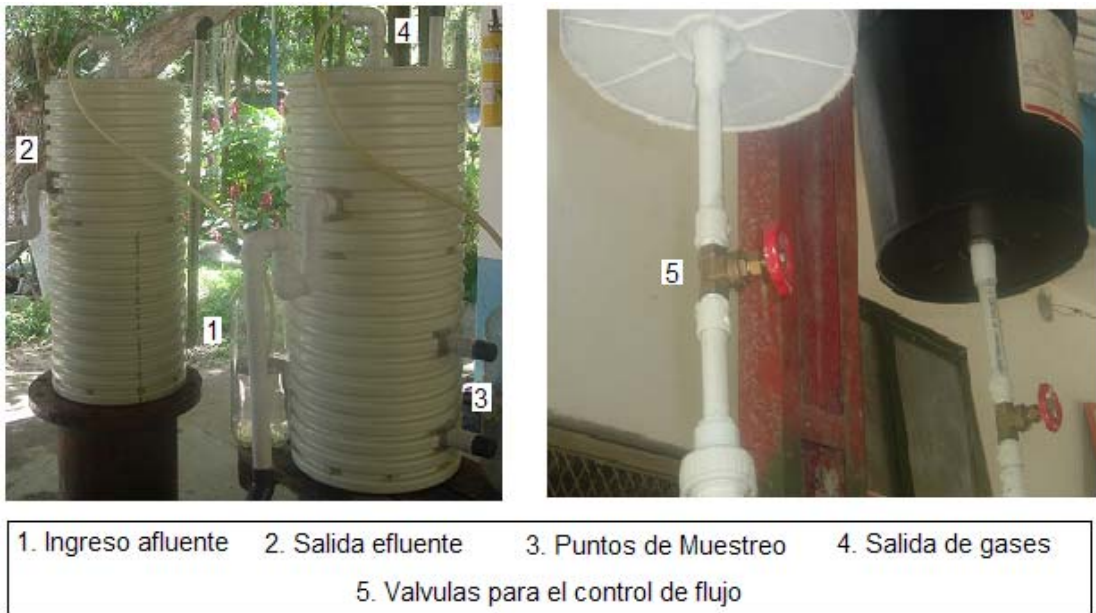
Los reactores están soportados a una altura de 80 cm sobre dos columnas base, compuestas de una sección de tubería de acero de 14 pulgadas para R1 y una sección de tubería de PVC de 14 pulgadas con base de madera para R2.

Los tanques de alimentación tienen una capacidad de almacenamiento de 20 litros. Están sujetos a una estructura metálica sobre una altura de 2,70 m, lo cual garantiza el flujo de alimento por gravedad a través de las tuberías.

## Sistema de alimentación

Cada reactor cuenta con un conducto inferior para el ingreso del afluente y un sistema de distribución del mismo, tiene dos salidas intermedias como puntos de muestreo ubicados a 10 y 20 cm tomados desde la base del reactor, además, el conducto para la evacuación del efluente tratado se encuentra en la parte superior a 44 cm de la base como se muestra en la figura.

Sistema de alimentación



El lixiviado es introducido lo más uniformemente posible por el fondo del reactor, donde se encuentra con el manto de lodo (1). El biogas producido en el manto de lodo asciende y sale de este hasta alcanzar la campana de recolección en la parte superior del reactor (4). El lixiviado va ascendiendo lentamente a través del reactor, pasa en la zona de sedimentación hasta alcanzar el dispositivo de salida para el efluente (2).

El flujo de alimentación al sistema se controla por la disposición de válvulas tipo cortina de 1 pulgada en cada reactor, las cuales están situadas a la salida de los tanques de alimentación. Mediante las válvulas se gradúa el flujo de alimento requerido para la entrada de los reactores (5).

El sistema de reactores U.A.S.B. piloto se encuentra instalado en el área de maquinas de la empresa de Acueducto Alcantarillado y Aseo de San Gil ACUASAN, donde se llevo a cabo el desarrollo de este proyecto operando en un sitio abierto al ambiente.

**ANEXO E.  
METODOS Y FRECUENCIAS DE LOS ANALISIS Y SEGUIMIENTO DE  
LOS PARAMETROS DURANTE LA  
OPERACIÓN DE LOS REACTORES UASB**

**Métodos y Frecuencia de los Análisis Físicos y Químicos para el monitoreo del sistema UASB**

<b>PARAMETRO</b>	<b>FRECUENCIA</b>	<b>PUNTO</b>	<b>METODO</b>
DQO	2 Veces a la semana	Afluente y Efluente	Reflujo cerrado
DBO <sub>5</sub>	2 Veces a la semana	Afluente y Efluente	Oxi Top
AGV	2 Veces a la semana	Afluente	Volumétrico
ALCALINIDAD	2 Veces a la semana	Afluente y Efluente	Volumétrico
SSV	2 Veces durante la etapa de operación	Atura de 13.5 cm	Gravimétrico
PH	Diario	Afluente y Efluente	Electrométrico

Nota: Los parámetros fueron realizados en el laboratorio de aguas de la empresa de acueducto de San Gil ACUASAN, según las frecuencias indicadas, empleando los métodos establecidos en el Standard. Methods 2005 [13].