

**TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS CON REACTORES ANAEROBIOS “UASB”  
RELLENO SANITARIO “ANTANAS”**

**ELCY LORENA GUERRERO  
RONALD FERNAN ERASO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2009**

**TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS CON REACTORES ANAEROBIOS “UASB”  
RELLENO SANITARIO “ANTANAS”**

**PROYECTO DE INVESTIGACION PRESENTADO COMO REQUISITO PARA  
OPTAR AL TITULO DE INGENIERO (A) CIVIL  
ELCY LORENA GUERRERO  
RONALD FERNAN ERASO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2009**

## CONTENIDO

<b>1. RESUMEN</b>	<b>PAG</b>
<b>2. INTRODUCCION</b>	<b>13</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
3.1. OBJETIVO GENERAL	19
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	19
<b>4. RELLENO SANITARIO ANTANAS</b>	<b>19</b>
4.1 ADECUACION	<b>20</b>
4.2 OPERACIÓN	20
4.2.1. Pesaje	22
4.2.2. Descargue y confinamiento de residuo	22
4.2.3. Cubrimiento de residuos	23
4.2.4. Control de gases producidos	24
4.2.5. Control de aguas lluvias	24
4.2.6. Planta de tratamiento de lixiviados	25
4.2.6.1 Tratamiento biológico	26
4.2.6.1.1. Laguna aerobia	26
4.2.6.1.2. Laguna anaerobia	26
4.2.6.2 Tratamiento fisicoquímico	27
4.2.6.2.1. Coagulación	28
4.2.6.2.2. Floculación	28
4.2.6.2.3. Sedimentación	29
4.2.6.2.4. Filtro FAFA	30
4.2.6.3. Lechos de secado	31
4.2.6.4. Zona de bioremediación	31
4.2.6.5. Otras áreas	31
4.2.6.5.1. C.E.P.A	32
4.2.6.5.2. Laboratorio	32
	33

<b>5. LIXIVIADO</b>	<b>34</b>
5.1. COMPOSICION DE LIXIVIADO	34
5.1.1. Compuestos orgánicos volátiles	35
5.1.2. Metales	35
5.1.3. Otras sustancias químicas	35
<b>6. PROCESO ANAEROBIO</b>	<b>37</b>
6.1. COMPARACION PROCESO AEROBIO Y ANAEROBIO	37
6.1.1. Ventajas de la biotecnología anaerobia	37
6.1.2. Desventajas de la biotecnología anaerobio	38
6.1.3. Comparación entre la biotecnología anaeróbica y aeróbica	38
6.2. DESCRIPCION DEL PROCESO ANEROBIO	39
6.3. ETAPAS DEL PROCESO ANAEROBIO	39
6.3.1. Hidrólisis	39
6.3.2. Acidogénesis o fermentación	40
6.3.3. Homoacetogénesis – Acetogénesis	40
6.3.3.1. Acetogénesis acidoclástica	41
6.3.3.2. Acetogénesis hidrogenoclástica	41
6.3.4. Metanogénesis	41
6.3.4.1. Metanogénesis hidrogenoclástica	41
6.3.4.2. Metanogénesis acetoclástica	41
6.3.5. Formación del metano	42
6.4. CRECIMIENTO BIOLOGICO ANAEROBIO	43
6.5. CONSIDERACIONES Y RELACIONES IMPORTANTES EN EL PROCESO ANAEROBIO	44
<b>7. REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB)</b>	<b>46</b>
7.1. IDEAS BASICAS SOBRE EL REACTOR	48
7.2. SEPARADOR SOLIDO – GAS – LIQUIDO	48

7.3. PRINCIPALES VENTAJAS	49
7.4. PRINCIPALES DESVENTAJAS	49
7.5. PARAMETROS DE SEGUIMIENTO DEL REACTOR	49
7.5.1. Temperatura	49
7.5.2. pH	50
7.5.3. Alcalinidad	50
7.5.4. Ácidos grasos volátiles	50
7.5.5. Relación AGV/ Alcalinidad	51
7.5.6. Caudal y tiempo de retención hidráulica	51
7.5.7. Sólidos	52
7.5.8. DBO5	53
7.5.9. DQO	53
7.6. CONSIDERACIONES DE DISEÑO REACTOR UASB	53
7.6.1. Volumen	54
7.6.2. Altura del reactor	55
7.6.3. Consideraciones de la campana de separación de gases	55
7.6.4. Tiempo de retención hidráulica	56
<b>8. REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) A ESCALA REAL RELLENO SANITARIO ANTANAS</b>	<b>57</b>
8.1. DISEÑO REACTOR A ESCALA REAL	57
8.1.1. Tiempo de retención hidráulica	57
8.1.2. Diámetro del reactor	57
8.1.3. Altura efectiva del reactor	57
8.1.4. Caudal de diseño	58
8.1.5. Carga orgánica volumétrica	58
8.1.6. Separador gas- sólido – líquido	58

8.1.7. Distribución de lixiviado al reactor	61
8.1.8. Localización del reactor	61
8.1.9. Estructuras de entrada reactor	63
8.1.9.1. Cajillas de entrada de lixiviado para dilución	63
8.1.9.2. Cajilla de control de caudal y muestreo lixiviado disuelto	64
8.1.10. Conducción lixiviado al reactor	65
8.1.11. Estructuras de salida del reactor	66
8.1.11.1. Salida del reactor	66
8.1.11.2. Cajilla de salida y muestreo	67
8.1.12. Aparejos de muestreo	69
8.2. CONSTRUCCION DEL REACTOR Y ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA	70
8.3. LIXIVIADO QUE INGRESA AL REACTOR	71
<b>9. INOCULACION Y PUESTA EN MARCHA REACTOR</b>	<b>72</b>
<b>UASB</b>	
9.1. INOCULACION O SIEMBRA DEL REACTOR	72
9.1.1. Desarrollo de la inoculación	73
9.1.2. Prueba de eficiencia inoculación	75
9.2. ETAPA DE OPERACIÓN O PUESTA EN MARCHA DEL REACTOR	78
9.2.1. Parámetros a evaluar en el sistema	78
<b>10. ANALISIS DE RESULTADOS</b>	<b>80</b>
10.1. ANALISIS DE COMPORTAMIENTO DE PH Y DQO EN EL AFLUENTE DURANTE OPERACIÓN DEL SISTEMA	80
10.2. COMPORTAMIENTO TEMPERATURA EN EL REACTOR	82
10.3. COMPORTAMIENTO pH EN EL REACTOR	83

10.4. COMPORTAMIENTO Y PORCENTAJE DE REMOCION DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO DQO	84
10.5. RELACION AGV ALCALINIDAD EN EL SISTEMA	86
10.6 REALACION ACIDOS GRASOS VOLATILES – DQO, PORCENTAJE DE REMOCION	88
10.7. RELACION SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES, PORCENTAJE REMOCION DQO DEL SISTEMA	90
10.8. COMPORTAMIENTO DE DBO5 EN EL SISTEMA	92
10.9 COMPARACION COMPORTAMIENTO DEL REACTOR COMO TRATAMIENTO PRIMARIO Y LAGUNA ANAEROBIA RELLENO SANITARIO ANTANAS	93
<b>11. CONCLUSIONES</b>	<b>95</b>
<b>12. RECOMENDACIONES</b>	<b>99</b>
<b>13. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>101</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO A PRUEBAS RELLENO SANITARIO ANTANAS</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO B PRUEBAS REACTOR ANAEROBIO “UASB”</b>	<b>111</b>
<b>ETAPA DE PUESTA EN MARCHA</b>	
<b>ANEXO C PLANOS</b>	<b>123</b>

## LISTA DE FIGURAS

1. Área de pesaje Relleno sanitario Antanas	23
2. Descargue de residuos	23
3. Cubrimiento de residuos	24
4. Chimenea para control de gases	25
5. Canaletas recolección aguas lluvias	25
6. Etapas de tratamiento de lixiviado en el Relleno sanitario Antanas	26
7. Piscina Aerobia	27
8. Piscina Anaerobia	28
9. Coagulador	29
10. Floculadores	30
11. Sedimentador	30
12. Lechos de Secado	31
13. Zona de Bioremediación Alta	32
14. Centro Experimental Piloto Antanas	32
15. Laboratorio	33
16. Lixiviado relleno sanitario Antanas	34
17. Degradación de la materia orgánica proceso anaerobio	43
18. Crecimiento biológico anaerobio	44
19. Componentes Reactor UASB	46
20. Diseño reactor parte superior	59
21. Diseño separador solido – gas – liquido	60
22. Diseño separador solido – gas – liquido	60
23. Detalle de entrada al reactor	61
24. Diagrama del levantamiento topográfico	62
25. Sitio construcción	62
26. Laguna anaerobia excesos	63
27. Cajilla de dilución lixiviado	63

28.	Cajilla de dilución construida	64
29.	Cajilla de control de caudal y muestreo lixiviado de entrada	64
30.	Cajilla construida de control de caudal y muestreo lixiviado de entrada	65 66
31.	Pendiente del sitio	67
32.	Estructura de salida de lixiviado tratado	68
33.	Diseño Cajilla de salida	68
34.	Cajilla de salida construida	69
35.	Diseño aparejos para muestreo	69
36.	Aparejos toma de muestras construidos	70
37.	Reactor construido	74
38.	Proceso de inoculación	76
39.	Eficiencia de remocion inoculacion reactor	77
40.	Comportamiento DQO pruebas de inoculación	80
41.	Comportamiento pH y DQO afluente del reactor	82
42.	Comportamiento Temperatura del reactor	83
43.	Comportamiento de pH en el reactor	84
44.	comportamiento DQO sistema	84
45.	% Remoción DQO	86
46.	Alcalinidad, AGV en el afluente	86
47.	Alcalinidad, AGV en el efluente	88
48.	Relación AGV, % remoción DQO efluente	90
49.	concentración SST, remoción SST y DQO	90
50.	Comportamiento DBO del sistema	92
51.	Comparación % remoción DQO reactor UASB y laguna anaerobia relleno sanitario Antanas	93

<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>PAG</b>
1. Parámetros recomendados proceso anaerobio	45
2. Cargas volumétricas aplicables en reactores UASB con lodo granular y floculento en relación con la Concentración del agua residual y el tamaño de fracción insoluble de DQO de agua residual	55
3. Tiempos de retención hidráulica reactores UASB	56
4. caracterización lodo inoculación	75
5. Pruebas DQO inoculación reactor	75
6. 6 pH y T° inoculación	76
7. Diluciones utilizadas en proceso puesta en marcha	78
8. Parámetros de control reactor UASB	79
9. pH en el sistema	83
10. DQO en el sistema	85
11. Valores alcalinidad, AGV	86
12. Valores AGV; DQO	88
13. Valores de interés de SST y DQO	90
14. Valores promedio remoción DQO reactor y Laguna anaerobia relleno sanitario Antanas	93

**CARTA DE APROBACION**

**JURADO** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**JURADO** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**FECHA** \_\_\_\_\_

**“LAS IDEAS Y CONCLUSIONES APORTADAS A ESTE TRABAJO DE GRADO SON RESPONSABILIDAD EXCLUSIVA DEL AUTOR “**

**ART ICULO 1 DEL ACUERDO N° 324 DE OCTUBRE 11 DE 1986 EMANADO DEL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DE UNIVERSIDAD DE NARIÑO**

## 1. RESUMEN

El proyecto consiste en el diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor anaerobio "UASB" (upflow anerobic sludge blanket) a escala real, que funcionara bajo las condiciones que ofrece el relleno sanitario Antanas de la ciudad de san Juan de pasto.

estudiando el funcionamiento del reactor en una primera etapa de inoculación y puesta en marcha mediante la realización de análisis de laboratorio utilizando parámetros fisicoquímicos como pH, alcalinidad, AGV (ácidos grasos volátiles), DQO, SST y temperatura, y el aumento progresivo de la carga contaminante haciendo uso de tres diluciones agua lixiviado, evaluando su eficacia como tratamiento de depuración de lixiviado y su viabilidad de aplicación en el relleno sanitario de la ciudad o en tratamientos similares en otro tipo de agua residual.

## ABSTRACT

The high production of household and industrial waste implies a serious environmental problem due to sub-products such as leachate which are infiltrated into the soil and water sources which generate a serious impact to the flora and fauna around the world.

Due to its nature and composition leachate is one of the largest wastewater pollutant loads, composed of proteins, carbohydrates, aromatic compounds, alcohols and mainly volatile fatty acids difficult to degrade.

The biological treatment of wastewater intends to promote the elimination of colloidal particles which can not be sedimented, these processes can be carried out using anaerobic technology which implies important economical advantages; lower production of sludge limited energy consumption, besides obtaining biogas methane that can be used as alternative energy reducing the amount of harmful gases sent into the atmosphere.

That's why, the project aims to collaborate with environmental development and with the environmental conservation around the area, by designing, building and launching an anaerobic blanket "uasb" (upflow anaerobic sludge blanket) in a real size, which works by taking into account the conditions offered by the landfill "antanas" of pasto city.

Furthermore it is very important the study of the blanket operation at an early stage of inoculation made through laboratory analysis by using physicochemical parameters as ph, alkalinity, and volatile fatty acids cod, tss and temperature, evaluating its effectiveness as a purification treatment of leachate and its feasibility

of application in the landfill of the city or similar treatments in other types of wastewater .

## 2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la humanidad, enfrenta problemas medioambientales muy complicados, uno de los mas importantes es la elevada producción de residuos domésticos e industriales que aumentan día a día, sobre todo en países como Colombia donde la producción percapita de residuos sólidos es superior a 0.70 kg/hab./día, y en donde aun no existe un apropiado manejo de los residuos sólidos por parte de la población, y la industria, ni tampoco una educación encaminada hacia la conservación del medio ambiente, y en donde las políticas y leyes ambientales han surgido recientemente y no son aplicadas por todos los entes de la Nación. Son estas las principales razones para que aun existan botaderos en algunos Municipios en los cuales no se controla la disposición de los residuos sólidos urbanos, compuestos principalmente por residuos de tipo domestico e industrial, ni tampoco los subproductos que estos generan como lixiviados, los cuales se infiltran en el suelo, las fuentes de aguas superficiales y subsuperficiales, ocasionando un grave impacto a la flora y fauna circundante, y daños irreparables a todos los componentes del medio regional.

En el Municipio de San Juan de Pasto contrario a lo mencionado se cuenta con un buen servicio de recolección y disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) en el relleno sanitario Antanas por parte de la empresa metropolitana de aseo EMAS S.A. E.S.P. El manejo de los subproductos como el lixiviado producido se realiza teniendo en cuenta las normas estipuladas en la actualidad.

La producción de lixiviado su calidad y cantidad dependen de un gran numero de factores como : composición de los residuos y calidad de reciclaje, diseño y especificación del sitio de disposición, grado de compactación de los residuos , altura del encerramiento como procesos de conversión microbiológica y química, interacción del lixiviado con el medio ambiente, naturaleza del suelo (topografía, almacenamiento del agua por el suelo, litología y concentración de materia

orgánica y organismos vivos) y condiciones climáticas ( temperatura, evaporación, pluviosidad)

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.

El tratamiento biológico de aguas residuales pretende promover la eliminación de partículas coloidales no sedimentables, la estabilización de la materia orgánica, y en algunos casos, la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Dicho proceso se puede llevar a cabo aeróbicamente donde el principal subproducto es biomasa (lodo), o anaerobicamente en el cual el producto remanente es el biogás (metano) y una porción mucho menor de lodo, los dos procesos se han utilizado para el tratamiento de lixiviados, obteniendo resultados mucho mejores con la utilización de una etapa anaerobia sola o combinada con un tratamiento biológico complementario la cual representa ventajas económicas y técnicas al requerir de menor área de construcción, menor producción de lodos y consumo de energía limitada, además de la obtención de biogás que puede utilizarse como energía alternativa.

Es esta la razón por la cual con esta investigación se pretende colaborar con el desarrollo ambiental y la preservación del entorno de la región, diseñando un sistema anaerobio que permita reducir la contaminación que poseen los lixiviados, utilizando áreas menores de trabajo, optimizando el sistema de depuración que pueda aplicarse en los diferentes rellenos sanitarios en regiones en las cuales se cuenta con áreas reducidas de trabajo para el manejo de residuos sólidos.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir, y poner en marcha en su etapa inicial un reactor UASB (reactor anaerobio de flujo ascendente) a escala real, para el tratamiento de lixiviados provenientes del relleno sanitario “Antanas” de San Juan de Pasto .

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar el reactor UASB, y estructuras necesarias para su correcto funcionamiento
- Determinar los parámetros iniciales de funcionamiento del reactor
- Controlar los parámetros de funcionamiento del reactor mediante ensayos de laboratorio para su óptimo desempeño
- Determinar la eficiencia del reactor mediante ensayos de laboratorio en una primera fase
- Controlar la dilución lixiviado – agua mediante ensayos de laboratorio y determinar la dilución más óptima para el desempeño del reactor
- Observar el comportamiento del lixiviado tratado en el reactor durante el transcurso de la etapa inicial, con respecto a los parámetros en estudio como: Ph, temperatura, SST, DQO, DBO, alcalinidad, AGV, fósforo y nitrógeno.

- Comparar los resultados obtenidos en el tratamiento de lixiviado con el reactor UASB, y el tratamiento utilizado actualmente en el relleno con lagunas.

#### **4. RELLENO SANITARIO ANTANAS**

Debido a la urgente necesidad de manejar los residuos sólidos adecuadamente se creó el Relleno Sanitario Antanas, catalogado como un Centro Integral de Tecnología Ambiental. Ubicado a 13 kilómetros del municipio de San Juan de Pasto sobre la variante Daza – Buesaco en la vereda La Josefina del corregimiento de Morasurco, presenta una temperatura promedio de 14°C a una altura de 2750 msnm (metros sobre el nivel del mar) y una pluviosidad de 1300 milímetros por año.

El área total del lote Antanas es de 100 Ha (hectáreas), proyectándose 30 Ha para la disposición final de los residuos sólidos, estimándose una vida útil de 28 años.

Recibe residuos desde abril de 2001. En días de trabajo (lunes a sábado) ingresa un promedio de 210 toneladas manejando una compactación de 0.9 tonelada por metro cúbico, es decir diariamente ocupa aproximadamente 230 metros cúbicos de volumen en el relleno. Recibe residuos sólidos de los Municipios de Pasto, Buesaco, Nariño, Tangua, Imues, Samaniego y Sibundoy en el Departamento del Putumayo.

##### **4.1 ADECUACION DEL RELLENO**

- Descapote y limpieza de material vegetal (solo en el área requerida).
- Conducción de aguas superficiales (si las hay) haciendo uso de filtros tipo francés.
- Excavaciones preliminares dejando listos los niveles adecuados para la impermeabilización.
- Impermeabilización total del área de disposición con geomembrana de 1.0 milímetro de espesor (sintético de altas especificaciones resistente a la corrosión y punzonamiento) para evitar la infiltración de lixiviados al suelo y a las aguas conducidas bajo esta.

- En el relleno se construyó una red tipo malla para conducción de lixiviado (líquido producido por la degradación del material biodegradable) sobre la geomembrana, de tal modo que sea conducido a un punto adecuado para iniciar su tratamiento.
- A nivel de esta malla de drenaje se llenan los vacíos sobre la geomembrana con tierra de baja permeabilidad de modo tal que el lixiviado solo drene por los filtros.
- A partir de determinados puntos (donde se interceptan las líneas de la malla de drenaje de lixiviado) se inicia el levantamiento de chimeneas para la evacuación del gas producido en la degradación de los residuos, las cuales consisten en una columna de piedra rajón que para sostenerla es rodeada con malla gavión, estas columnas van creciendo a medida que va creciendo la altura de la masa de residuos, estas chimeneas también facilitan el drenaje de líquido lixiviado hacia la red de conducción en el fondo del relleno

## **4.2. ETAPAS DE OPERACIÓN DEL RELLENO**

**4.2.1 Pesaje:** En el Relleno Sanitario Antanas se cuenta con una báscula electromecánica en la entrada del relleno para realizar el pesaje de todos los residuos sólidos que son dispuestos como se puede observar en la Figura No 1. Además se cuenta con una báscula de emergencia manual. El objetivo del pesaje es tener control diario de la cantidad de residuos que entran en el relleno. Se pesa el compactador ocupado y desocupado, la diferencia de peso determina las toneladas que ingresan.



**Figura No. 1: Área de pesaje Relleno sanitario Antanas**

**4.2.2.Descarga y confinamiento de residuos:** En la figura No 2 se observa como los residuos sólidos descargados son ubicados y compactados mediante el trabajo de un buldózer en un lugar específico el cual se denomina celda diaria alcanzando una densidad de compactación de 0.95 ton/m<sup>3</sup>.



**Figura No. 2 : Descargue de residuos**

**4.2.3. cubrimiento de residuos:** El área de disposición a excepción de la celda diaria de disposición (lugar donde trabaja el buldózer diariamente) es cubierta con plástico principalmente con el fin de evitar que las aguas lluvias se infiltren, se incorporen en la masa de residuos y así incrementen el caudal de lixiviados, como se observa en la Figura No 3. Esta técnica también es útil para mitigar olores, llegada de gallinazos y vuelo de papeles debido a los vientos.



**Figura No. 3: Cubrimiento de residuos**

**4.2.4. Control de gases producidos:** En la figura No 4 se observa las chimeneas usadas para mitigar el olor debido al gas producido, las chimeneas que presentan alta evacuación de gas son encendidas de tal forma que el gas se consume en la combustión. La composición normal del gas en un relleno sanitario es de 60% Metano ( $\text{CH}_4$ ), 30% Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el 10% restante de trazas (concentraciones pequeñas) de otros gases, por esta razón este gas es un buen combustible así que en la empresa ya se esta pensando en buscar formas apropiadas para su uso.



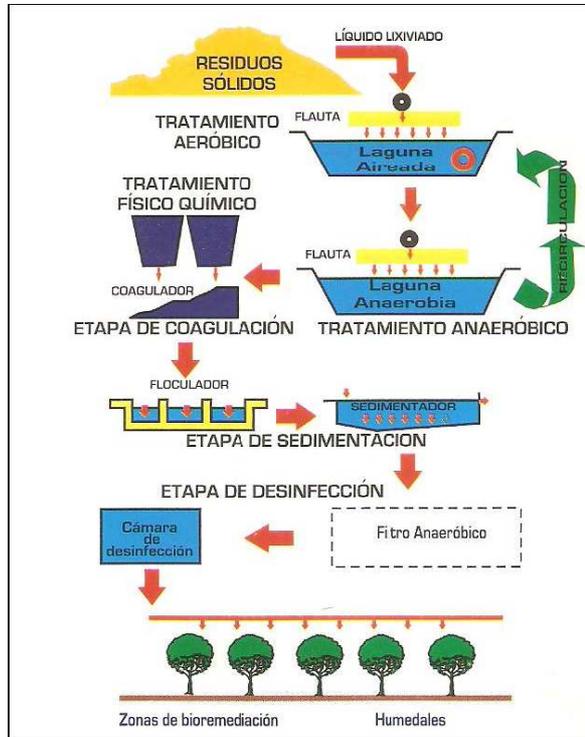
**Figura No. 4: Chimenea para control de gases**

**4.2.5. Control de aguas lluvias:** Se tiene control de aguas lluvias con canales transitorios en el área de disposición (sobre el plástico) los cuales las conducen a cunetas permanentes visualizadas en la Figura No 5. El agua lluvia finalmente se descargadas en una fuente hídrica.



**Figura No. 5: Canaletas recolección aguas lluvias**

#### 4.2.6. Planta de tratamiento de lixiviados



**Figura No6: Etapas de tratamiento de lixiviado en el Relleno sanitario Antanas**

El lixiviado recolectado mediante la red de drenaje y las chimeneas para extracción de gas a una caja de inspección desde donde es conducido por una tubería PVC de 6" e ingresa a la planta de tratamiento:

La Figura No 6 muestra un esquema del tratamiento realizado al lixiviado.

El caudal promedio de lixiviado generado por toda la masa de residuos sólidos es de 0.7 l/s en verano y de 1 l/s en invierno.

##### 4.2.6.1. Tratamiento biológico

**4.2.6.1.1. Laguna aerobia:** Bacterias aerobias degradan material biodegradable.

Para inyectar oxígeno en esta laguna trabaja un aireador superficial que mediante una hélice giratoria proporciona el oxígeno requerido como se observa en la Figura No 7 . Las dimensiones de la laguna son: 17mx17m x 2.8m de profundidad.

El mantenimiento de esta laguna requiere evacuación de espumas las cuales se llevan a los lechos de secado.



**Figura No. 7. Piscina Aerobia**

**4.2.6.1.2. Laguna anaerobia:** Bacterias anaerobias degradan material biodegradable, este tratamiento se basa en un largo tiempo de retención (aproximadamente 30 días) en total ausencia de oxígeno, la laguna se observa en la Figura No 8.

Actualmente se alimentan las Bacterias con nutrientes para una mejor degradación estos nutrientes son D.AP. Y UREA.

Se conecta una bomba que recircula durante 11 horas parte del lixiviado desde la laguna anaerobia a la aireada teniendo así el volumen recirculado doble tratamiento y ayudando a regular temperatura en la primera laguna.

El lixiviado efluente de la laguna anaerobia ingresa a un tanque de igual profundidad, trabajando así la laguna y este tanque como vasos comunicantes (la altura de lixiviado en la laguna es la misma que la altura del líquido en el tanque) este tanque esta dotado de un censor que da paso de lixiviado cuando la altura de la lámina de lixiviado sobrepasa determinado punto y cierra el paso cuando la

lámina de lixiviado esta por debajo de otro punto determinado, estos puntos garantizan que la planta fisicoquímica trabaje mínimo 8 horas a 1L/s.



**Figura No. 8. Piscina Anaerobia**

**4.2.6.2. Tratamiento fisicoquímico:** Posteriormente se cuenta con una válvula reguladora de caudal, la cual dosifica constantemente 1 litro por segundo para que el lixiviado ingrese al tratamiento fisicoquímico (coagulación).

Anteriormente se agregaba cal para subir el pH porque la coagulación requiere de pH neutro ( $\text{pH} = 7$ ), actualmente no es necesario agregarla porque el pH del lixiviado se incrementó y es suficiente para que el lixiviado reaccione adecuadamente con el coagulante (sulfato de aluminio sólido), hoy está en un valor de 8 y se tienen buenos resultados con el coagulante

**4.2.6.2.1. Coagulación:** Se agrega sulfato de aluminio el cual se mezcla con el lixiviado mediante resalto hidráulico como se observa en la Figura No 9.



**Figura No. 9.: Coagulador**

**4.2.6.2.2. Floculación:** Se cuenta con tanques con paletas giratorias para formar conglomerados o floc (partículas de mayor tamaño y densidad) como se muestra en la Figura No 10. el sulfato de aluminio es dosificado (coagulación) en un punto específico donde se realice turbulencia completa para que este se mezcle completamente con el lixiviado, posteriormente el lixiviado ingresa a los floculadores, con paletas que giran a una velocidad necesaria para formar conglomerados o floc (partículas de mayor tamaño y densidad) al hacer reaccionar los polos (+) con los polos (-) de otras, las revoluciones de las paletas son de 16, 12 y 8 rpm.



**Figura No. 10. : Floculadores**

**4.2.6.2.3. Sedimentadores:** El lixiviado se conduce a los sedimentadores mostrado en la Figura No 11, en ellos las partículas (floc) formadas en la floculación se sedimentan para posteriormente ser conducidas a los lechos de secado mediante una bomba sumergible.



**Figura No. 11. : Sedimentador**

**4.2.6.2.4. Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA):** Es un filtro anaerobio de flujo ascendente en el que se lleva a cabo un proceso para remover aún mas la carga contaminante que lleva el flujo.

**4.2.6.3. Lechos de secado:** Diariamente se sacan la espumas generadas en la primera laguna y se llevan a los lechos de secado, que se observan en la Figura No 12 a estos también se llevan las natas y los lodos del sedimentador, donde aproximadamente después de 2 meses ya están secas y se obtiene un lodo seco que sirve como regenerador de suelos pero solo para siembra de plantas y árboles ornamentales no comestibles.



**Figura No. 12. :Lechos de Secado**

El porcentaje de remoción promedio de la planta de tratamiento es de aproximadamente 85%

**4.2.6.4. Zona de bioremediación:** Posteriormente el lixiviado es conducido hasta las zonas de bioremediación mostrada en la Figura No 13 donde se utilizan diferentes especies vegetales para la absorción y depuración del mismo.



**Figura No. 13.: Zona de Bioremediación Alta**

#### 4.2.6.5. Otras áreas

**4.2.6.5.1. C.E.P.A.:** Para evaluar la capacidad de remoción de los diferentes sistemas de tratamiento de lixiviados, se creó el Centro Experimental Piloto Antanas (CEPA), figura No 14, modelo que reproduce el proceso actual de la planta de tratamiento, con variaciones en el componente biológico y que utiliza los reactores sulfidogénico y metanogénico.



**Figura No. 14.: Centro Experimental Piloto Antanas**

**4.2.6.5.2. Laboratorio:** El relleno cuenta con un laboratorio para análisis fisicoquímico de lixiviado y del agua que pasa por el fondo del relleno y de las fuentes aledañas al lote Antanas, este se muestra en la figura No 15. En este laboratorio se realizan análisis de pH, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos sedimentables, turbiedad, cloro residual y ensayos de jarras (para elegir la dosis adecuada de coagulante a dosificar).

El aireador, los motores de los floculadores, tanques dosificadores y sistema de regulación de caudal funcionan automáticamente.



**Figura No. 15.: Laboratorio**

## 5. LIXIVIADOS

Son producto de la descomposición de residuos sólidos, los líquidos lixiviados se forman mediante el percolado de líquidos (como por ejemplo, agua de lluvia) a través de sustancias en proceso de descomposición. El líquido, al fluir, disuelve algunas sustancias y arrastra partículas con otros compuestos químicos como se observa en la figura No 16. Los ácidos orgánicos formados en ciertas etapas de la descomposición contenidos en el lixiviado (como ácido acético, láctico o fórmico) disuelven los metales contenidos en los residuos, transportándolos con el lixiviado (Friends of the Earth, 1996).



**Figura No. 16.: Lixiviado relleno sanitario Antanas**

### 5.1. COMPOSICIÓN DE LOS LIXIVIADOS

La composición de los lixiviados varía mucho de acuerdo al tipo de residuos, las precipitaciones en el área, las velocidades de descomposición química u otras condiciones del lugar. Sin embargo, hay tres grupos de sustancias que se encuentran generalmente en las cercanías de los rellenos.

**5.1.1. Compuestos orgánicos volátiles:** Los Compuestos Orgánicos Volátiles son compuestos formados básicamente por átomos de carbono e hidrógeno que se

evaporan fácilmente. A continuación se detallan los compuestos orgánicos volátiles más comunes de encontrar en los líquidos lixiviados.

- Benceno
- Cloroformo
- Etilbenceno capaz de producir mutaciones
- Cloruro de metileno Posible cancerígeno
- Tetracloroetileno Probable cancerígeno
- Tolueno Posible mutagénico y cancerígeno
- Tricloroetileno
- Cloruro de vinilo: Cancerígeno; mutagénico
- Xileno

**5.1.2. Metales:** Los metales contenidos en los residuos depositados en los rellenos, debido al carácter ácido de los líquidos lixiviados, son disueltos y transportados. Algunos de los metales que se encuentran en los rellenos son:

- Arsénico Cancerígeno cardiovascular
- Cadmio Probable cancerígeno
- Cromo -Cancerígeno
- Plomo Probable teratogénico
- Mercurio
- Níquel

**5.1.3. Otras sustancias químicas:** Otros compuestos químicos que pueden encontrarse dentro de los lixiviados son los compuestos orgánicos sintéticos y alcoholes. Algunos de estos son:

- Lindano: producen daños en el sistema reproductor y nervioso; posible cancerígeno
- Pentaclorofenol: Posible mutagénico y teratogénico, irritación en los ojos, la piel y en los pulmones; daños en el hígado y el riñón<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> COLLAZOS PEÑALOSA HECTOR, Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios. Escuela Colombiana de Ingeniería. Segunda edición 2005. Paginas 40-43

## 6. PROCESO ANAEROBIO

Consiste en la descomposición u oxidación de los compuestos orgánicos en ausencia de oxígeno libre, para obtener la energía requerida para el crecimiento y el mantenimiento de los organismos anaerobios.

El proceso anaerobio es menos eficiente en producción de energía que el proceso aerobio, puesto que la mayoría de la energía liberada en el catabolismo anaerobio proveniente de la sustancia descompuesta aun permanece en los productos finales orgánicos reducidos como el metano, generándose una cantidad de biomasa mucho menor que la producida en el proceso aerobio, en condiciones normales de presión y temperatura el metano escapa hacia la atmósfera y el resto de la energía queda a disposición de los microorganismos para su uso en los procesos metabólicos

***Proceso anaerobio → Energía = Biomasa + calor + metano para anaerobio***

### 6.1. COMPARACIÓN ENTRE EL PROCESO ANAEROBIO Y AEROBIO

#### 6.1.1. Ventajas de la biotecnología anaerobia

- ✓ Producción de subproductos utilizables (metano) asegurando beneficios económicos y ecológicos
- ✓ Baja tasa de síntesis celular lo cual ocasiona menor producción de lodos para disponer, disminuyendo costos
- ✓ El lodo producido es razonablemente estable y puede secarse y disponerse por métodos convencionales
- ✓ Minimización de costos de operación al no requerir oxígeno
- ✓ Eliminación de gases de salida disminuyendo contaminación del aire
- ✓ Minimización de la formación de espumas en aguas residuales por agentes sulfatantes
- ✓ Biodegradación de sustancias no biodegradables aeróbicamente
- ✓ Reducción en los niveles de toxicidad en los compuestos órgano – clorados
- ✓ Acepta altas cargas hidráulicas y orgánicas

### **6.1.2. Desventajas de la biotecnología anaerobia**

- ✓ Requerimiento de grandes periodos de arranque para desarrollar una mínima biomasa
- ✓ El medio es corrosivo
- ✓ Generación de sulfuros y olor por la existencia de sulfatos
- ✓ La nitrificación no es posible
- ✓ Bajas tasas cinéticas en bajas temperaturas
- ✓ Mayor toxicidad de los compuestos órgano clorados
- ✓ Alta concentración de  $\text{NH}_4$  (40 -70 mg/L) como nutriente requerido para una máxima actividad de la biomasa
- ✓ Inestabilidad que dificulta su operatividad

### **6.1.3. Comparación entre biotecnología anaeróbica y aeróbica**

- ✓ Requerimientos de nutrientes de solo 5 al 20 % de los requeridos para procesos aerobios
- ✓ La biomasa anaerobia es preservada por meses o años sin serios deterioros de su actividad
- ✓ Los procesos anaerobios no requieren energía de aireación contrario a los 500 – 2000 Kw /1000 Kg de DQO de los procesos aerobios
- ✓ Tasas de síntesis de biomasa de solo el 5 al 20% de los requerimientos para procesos aerobios
- ✓ Tasas de cargas orgánicas volumétricas entre 5 – 10 veces mas altas que los procesos aerobios

## 6.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ANAEROBIO

La conversión anaerobia de un material complejo consta de una serie de etapas en serie o serie paralelo en la cual se involucran muchos tipos de bacterias que hacen posible la descomposición anaerobia de la mayoría de los compuestos que contengan oxígeno en sus moléculas. Se puede considerar el proceso anaerobio como la descomposición de la materia orgánica representada generalmente en carbohidratos, proteínas y lípidos mediante procesos de desnitrificación de nitratos, respiración de sulfatos, hidrólisis y fermentación acetogénica y metanogénica, el proceso anaeróbico se encuentra integrado por la fermentación de ácido y fermentación de metano las cuales se integran entre sí. Dentro de la fermentación ácida, los compuestos orgánicos complejos (grasas, carbohidratos y proteínas), son primero hidrolizados en unidades moleculares más pequeñas y sometidas a biooxidación para convertirlos en ácidos orgánicos de cadena corta como ácido acético, propiónico, butírico, hidrógeno y CO<sub>2</sub>.

En la fermentación metanogénica, los microorganismos metanogénicos, en condiciones anaeróbicas convierten los productos de la fermentación ácida en CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.<sup>2</sup>

## 6.3. ETAPAS DEL PROCESO ANAEROBICO

**6.3.1. Hidrólisis:** Los polímeros se convierten en monómeros mediante microorganismos o bacterias hidrolíticas, los compuestos orgánicos presentes en el agua residual deben sufrir una hidrólisis inicial para convertirse en sustratos orgánicos simples así:

- a) Hidrólisis de las proteínas a aminoácidos por bacterias proteolíticas
- b) Hidrólisis de carbohidratos a azúcares por bacterias glucolíticas

---

<sup>2</sup> ROMERO ROJAS JAIRO ALBERTO. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Escuela colombiana de Ingeniería Segunda edición 2002, Páginas 235 a 239

c) Hidrólisis de lípidos a ácidos grasos a alcoholes por bacterias lipolíticas

**6.3.2. Acidogénesis o fermentación:** Conversión de monómeros a hidrogeno, dióxido de carbono ácidos grasos volátiles y productos como etanol o ácido láctico mediante la acción de bacterias fermentativas.

Una vez ocurrida la hidrólisis las bacterias acidogénicas toman los polímeros simples y los descomponen internamente después de ser hidrolizados en unidades moleculares más pequeñas y sometidos mediante los procesos metabólicos como bioxidación para convertirse en ácidos orgánicos de cadena corta. El azúcar entra, por ejemplo a la glucólisis. El producto final en condiciones anaerobias, depende de la concentración de hidrógeno, si la presión es bajo el producto será ácido acético y en caso contrario, ácido propionico, ácido butírico y ácido valérico. Paralelamente se produce hidrógeno

**6.3.3. Homoacetogénesis – Acetogénesis:** En esta fase se metabolizan los productos terminales de la etapa acidogénica como alcoholes, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos, los microorganismos que intervienen en esta fase se caracterizan por la formación de acetato, dióxido de carbono e hidrógeno.

Existen, dos precursores del metano, el ácido acético y el hidrogeno de tal forma que los demás productos de la fase anterior deben ser necesariamente transformados a estos dos para la génesis del metano. La acidogénesis siempre produce hidrógeno como subproducto cuya concentración se convierte en un elemento regulador del metabolismo del proceso. De nuevo la realización de esta fase esta fuertemente influenciada por las condiciones medio ambientales especialmente por la presión parcial de hidrogeno. Así el metabolismo acetogenico se caracteriza por una dependencia absoluta de la eliminación del hidrogeno por las bacterias que lo utilizan como pueden ser bacterias metanógenas o sulfatoreductoras en presencia de sulfatos.

**6.3.3.1. Acetogénesis acidoclástica:** Como los AGV (ácidos grasos volátiles) distintos del ácido acético son productos finales de la acidogénesis en ciertas condiciones, y a partir de ciertos sustratos básicos es necesario su conversión a ácido acético para su posterior metanogénesis, puesto que el ácido acético es la fuente del 70% del metano. Los AGV distintos de acético no pueden convertirse en metano. Existen otros compuestos que se pueden metabolizar a metano directamente, pero no son frecuentes en digestión anaerobia. Los AGV deben metabolizarse a ácido acético antes de efectuarse la metanogénesis.

**6.3.3.2. Acetogénesis Hidrogenoclástica:** Existe la posibilidad de convertir el hidrogeno formado por las reacciones acidogénicas y acetogénicas productoras de hidrogeno en ácido acético. Estas reacciones tienen como función principal el mantener los niveles de hidrógeno en las concentraciones adecuadas consumiéndolo, para que la digestión anaerobia proceda. Esta reacción compite con la metanogénesis hidrogenoclástica por el hidrogeno.

**6.3.4. Metanogénesis:** Constituye la última etapa de la degradación anaerobia las bacterias metanogénica son las responsables de la formación de metano y tiene como sustrato el acetato, o dióxido de carbono e hidrógeno, dentro de esta etapa se realiza la remoción biológica de DBO el cual es convertido en metano

**6.3.4.1 Metanogénesis Hidrogenoclástica:** Las bacterias metanogénicas pueden producir metano a partir del hidrogeno. Esta reacción, con la anterior, mantiene los valores de hidrogeno en valores adecuados para la digestión anaerobia. Es una reacción muy ágil.

**6.3.4.2 Metanogénesis Acetoclástica:** la conversión de ácido acético es la vía principal de producción de metano en la digestión anaerobia. Es una reacción lenta, termodinámicamente difícil, pero inexorable, puesto que es la responsable de la producción de cerca del 70% del metano.

Las bacteria metanogénicas son semejantes a las que se encuentran en el estomago de los animales rumiantes y en sedimentos de lagos y ríos, todas son

de crecimiento muy lento, por lo tanto su tiempo de retención celular debe ser lo suficientemente largo para permitir su crecimiento e impedir su extracción del sistema, se mencionan por lo regular tiempos entre 2 y 20 días y pH de 6,8 a 7,4.

<sup>3</sup>

### **6.3.5. Formación del metano**

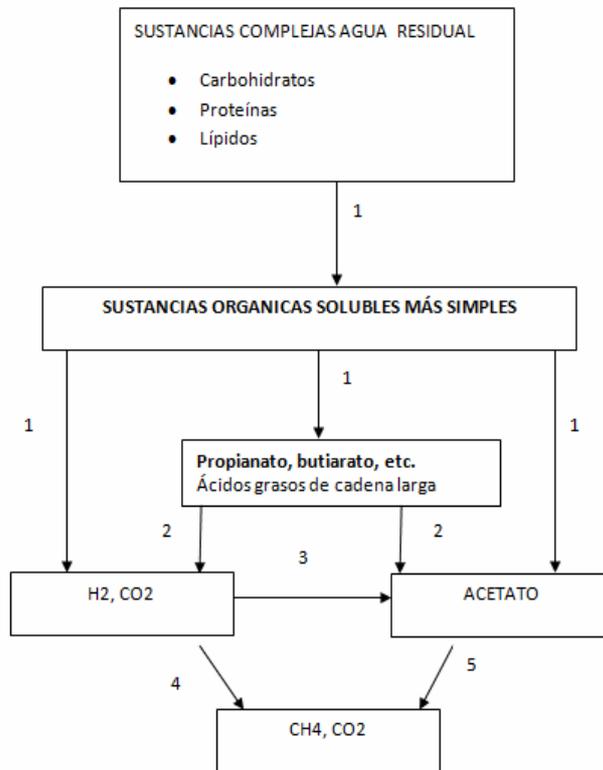
#### **Grupos bacteriales**

- 1 Bacterias fermentativas
- 2 Bacterias acetogénicas productoras de hidrogeno
- 3 Bacterias acetogénicas consumidoras de hidrogeno
4. Bacterias metanogénicas reductoras de CO<sub>2</sub>
- 5 Bacterias metanogénicas acetoclásticas

Ver Figura No 17

---

<sup>3</sup> SALAZAR CANO ROBERTO E. Fundamentos de Tratamientos Anaerobios. Facultad de Ingeniería. Universidad de Nariño 1998, paginas 29 -32

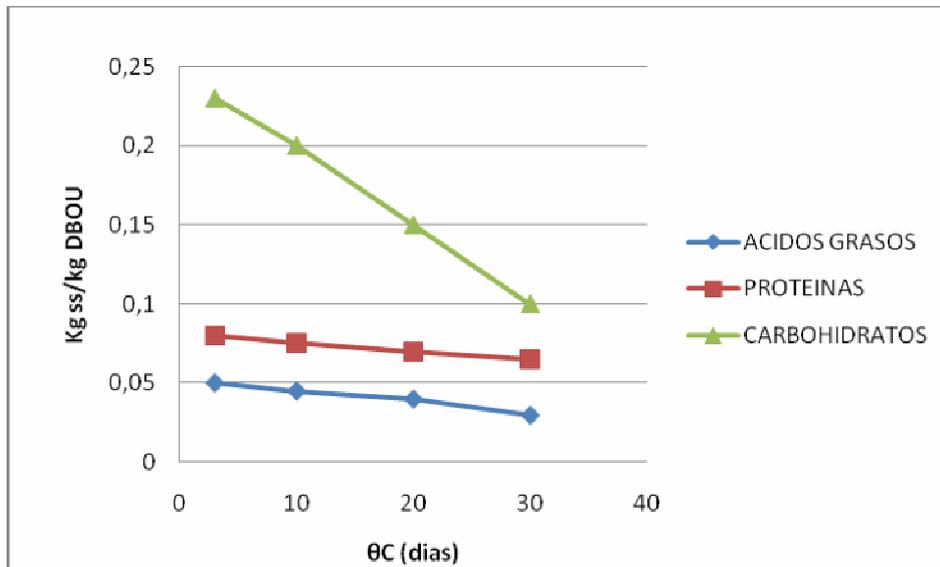


**Figura No 17 : Degradación de la materia orgánica proceso anaerobio <sup>4</sup>**

#### 6.4. CRECIMIENTO BIOLÓGICO ANAEROBIO

Una de las más grandes ventajas del proceso anaeróbico es su baja tasa de síntesis o bajo porcentaje de conservación de materia orgánica en células biológicas, minimizando los problemas de disposición de lodos, lo cual se puede observar en la figura No 18 la cual muestra el crecimiento de los residuos de ácidos grasos, carbohidratos y proteínas, la cual evidencia como conclusión que a mayor edad de los lodos se reduce la producción de lodos

<sup>4</sup> ROMERO ROJAS JAIRO ALBERTO. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería Segunda edición 2002, Pagina 237



**Figura No 18: Crecimiento biológico anaerobio<sup>5</sup>**

## 6.5. CONSIDERACIONES Y RELACIONES IMPORTANTES EN EL PROCESO ANAEROBIO

En resumen en el proceso anaerobio las bacterias acidogénicas y las metanogénicas forman una simbiosis que hace posible el proceso, en el reactor anaeróbico las bacterias metanogénicas y no metanogénicas tienen que estar en equilibrio, el reactor debe carecer de OD, estar libre de sustancias inhibitoras como metales pesados y sulfuros, mantener pH entre 6,5 y 7,5 y debe haber suficiente alcalinidad para prevenir un  $\text{pH} < 6,2$ , valor al cual ya no trabajan las bacterias metanogénicas. De igual manera, como la tasa de crecimiento de las bacterias metanogénicas es lenta, se deben proveer tiempos de retención prolongados. En un digestor de lodos operando apropiadamente la alcalinidad se encuentra entre 1000 y 5000 mg/ L –  $\text{CaCO}_3$  y los ácidos grasos volátiles se encuentran en concentraciones menores a 250 mg/ L, se recomienda también

<sup>5</sup> ROMERO ROJAS JAIRO ALBERTO. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería Segunda edición 2002, Pagina 244

mantener la relación AGV / Alcalinidad menor de 0,8, en cuanto a las recomendaciones generales nutricionales para las bacterias anaeróbicas requieren principalmente, carbono, nitrógeno, hidrogeno y oxígeno, en menor proporción fosforo, azufre, potasio, calcio, hierro y nitrógeno y como suplemento nutricional cantidades mínimas de zinc y molibdeno, generalmente la mayoría de las aguas residuales contienen los requerimientos nutricionales, se recomienda una relación apropiada de DBO/N/P de 100/5/1.<sup>6</sup>

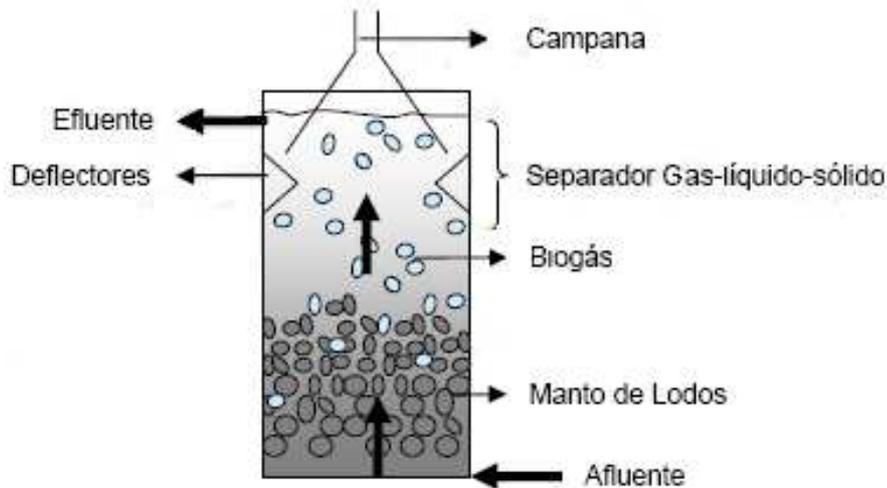
<b>PARAMETRO</b>	<b>CONDICION</b>
Bacterias	Equilibrio dinámico entre no metanogénicas y metanogénicas
Temperatura	Intervalo mesofílico = 29 – 38 °C Intervalo termofílico = 49- 57 °C
Medio	Anaerobio, OD = 0
Nutrientes	N, P, trazas de Ca, Mg, Fe, K, Ni, Co
DBO/N/P/S = 800/7/1/1	Para residuos con DQO > 2500 mg/L
DBO/N/P/S = 300/7/1/1	Para residuos con DQO < 2500 mg/L
pH	7,0 – 7,2 (6,6 – 7,6) ( pH> 6,2)
Composición del gas	65 – 70 % Metano
Producción de gas	1 – 1,25 m <sup>3</sup> / kg SSV destruidos
Alcalinidad	1000 – 5000 mg/ L
Ácidos Grasos Volátiles	< 500 mg/ L – acido acético
POR	7. 490 a – 550 mV

**Tabla No 1. Parámetros recomendados proceso anaerobio<sup>7</sup>**

<sup>6</sup> ROMERO ROJAS JAIRO ALBERTO. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería Segunda Edición 2002, Pagina 251 -252

<sup>7</sup> ROMERO ROJAS JAIRO ALBERTO. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería Segunda Edición 2002, Pagina 253

## 7. REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB): (UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET)



**Figura No. 19: Componentes Reactor UASB**

El primer trabajo publicado de un reactor de lecho suspendido data del año 1910 y se le denominó “tanque biológico”, con tiempos hidráulicos de retención de 8.5 horas. Posteriormente, un nuevo invento se llevó a cabo en 1957 que consistió de un lecho suspendido con separador interno sólido-líquido, seguido de un filtro anaerobio. El reactor UASB, fue desarrollado en Holanda por Lettinga y sus colaboradores en los años 70. El diseño de un reactor UASB consiste en una zona de reacción en la parte inferior, en la que se acumula la biomasa, la de mejor sedimentabilidad en el fondo y encima los lodos mas ligeros.

Corresponde a una de las nuevas tecnologías mas utilizada en el mundo para el tratamiento anaerobio de aguas residuales, su característica principal es retener

biomasa sin necesidad de un soporte gracias a la formación de granos o floculos lo hace mas económico y le da ventajas técnicas frente a otro tipo de reactores avanzados.

Debido a que el reactor UASB esta basado en la correcta sedimentabilidad de los lodos existen algunos factores que pueden condicionar su aplicabilidad, como: la integración adecuada de un sistema completo con el pretratamiento adecuado, una apropiada operación lo que implica un conocimiento de los problemas que se puedan presentar, y consecuentemente del grado de control necesario para el proceso.

El agua es introducida por la parte inferior del reactor dentro del lecho de lodos, donde la mayor parte del residuo es convertido en metano y CO<sub>2</sub>. El gas formado produce la suficiente agitación como para mantener las películas del lecho de lodo en movimiento y conseguir la mezcla total del lecho. Algunas partículas pueden ser elevadas por encima del lecho, pero vuelven a sedimentar cuando se desprenden de las burbujas de gas adheridas

Existen dos tipos de reactores UASB, según el tipo de biomasa. El primer tipo se denomina de lodo granular, como su nombre lo indica se genera lodo granular, que por sus buenas características de sedimentación y actividad metanogénica permite altas cargas orgánicas específicas, el segundo se denomina de lodo flocúleno, que soporta cargas menores tanto orgánicas como hidráulicas.

Sus ventajas se ven reflejadas en la elevada capacidad de tratamiento, en el bajo tiempo hidráulico de residencia, alta eficiencia en la eliminación de DQO, bajo requerimiento energético y su fácil construcción. Sus desventajas radican en el proceso de gradación difícil de controlar, la granulación depende del tipo de agua residual, la puesta en marcha puede requerir lodo granular, sensible a sobrecargas orgánicas, útil para aguas sin sólidos suspendidos.

## **7.1. IDEAS BASICAS SOBRE EL REACTOR**

El concepto del reactor UASB esta basado en las siguientes ideas:

1. El lodo anaeróbico natural tiene buenas propiedades de sedimentación siendo que este no está expuesto a una alta agitación mecánica. En realidad, para satisfacer los requerimientos suficientes del contacto entre lodo y agua residual, el sistema que reemplaza la agitación es el generado por la producción de gas natural.
2. El lodo en el interior del reactor UASB, se encuentra disperso debido a la producción de biogás, los componentes orgánicos de alto peso son retenidos dentro del reactor por la separación del biogás mediante una campana localizada en la parte superior del reactor, por donde el biogás es emitido
3. El propósito del tratamiento anaeróbico UASB es eliminar los componentes de la DQO biodegradable del lixiviado crudo; durante la degradación anaeróbica ocurre la conversión de la DQO del agua residual a gas metano, el cual escapa del sistema por medio de la campana (Separador – gas - sólido – líquido)

## **7.2. SEPARADOR GAS -SÓLIDO – LÍQUIDO**

Consiste en la estructura que divide el reactor en dos espacios: el inferior en el cual se presenta alta turbulencia debido a la presencia de gas y el superior en el cual se presenta la etapa de sedimentación. El separador provee una superficie de contacto entre el sólido y el gas, de modo que los flocs que llegan a dicha superficie puedan transferir el gas que los ayuda a flotar en la atmósfera y sedimentar hacia la cámara principal.

Funciones de la campana de separación:

- Separar y descargar el biogás del reactor
- Impedir el lavado del material bacterial
- Permitir que el lodo resbale dentro del compartimiento del digestor

- Servir como barrera para la expansión rápida del manto de lodos dentro del sedimentador
- Impedir el lavado del lodo granular flotante

### **7.3. LAS PRINCIPALES VENTAJAS:**

- Sistema compacto, utilizando un área de superficie pequeña;
- Prácticamente no se requiere ningún equipo en el proceso anaeróbico, con costos bajos de construcción y operación.
- Consumo de energía muy bajo.
- Produce poco lodo en exceso.
- El lodo de exceso tiene una buena concentración (aproximadamente 5 a 6 por ciento), con buenas características de secado.
- No se requieren aparatos de calefacción en climas cálidos.
- Eliminación de DBO, DQO y SST aproximadamente 45 a 75 por ciento, 55 a 75 por ciento de DBO se eliminan durante el proceso; la concentración de DBO en el efluente se encuentra siempre por encima de 60 mg/L, hasta 120 mg/L.

### **7.4. LAS PRINCIPALES DESVENTAJAS:**

- Posibilidad de malos olores, particularmente en el caso de un mal diseño o fallas operacionales, ya que éste es un proceso con un alto potencial de generación de H<sub>2</sub>S.
- Proceso de granulación difícil de controlar.
- La puesta en marcha puede requerir lodo granular.
- Sensible a sobrecargas orgánicas.
- Útil para aguas sin sólidos suspendidos.

### **7.5. PARAMETROS DE SEGUIMIENTO EN EL REACTOR**

**7.5.1. 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.

**7.5.2. pH:** La influencia del pH sobre la producción de metano está relacionada con la concentración de AGV. Los diferentes grupos bacterianos presentan niveles de actividad satisfactorios a pH próximos pero un poco diferentes; los hidrolíticos entre 7,2 y 7,4, los acetogénicos entre 6,5 y 7,5. Las bacterias metanogénicas disminuyen su actividad si el pH aumenta por encima de 7,8. Cuando la capacidad metanogénica está continuamente sobrecargada y no se añade la base necesaria para neutralizar los AGV presentes, el sistema de tratamiento se convertirá en un reactor de acidificación.

**7.5.3. Alcalinidad:** Cuantifica la capacidad del agua residual de neutralizar ácidos. Se mide en mg de CaCO<sub>3</sub>/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 0,3-0,4 es indicador de fallo inminente en el sistema de digestión anaerobia.

**7.5.4. Ácidos grasos volátiles:** Considerar la producción de ácido fórmico, propiónico, acético, butírico y valérico, es uno de los parámetros de control de los reactores anaerobios que revela específicamente la marcha del proceso, el aumento súbito en el contenido de AGV es indicativo de desestabilización causada por un desacople de las fuerzas cinéticas que lo producen, los AGV actúan como inhibidores del proceso anaerobio, la cantidad de AGV no debe sobrepasar los 5000 AGV/ L. controlando muy bien el pH, puesto que los reactores se inhiben cuando sobrepasan este valor y los niveles de la DQO del efluente se elevan y se debe aumentar el tiempo de residencia para aumentar la degradación, de esta manera la concentración de AGV, pH y alcalinidad son parámetros estrechamente relacionados.

**7.5.5. Relación AGV / alcalinidad:** Un síntoma típico del mal funcionamiento de los reactores es el aumento de la concentración de los AGV en el afluente. La inestabilidad del proceso puede estar relacionada con la sobrecarga del reactor en la cual la producción de AGV por las bacterias acidogénicas aumenta más rápidamente que la degradación de los mismos con la entrada de tóxicos o inhibidores o la elevación de la temperatura, esto tiene como consecuencia la disminución de la actividad metabólica, de esta manera los grupos de bacterias más sensibles a los tóxicos y cambios de temperatura son las bacterias acetogénicas y metanogénicas, en estos casos ocurre que la producción de ácidos orgánicos se hace mayor al consumo de los mismos aumentando la concentración de AGV lo cual disminuye la concentración de bicarbonato encargado de la descomposición de CO<sub>2</sub>, cuando la concentración de CO<sub>2</sub> no es suficiente el pH del sistema empezará a disminuir, según un mecanismo de realimentación positiva que inhibirá progresivamente a las bacterias metanogénicas hasta bloquear completamente el proceso anaerobio acidificando el reactor

La alcalinidad total AT, corresponde a la concentración de (alcalinidad al bicarbonato) AB y AGV

$$AT = AB + AGV$$

Según el manual of Practice de la WPCF se advierte que cuando la proporción AGV/ AT sobrepasa el valor de 0.3 -0.4 el reactor se vuelve ácido<sup>8</sup>

**7.5.6. Caudal y tiempo de retención hidráulica:** El caudal es físicamente de gran importancia ya que mide la velocidad superficial del líquido en el interior del

---

<sup>8</sup> SALAZAR CANO ROBERTO E. Fundamentos de Tratamientos Anaerobios. Facultad de Ingeniería. Universidad de Nariño 1998. paginas 68-70

reactor, condicionando la sedimentación y por lo tanto, la retención de biomasa. Generalmente un incremento en el caudal conlleva a un aumento de carga orgánica aplicada, aumento de producción de biogás y mayor lavado de biomasa; se mide en volumen por unidad de tiempo. La velocidad de flujo superficial se define como la velocidad del líquido que pasa a través del reactor, y se expresa en longitud por unidad tiempo y es igual al caudal sobre el área transversal del reactor. El tiempo de retención hidráulico se expresa en unidades de tiempo, y es el caudal del afluente por unidad de volumen efectivo del reactor; este tiene gran importancia ya que afecta la producción de metano y el contenido de lodo dentro del reactor.

**7.5.7. Sólidos:** La materia suspendida o disuelta que se encuentra en un agua residual recibe el nombre de sólidos. Se divide en tres categorías:

- Sólidos Totales: sedimentables, suspendidos y disueltos.
- Sólidos Suspendidos: porción retenida por el papel filtro de 1,3  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro.
- Sólidos Disueltos: porción que pasa por el papel filtro de 1,3  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro.

Estos a su vez se dividen en fijos (quedan después de la ignición de la muestra) y volátiles (pérdida de peso de la muestra durante la ignición).

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.

Los sólidos suspendidos volátiles (SSV) representan la porción orgánica de los sólidos suspendidos totales (SST); estos últimos representan el parámetro ambiental para el cobro de tasa retributiva

**7.5.8. DBO5:** 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. Se utiliza para el cobro de la tasa retributiva. Medida en el afluente y efluente del reactor permite calcular la remoción del mismo.

**7.5.9. DQO:** Es una medida de la materia orgánica en la muestra, a la cantidad de oxígeno que se puede oxidar químicamente en un medio ácido. Puede relacionarse con la DBO5. La oxidación se realiza con un agente oxidante fuerte en un medio ácido. Tiene la misma importancia que la DBO5.

## **7.6. CONSIDERACIONES DE DISEÑO REACTOR UASB**

Para aguas diluidas (<1500 mg/L DQO) los UASB se diseñan teniendo en cuenta el concepto de tiempo de retención hidráulico, por otro lado en aguas residuales con alta carga contaminante el diseño es impuesto por la carga orgánica volumétrica (COV), que depende de la naturaleza del agua, de la actividad del lodo, así como de la temperatura y la eficiencia del tratamiento deseado.

Existen dos tipos de reactores UASB, según el tipo de biomasa. El primer tipo de reactor se denomina de lodo granular, este posee buenas características de sedimentación y actividad metanogénica que permite altas cargas orgánicas específicas, el segundo se denomina de lodo floculento, que soporta cargas menores tanto orgánicas como hidráulicas.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> CHERNICHARO CARLOS AUGUSTO DE LEMOS. Reactores Anaerobios, Principios do tratamento Biológico de Aguas Residuales Volumen 5. Universidad Federal de Minas Gerais –

**7.6.1. Volumen del reactor:** El volumen del reactor UASB depende de factores como:

- Carga de DQO máxima diaria
- Carga superficial líquida admisible
- La temperatura del agua residual
- La concentración del agua residual
- Las características del agua residual
- La carga volumétrica permisible

Para aguas residuales poco concentradas, con niveles de DQO por debajo de 1000mg/L y temperaturas de operación que excedan los 18-20 ° C, el volumen del reactor ( $V_r$ ) se determina por medio del tiempo de retención hidráulico

$$V_r = TRH \times Q \quad \text{Ecuación [ 1 ]}$$

Q = Caudal de alimentación

Para aguas residuales con mayor concentración de DQO, el volumen del reactor depende sobre todo de la concentración de la misma y de la aplicación de la carga orgánica volumétrica:

$$V_r = \frac{S \cdot Q}{COV} \quad \text{Ecuación [ 2 ]}$$

S = concentración materia orgánica (DQO)

COV = carga orgánica volumétrica

Q = Caudal de alimentación <sup>10</sup>

---

UFMG. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental DESA. Belo Horizonte Brasil. Primera edición 1997 paginas 159

<sup>10</sup> CHERNICHARO CARLOS AUGUSTO DE LEMOS. Reactores Anaerobios, Principios do tratamento Biológico de Aguas Residuales Volumen 5. Universidad Federal de Minas Gerais –

Concentración del desecho mg DQO/l	Fracción insoluble de DQO (%)	Cargas aplicables a 30° C (kg DQO / m3 D)		
		Lodo granular UASB	Lodo floculento UASB Remoción de SST	
			Significativa	Poca
Hasta 2000	0 – 30	2 - 4	8 – 12	2 - 4
	30 – 60	2 – 4	8 – 14	2 – 4
	60 - 100	*	*	*
2000 - 6000	0 – 30	3 – 5	12 – 18	3 – 5
	30 – 60	4 – 6	12 – 24	2 – 6
	60 - 100	4 – 8	*	2 – 6
6000 – 9000	0 – 30	4 – 6	15 – 20	4 – 6
	30 – 60	5 – 7	15 – 24	3 – 7
	60 - 100	6 – 8	*	3 – 8
- 18000	0 – 30	5 – 8	15 – 24	4 – 6
	30 – 60	Dudoso para	Dudoso para	3 – 7
	60 - 100	SST > 6 -8 g/l	SST > 6 -8 g/l	3 – 7
		*	*	

\* Aplicación del proceso UASB no tiene sentido bajo estas condiciones

**Tabla No 2. Cargas volumétricas aplicables en reactores UASB con lodo granular y floculento en relación con la concentración del agua residual y el tamaño de fracción insoluble de DQO de agua residual<sup>11</sup>**

**7.6.2. Altura del reactor:** El reactor se encuentra dividido en dos espacios, el inferior donde ocurren las reacciones de descomposición y uno superior donde ocurre la sedimentación de los sólidos, la altura del primer nivel debe encontrarse entre 4.0 y 5.0 mt. y el superior entre 1.5 y 2 mt., adicional a esto se debe proveer un borde libre de 40 cm.

### 7.6.3. Consideraciones de la campana de separación de gases

- **Inclinación de las paredes:** las paredes de la estructura de separación sólido – gas líquido debe contar con una inclinación de 50 a 60

---

UFMG. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental DESA. Belo Horizonte Brasil. Primera edición 1997 paginas 160 - 162

<sup>11</sup> SALAZAR CANO ROBERTO E. Fundamentos de Tratamientos Anaerobios. Facultad de Ingeniería. Universidad de Nariño 1998. pagina 99

- Tasa de carga superficial: la carga orgánica superficial debe estar alrededor de 0.7 m/h en condiciones de caudal máximo horario
- Velocidad del agua en la garganta: no debe exceder 5 m/h para condiciones de caudal máximo horario
- Área superficial: la abertura del colector de gas debe estar entre 15 y 20% del área superficial del reactor
- La altura del colector del gas debe estar entre 1.5 y 2 mt

**7.6.4. Tiempo de retención hidráulica :** Para aguas residuales municipales el TRH debe ser superior a 6 horas, que puede llevara a una remoción hasta del 80 % en la DBO5, sin embargo la adopción del TRH depende de la temperatura del lugar

Rango de temperatura	Valores de TRH ( horas )		
	Promedio diario	Máximo durante 4 -6 horas	Pico aceptable Durante 2-6 horas
16 -19	> 10 -14	> 7 – 9	> 3 – 5
22 -26	> 7 – 9	> 5 – 7	> + 3
> 26	> 6	> 4	> 2.5

**Tabla No. 3: Tiempos de retención hidráulica reactores UASB**

## 8. REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) A ESCALA REAL RELLENO SANITARIO ANTANAS

El desarrollo de este proyecto de investigación se lleva a cabo haciendo uso de sistema piloto IN- SITU de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB), el cual se desarrolla teniendo en cuenta los parámetros de diseño adecuados para el funcionamiento de un reactor a escala real.

### 8.1 DISEÑO REACTOR A ESCALA REAL

Teniendo en cuenta la concentración del lixiviado es necesario basar el diseño en la COV (Carga Orgánica Volumétrica), determinando los demás parámetros de acuerdo a las recomendaciones de diseño mencionadas, y aquellas adecuadas a las características del lixiviado a tratar.

**8.1.1. Tiempo de retención hidráulica:** De acuerdo a la temperatura del sitio que oscila generalmente entre 13 y 14 grados haciendo uso de la **Tabla No 2** se implementa un TRH de 24 horas debido a la baja temperatura que necesita un mayor tiempo de residencia para activar el funcionamiento del reactor

TRH = 24 horas – 1 DIA

**8.1.2. Diámetro del reactor** Se utilizara una tubería de PVC tipo NOVAFORD de 14 “ de diámetro

DIAMETRO = 14 “– 0,356 MT

### 8.1.3. Altura efectiva del reactor

Espacio para reacciones de descomposición: 4.5 mt

Espacio para reacciones sedimentación, separador solido – gas líquido: 1,5 mt

#### 8.1.4. Caudal de diseño

$$Q = \frac{V}{T} \text{ m}^3/\text{día}$$

Ecuación [ 3 ]

Volumen del reactor:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H \text{ (m}^3\text{)}$$

Ecuación [ 4 ]

H= 4.5 MT

D= 0.356 MT

V = 0,447 m<sup>3</sup>

Q = 0,447 m<sup>3</sup>/ día

**8.1.5. Carga orgánica volumétrica:** De acuerdo a la *Tabla No 3* las cargas aplicables para una concentración de DQO de 6000 a 9000 se debe encontrar dentro de un rango de 4 – 8 para lodo granular conforme a lo que se quiere en el diseño del reactor

$$COV = \frac{Q \cdot S}{V}$$

Ecuación [ 5 ]

S = concentración de DQO ( kg /m<sup>3</sup>)

Q = caudal (m<sup>3</sup>/día)

V = volumen del reactor ( m<sup>3</sup>)

Para el desarrollo del reactor se toman los siguientes valores:

S = 6.5 Kg DQO / m<sup>3</sup>

V= 0,447 m<sup>3</sup>

Q= 0,447 m<sup>3</sup>/ día

COV= 6.5 Kg DQO/ m<sup>3</sup>

#### 8.1.6. Separador gas- solido – liquido

Diámetro del separador: 13 “ = 0.33 mts

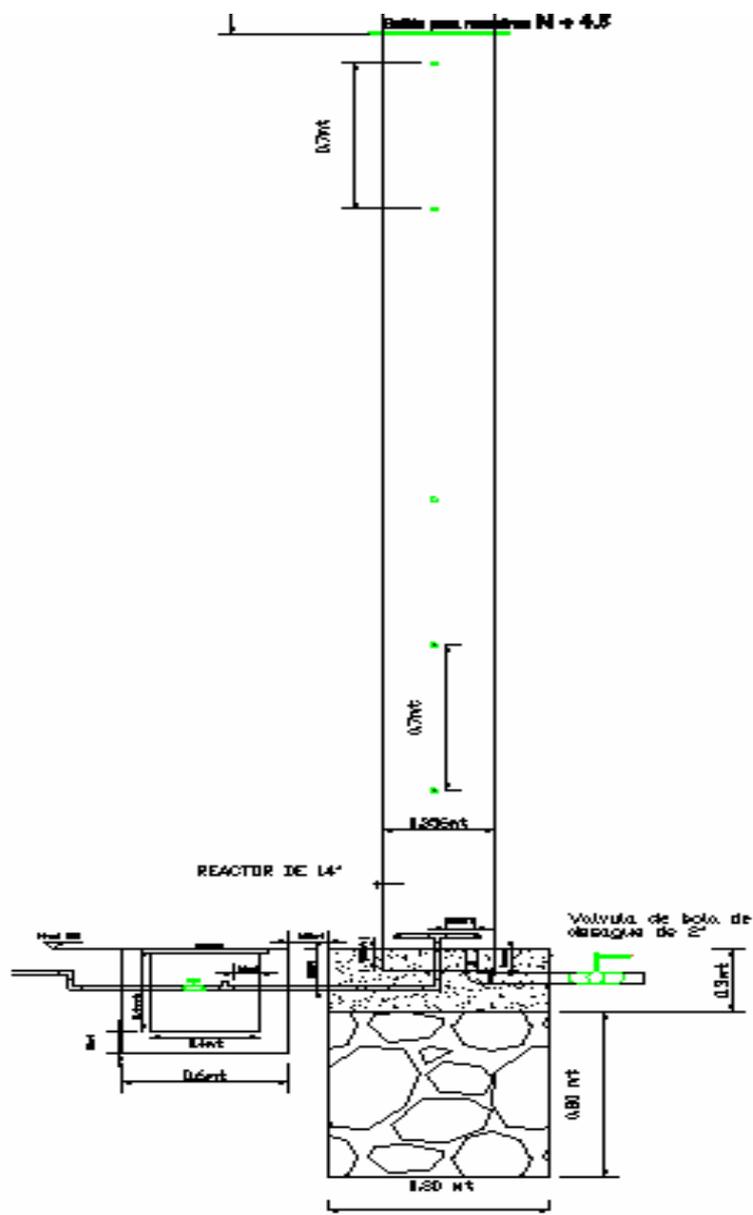
Inclinación de las paredes = 60°

Altura de la campana = 25 cm

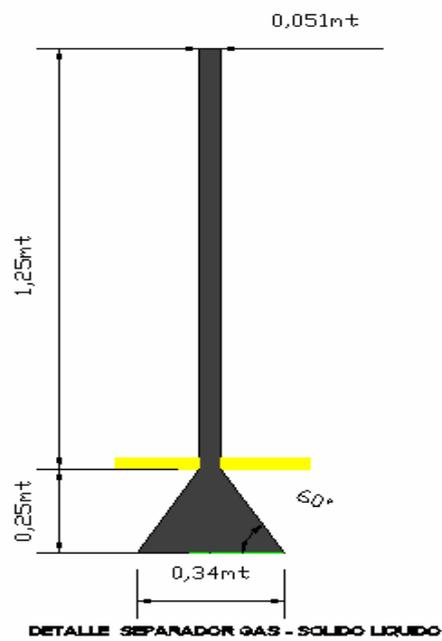
Diámetro salida del gas = 2”

Altura tubería de escape de gas = 1.50 mt s

En la Figuras No 20, No 21 y No 22 se observa el reactor diseñado de acuerdo a los parámetros mencionados anteriormente, de igual manera los planos 1 y 2 de los anexos muestran el diseño del reactor con sus especificaciones.



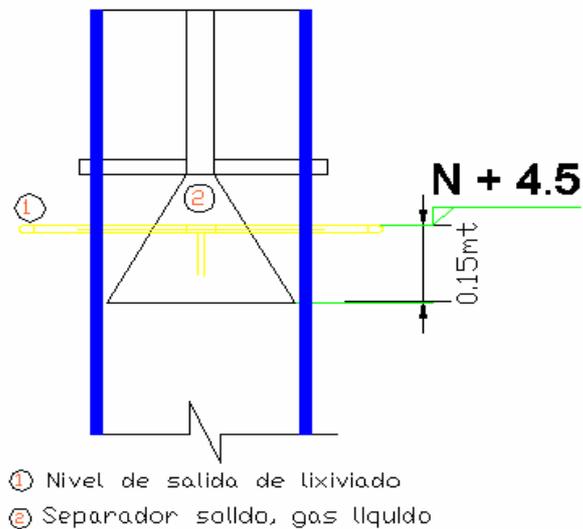
**Figura No. 20: Diseño reactor parte superior**



**Figura No. 21** Diseño separador solido – gas – liquido

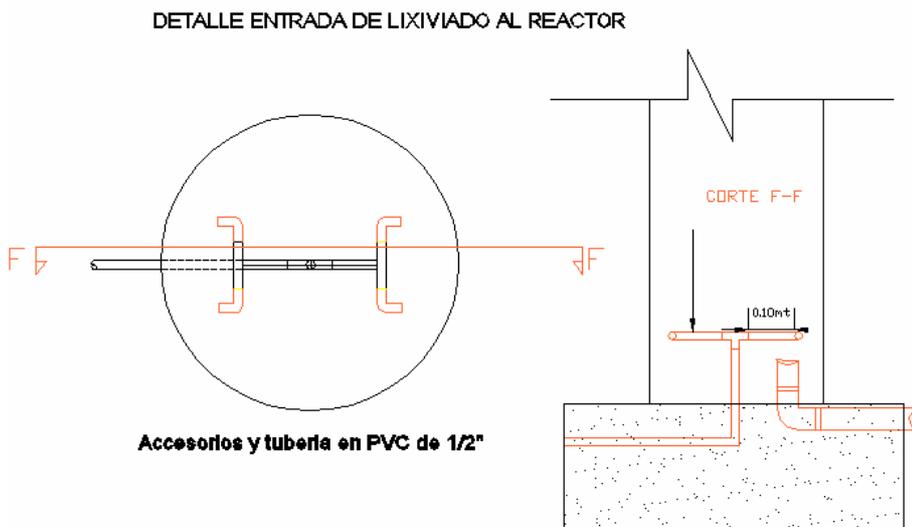
**DETALLE EVACUACION LIXIVIADO TRATADO ,  
SEPARADOR GAS- SOLIDO LIQUIDO**

Evacuacion de agua N+ 4.5 en PVC de 1/2"



**Figura No. 22** Diseño separador solido – gas – liquido

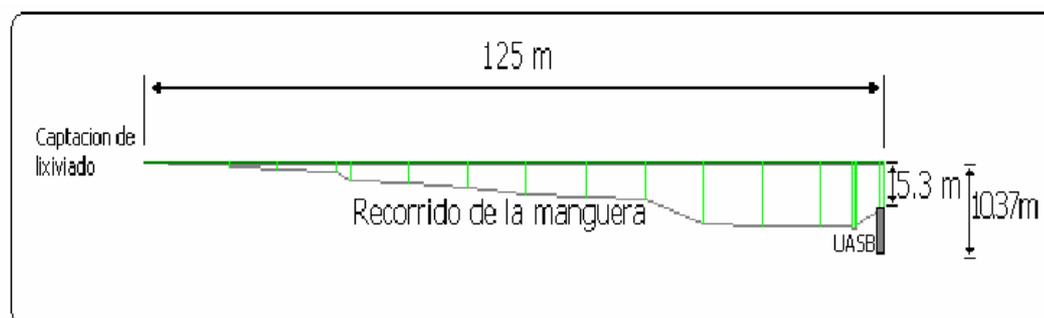
**8.1.7. Distribución de lixiviado al reactor:** La alimentación del reactor se realiza desde la parte inferior por medio de una base fijada al suelo en concreto en la cual se coloca una tubería de PVC de 1/2" que ingresa al reactor la cual se ramifica por medio de accesorios para homogenizar la entrada del lixiviado. Ver figura No 23



**Figura No. 23 Detalle de entrada al reactor**

**8.1.8. Localización del reactor:** Debido a que la entrada del reactor debe realizarse por la parte inferior, este se debe ubicar en un lugar que tenga la suficiente diferencia de nivel para poder garantizar la entrada y la salida del lixiviado, es decir se debe garantizar como mínimo una diferencia de seis metros entre la fuente de alimentación del reactor y la entrada del mismo, ya que la alimentación del reactor se realizara de la laguna de excesos anaerobia ubicada en la parte superior del relleno, se debió buscar un lugar ubicado en la parte inferior para ello se realizo un trabajo topográfico con la ayuda de un nivel de precisión, mira y cinta con el fin de encontrar un sitio estable que garantice la optima alimentación del reactor. Tras la realización del levantamiento topográfico se estable el sitio de localización a ciento veinticinco metros de la laguna anaerobia de exceso, con una diferencia de niveles de diez metros entre la base del reactor y la parte superior

Ver figuras No 24 y 25



**Figura No 24: Diagrama del levantamiento topográfico**



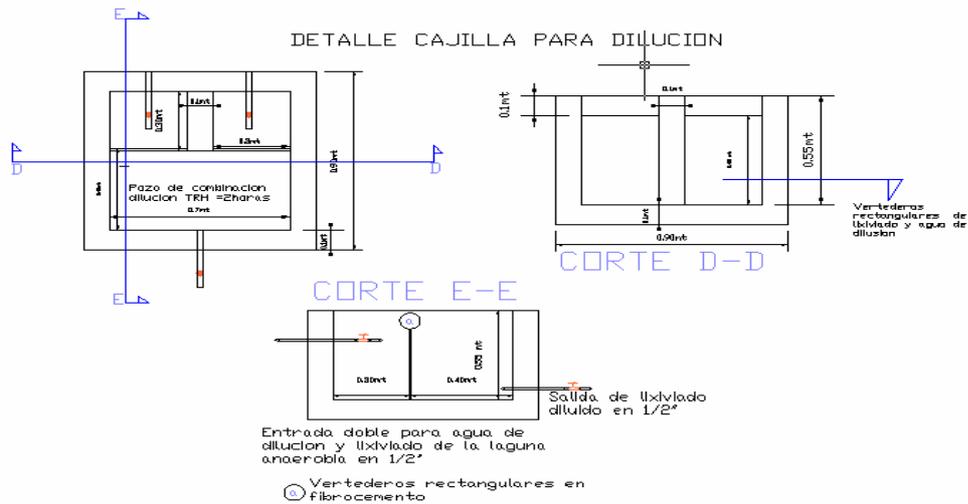
**Figura No 25. : Sitio construcción**



**Figura No 26. : Laguna anaerobia excesos**

**8.1.9. Estructuras de entrada reactor**

**8.1.9.1. Cajillas de entrada de lixiviado para dilución:** Ubicada en la salida de la laguna de excesos anaerobia su función radica en la de realizar la dilución agua lixiviado para la alimentación del reactor, de igual manera la de servir como control de caudal agua lixiviado, controlando la entrada del lixiviado al reactor por medio de vertederos de control y válvulas de salida de agua y lixiviado que controlaran las diferentes diluciones del reactor.

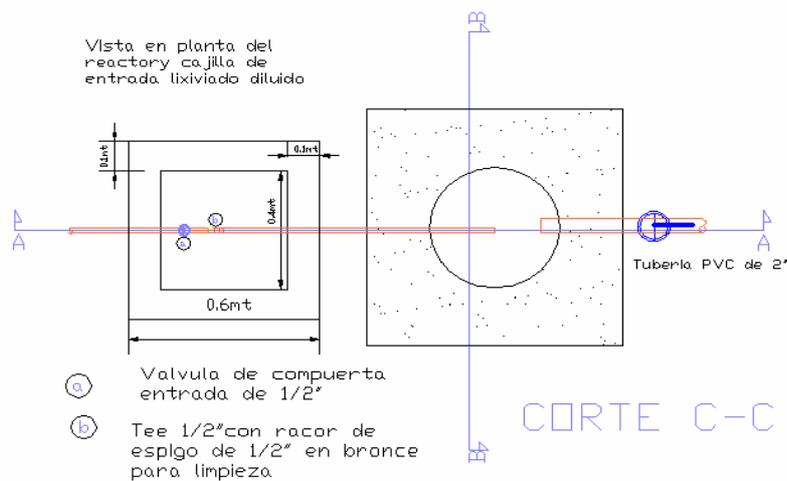


**Figura No 27 Cajilla de dilución de lixiviado**



**Figura No 28 Cajilla de dilución de lixiviado construida**

**8.1.9.2. cajilla de control de caudal y muestreo lixiviado disuelto:** Ubicada cerca de la entrada del reactor está diseñada para controlar el caudal que ingresa al reactor, toma de muestras de control del afluente del reactor y como sistema de purga para cuando se presenten taponamientos en la conducción desde la cajilla de entrada de dilución hasta esta cajilla.



**Figura No 29 Cajilla de control de caudal y muestreo lixiviado de entrada**



***Figura No 30 Cajilla de control de caudal y muestreo lixiviado de entrada construida***

**8.1.10. Conducción lixiviado al reactor:** La conducción del lixiviado se realiza por medio de manguera de PVC de  $\frac{1}{2}$ " ubicada desde la cajilla de dilución hasta de cajilla de control de caudal y muestreo, en una longitud aproximada de ciento diez metros, enterrada del nivel del suelo sesenta centímetros, llevando la pendiente natural del terreno.



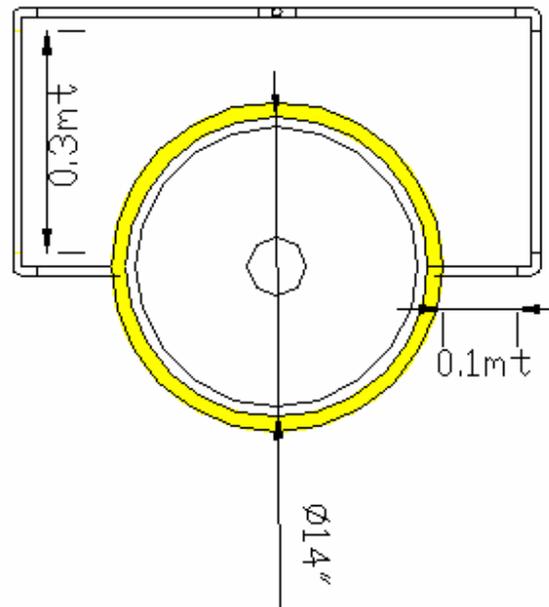
***Figura No 31.: Pendiente del sitio***

#### **8.1.11. Estructuras de salida del reactor**

**8.1.11.1. Salida del reactor:** El efluente tratado del reactor sale del reactor desde la parte superior por medio de tres salidas ubicadas en los extremos del reactor en tubería de  $\frac{1}{2}$ " ,el lixiviado se une en una manguera de PVC  $\frac{3}{8}$ " por medio de accesorios, la manguera de  $\frac{3}{8}$ " baja hasta la cajilla de muestreo.

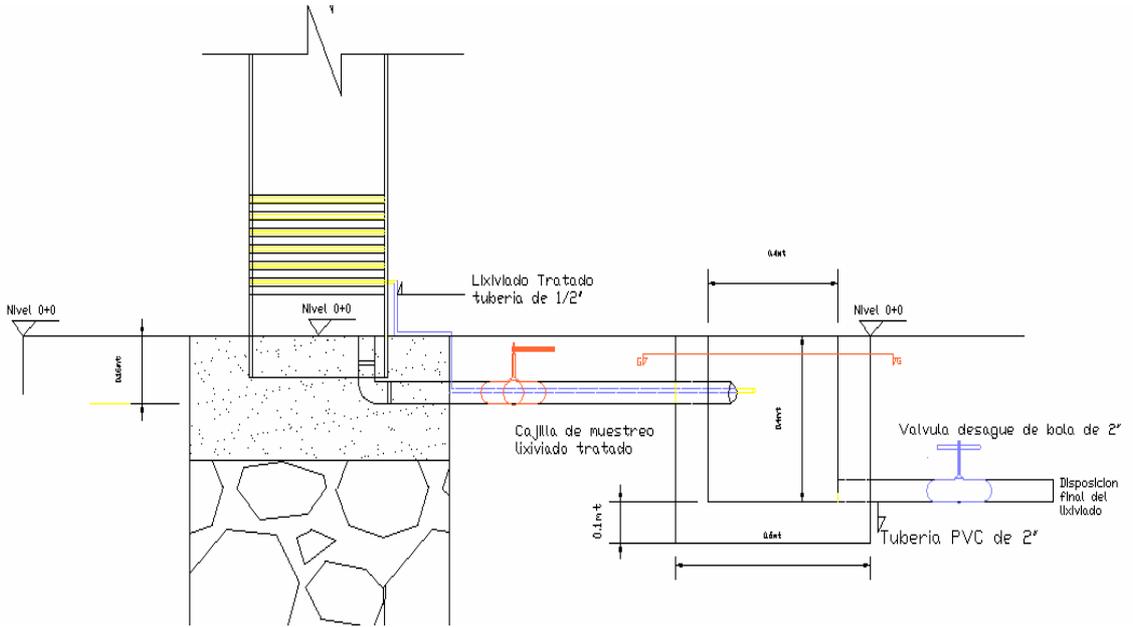
## DETALLE EVACUACION LIXIVIADO TRATADO

Evacuación de agua N+ 4.5 en PVC de 1/2"



**Figura No. 32. Estructura de salida de lixiviado tratado**

**8.1.11.2. Cajilla de salida y muestreo:** Ubicada al pie del reactor en ella se encuentra en la parte inferior la válvula de evacuación total del reactor consistente en una válvula de tipo compuerta en hierro dúctil de 2" la cual evacua el contenido del reactor en caso de tener que realizar la evacuación total o parcial del mismo, a dicha cajilla también llega el efluente del reactor y sirve como cajilla de muestreo de salida, el lixiviado tratado es llevado hacia un filtro ubicado cerca del reactor perteneciente al C.E.P.A. y continua al tratamiento con el fin de contaminar el terreno aledaño.



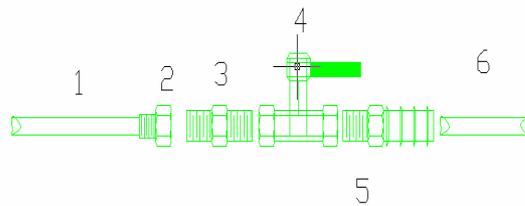
**Figura No 33.: Diseño Cajilla de salida**



**Figura No 34, : Cajilla de salida construida**

**8.1.12. Aparejos de muestreo:** Para realizar un muestreo del lodo acumulado en el reactor y observar el proceso de depuración a lo largo del reactor se instalan cada setenta centímetros en el reactor aparejos para toma de muestra, que atraviesan el tubo por medio de racores y una válvula en bronce de 3/8" y una extensión en manguera de bronce del mismo diámetro.

#### DETALLE TOMA DE MUESTRAS



- 1 Extensión de bronce en 5/16"
- 2 Racor 38 B -113 08 1/4"
- 3 Racor 03 B -3 04 1/4" x 1/4"
- 4 Válvula bola en bronce en 1/4"
- 5 Racor 41B -12 03 1/4" x 1/4"
- 6 Extensión en manguera de 1/4"

**Figura No 35.:Diseño aparejos para muestreo**



**Figura No 36.: Aparejos toma de muestras construidos**

## 8.2. CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR Y ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA

El reactor se construyo en el sitio descrito en la localización. Debido al gran peso que soportara el reactor su cimentación está basada en el punzonamiento generado por su altura para ello se hizo una base con concreto ciclópeo de ochenta centímetros de espesor en una relación concreto/ rajón: 60/40, seguido se coloco una capa de concreto de 3000 PSI de treinta centímetros de espesor en le cual se incrusto el reactor y se coloco por debajo la tubería de ingreso del lixiviado de esta manera se fijo al piso el reactor, para asegurarlo se coloco alrededor unas sogas hasta que el proceso de fraguado y curado terminara. Las cajillas y estructuras de entrada y salida se hicieron en mampostería debidamente esmaltada para evitar que la corrosión causada por el lixiviado, evitando un rápido deterioro las estructuras necesarias para el buen funcionamiento del reactor.



**Figura No 37. : Reactor construido**

### **8.3. LIXIVIADO QUE INGRESA AL REACTOR**

El reactor será alimentado con lixiviado proveniente de la laguna de excesos anaerobia el cual pertenece al lixiviado proveniente directamente del relleno pues ha recibido como único tratamiento de depuración una aireación leve, por esta razón se considera que el reactor UASB será alimentado con lixiviado puro, de esta manera el reactor desarrollara las funciones de un tratamiento primario utilizado como ante sala del tratamiento secundario y terciario del relleno, así el funcionamiento del reactor se podrá comparar con los resultados obtenidos en el relleno sanitario Antanas para la etapa de tratamiento primario correspondiente a la laguna anaerobia.

## **9. INOCULACION Y PUESTA EN MARCHA REACTOR UASB**

### **9.1. INOCULACION O SIEMBRA DEL REACTOR**

El proceso de inoculación consiste en la adecuación de los microorganismos que interfieren en el proceso anaerobio, para un correcto funcionamiento en la puesta en marcha o en continuo del reactor, en el proceso de inoculación se llenara el reactor de manera controlada asegurando el funcionamiento del reactor y la formación de una biomasa adecuada que permita su buen funcionamiento, por lo cual debe ser inoculado con lixiviado enriquecido proveniente del mismo relleno en el cual se encuentre una buena cantidad de nutrientes que sean capaces de mantener la biomasa adecuada durante la operación del reactor, Dentro de la inoculación se procedió a realizar los primeros análisis para apreciar el comportamiento del reactor y verificar la eficacia que tubo el inóculo escogido, si los resultados obtenidos no son los adecuados se cambiara el inóculo o se agregara mas nutrientes que permitan el buen funcionamiento del reactor.

La inoculación en los procesos anaerobios está condicionada a una serie de requisitos los cuales se relacionan principalmente con la actividad de la biomasa, dependiendo esta de los factores ambientales como temperatura, pH, alcalinidad, para el desarrollo del proyecto se tomo como parámetro a seguir la adaptabilidad de la biomasa medida por el porcentaje de disminución de DQO tomada como eficiencia de la siembra realizada la cual debería ser superior a 20% en cada una de las etapas del proceso<sup>12</sup>

Para determinar la eficacia del proceso de inoculación, se llevaran a cabo pruebas de DQO para verificar el porcentaje de eficiencia entre cada etapa de la

---

<sup>12</sup> CHERNICHARO CARLOS AUGUSTO DE LEMOS. Reactores Anaerobios, Principios do tratamento Biológico de Aguas Residuales Volumen 5. Universidad Federal de Minas Gerais – UFMG. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental DESA. Belo Horizonte Brasil. Primera edición 1997 pagina 203

inoculación. El porcentaje mínimo de eficiencia debe estar por encima del 20% para ser aceptable y proseguir con el proceso de lo contrario se deberá empezar nuevamente.

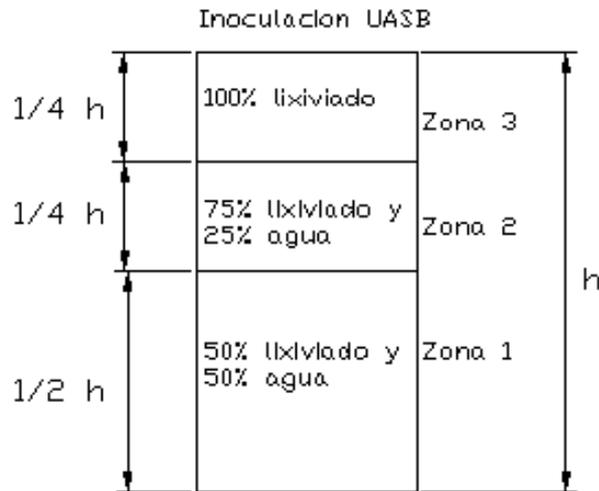
$$\% E = \frac{DQO \text{ Afluyente} - DQO \text{ Efluyente}}{DQO \text{ Afluyente}} * 100$$

Ecuación [6]

Dentro del proceso de inoculación se enriquecerá el lixiviado de llenado con nutrientes en proporciones específicas, dichos nutrientes serán: melaza, suero de leche, leche en polvo y levadura hervida en una proporción del 10% del volumen de llenado.

Cuando el inóculo cumpla con las características que se necesiten se alimentará el reactor de manera directa o continua es decir empezará a trabajar con el lixiviado proveniente del relleno, controlando el caudal de entrada, aclarando que esta será una dilución entre el líquido que emana del relleno y agua común, en porcentajes diferentes hasta llegar a trabajar con el 100 % de lixiviado, esta dilución deberá mantener la temperatura del lixiviado original que oscila entre 23° y 24°, esto con el fin de que no se alteren las condiciones con las cuales se diseñó el reactor, puesto que la temperatura es uno de los parámetros de mayor cuidado en este tipo de estructuras donde se necesita una temperatura considerable para que los microorganismos que componen la biomasa subsistan en condiciones favorables.

**9.1.1. Desarrollo de la inoculación:** Se llevará a cabo en medio discontinuo es decir el reactor no se llenará completamente en una sola etapa ni con un tiempo de retención constante, el lixiviado ingresará por la parte superior del tubo en tres etapas cada una tendrá una duración de cuarenta y ocho horas entre cada etapa así :



**Figura No. 38 Proceso de inoculación**

La altura total del tubo será dividida en tres zonas alimentadas con lixiviado proveniente del fondo de la laguna de excesos anaerobia del relleno la cual posee una gran actividad microbiana que favorece la inoculación del reactor

- **Zona 1:** Corresponde a la mitad del volumen del reactor en ella se colocara una dilución de 50% lixiviado y 50% agua, la cual reposara durante dos días consecutivos dentro del reactor. De la mezcla total correspondiente a 226 litros, el 10% corresponderá a la mezcla de 22 litros de suero de leche, 2 kg de melaza y 1 Kg de levadura hervida que actuaran como nutrientes y catalizadores del proceso de siembra.
- **Zona 2:** Corresponde al tercer cuarto del reactor en el se colocara una dilución de 75 % lixiviado y 25% agua es decir un volumen 132 litros, los cuales se agregan al reactor y permanecen en el por un periodo de 2 días, en esta etapa de la siembra no se agregan nutrientes extras.
- **Zona 3 :** Corresponde al último cuarto del reactor el cual se llenara con lixiviado puro proveniente del fondo de la laguna de excesos anaerobia, realizando el mismo proceso de la zona 2

CARACTERIZACION LODO INOCULACION

FECHA: Enero 8 de 2007

UBICACIÓN: Lodo fondo de Laguna anaerobia relleno sanitario Antanas

PARAMETRO	UNIDAD	ENTRADA
PH	Unidad	8.20
TEMPERATURA	°C	22
ALCALINIDAD	mg CaCO <sub>3</sub> /L	4500
DQO	mg/L	7732
DBO	mg/L	5340
SST	mg/L	6435

**Tabla No 4 : Caracterización lodo de inoculación reactor UASB**

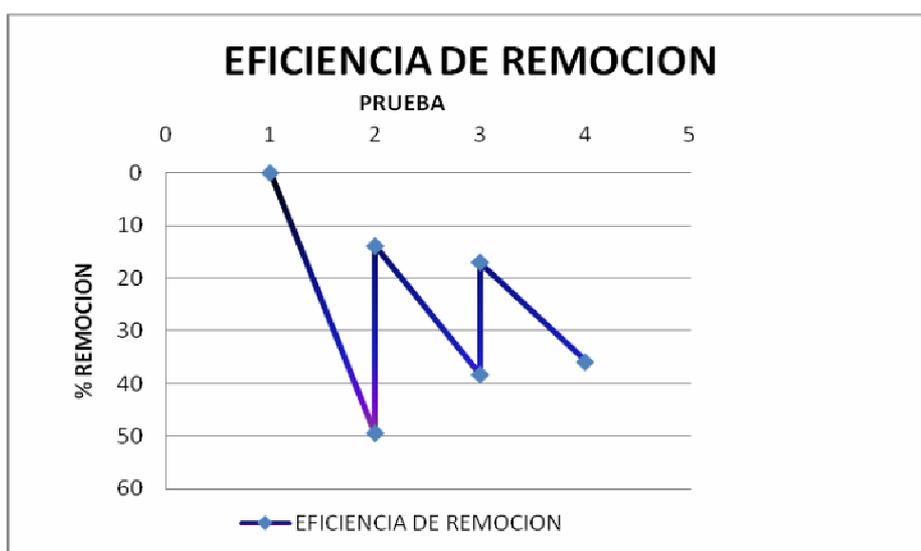
9.1.2. Prueba de eficiencia inoculación

FECHA	PRUEBA	CONCEPTO	DQO (mg/L)	EFICIENCIA %
Ene/08/07	1	Inicio inculo 50% lixiviado, 50% agua	6761,5	
Ene/10/07	2	Fin inculo 50% lixiviado, 50% agua	3421,7	49,4
Ene/10/07	2	Inicio inculo 75% lixiviado, 25% agua	5823,1	
Ene/12/07	3	Fin inculo 75% lixiviado, 25% agua	3593,2	38,3
Ene/12/07	3	Inicio inculo 100% lixiviado	4834,3	
Ene/15/07	4	Fin inculo 100% lixiviado	3098,8	35,9

**Tabla No 5 Pruebas DQO inoculación reactor**

FECHA	PRUEBA	CONCEPTO	pH	Temperatura
Ene/08/07	1	Inicio inculo 50% lixiviado, 50% agua	8,07	21,0
Ene/10/07	2	Fin inculo 50% lixiviado, 50% agua	7,5	17,8
Ene/10/07	2	Inicio inculo 75% lixiviado, 25% agua	8,3	18,6
Ene/12/07	3	Fin inculo 75% lixiviado, 25% agua	8,0	18,3
Ene/12/07	3	Inicio inculo 100% lixiviado	8,6	19,3
Ene/15/07	4	Fin inculo 100% lixiviado	7,7	18,3

**Tabla No 6 pH y T°inoculación**



**Figura No. 39. : Eficiencia de remocion inoculacion reactor**



**Fig. No 40. : Comportamiento DQO pruebas de inoculación**

En la figura No 39 se muestra la eficiencia de remoción de la DQO en el proceso de siembra o inculo de la biomasa se observa un mejor comportamiento en la primera etapa lo cual ocurre debido al incremento de nutrientes por la adición de enriquecimientos nutricionales que proporcionan, la adición de suero y melaza lo cual acelera el proceso de remoción actuando como catalizadores, las siguientes etapas presentan una disminución en la eficiencia de remoción, que llevan a la estabilización del sistema con una remoción al final de la inoculación del 35.9% con lo cual se puede poner en marcha la siguiente etapa del proyecto.

La estabilización del reactor en esta etapa se logra teniendo en cuenta:

- La dilución del lixiviado que ingresa al reactor cuando este supera los 5000 mg/L en DQO, aumento de la carga orgánica del reactor progresivamente
- La adición de nutrientes o catalizadores cuando se necesita aligerar el proceso de inculo el cual puede ser demasiado largo cuando no se adiciona ningún suplemento o activador, chequeo de factores nutricionales ( N, P, S)
- Chequeo de factores ambientales, como temperatura y pH <sup>13</sup>

<sup>13</sup> CHERNICHARO CARLOS AUGUSTO DE LEMOS. Reactores Anaerobios, Principios do tratamento Biológico de Aguas Residuales Volumen 5. Universidad Federal de Minas Gerais –

## 9.2. ETAPA DE OPERACIÓN O PUESTA EN MARCHA DEL REACTOR

El arranque del sistema en continuo busca la estabilización del mismo para ello fue realizado con aumentos progresivos de la concentración de DQO en el afluente haciendo uso de tres diluciones en un lapso de dos semanas para cada una en el cual se evaluaron los parámetros fisicoquímicos del reactor determinado su comportamiento, ventajas y desventajas para una futura implementación en el relleno sanitario Antanas, dentro del criterio de aumento de la DQO se busca como en la etapa de inoculación la respuesta del reactor en términos de eficiencia de reducción de DQO observando la reducción de AGV (Lettinga, 1984).

DILUCION	DURACION (FECHAS)	TRH
50% Lixiviado, 50% Agua	Enero16 a Febrero1 de 2007	24 Horas
75% Lixiviado, 25% Agua	Febrero 2 al 20 de 2007	24 Horas
100% Lixiviado	Febrero 21 a Marzo 9 de 2007	24 Horas

**Tabla No. 7 Diluciones utilizadas en proceso puesta en marcha**

**9.2.1. Parámetros a evaluar en el sistema:** Para la etapa de operación del reactor UASB se tendrán en cuenta parámetros de control iguales para cada dilución, en la Tabla No 7, se muestra su frecuencia y punto de toma de muestra

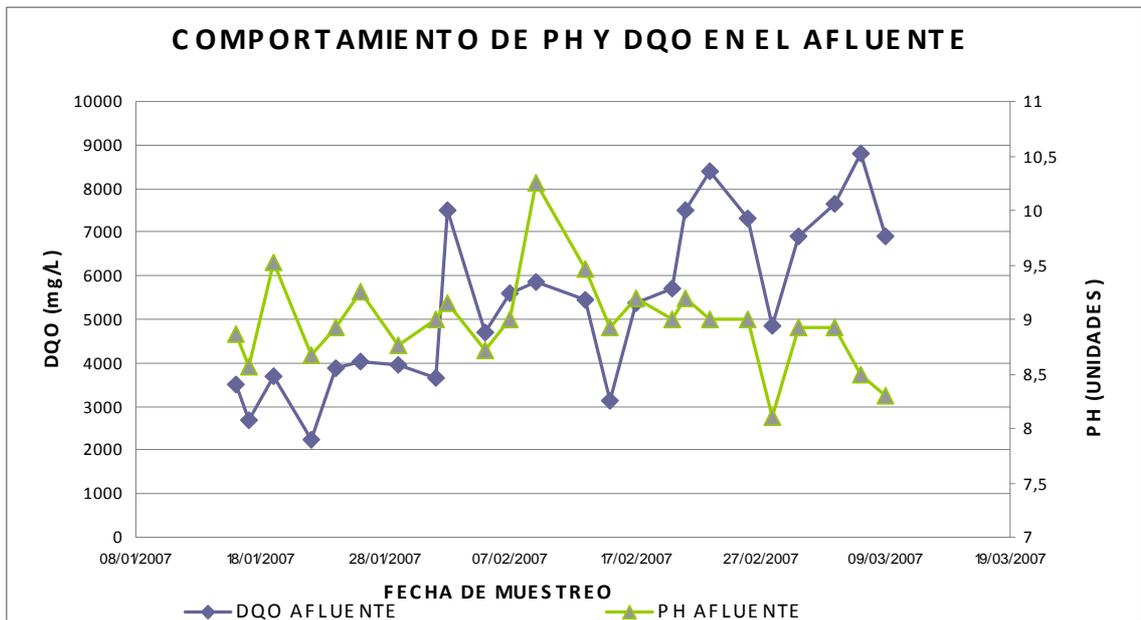
PARAMETRO	AFLUENTE	FRECUENCIA	EFLUENTE	FRECUENCIA
pH	X	Tres/ semana	X	Tres/ semana
Temperatura	X	Tres/ semana	X	Tres/ semana
Alcalinidad	X	Tres/ semana	X	Tres/ semana
SST	X	Tres/ semana	X	Tres/ semana
SSV	X	Tres/ semana	X	Tres/ semana
DQO	X	Tres/ semana	X	Tres/ semana
DBO	X	Una/ semana	X	Una/ semana
AGV	X	Tres/ semana	X	Tres/ semana
Caudal	X	Diario	X	Diario

**Tabla No. 8 Parámetros de control reactor UASB**

### 10. ANALISIS DE RESULTADOS

Para efectos del análisis de resultados obtenidos se utilizaron figuras que muestran la tendencia y el comportamiento de los parámetros mas importantes y relevantes en el proceso de digestión anaerobia, haciendo uso de un reactor UASB, bajo tres porcentajes de dilución ya mencionados. Los parámetros a tener en cuenta son pH, temperatura, alcalinidad, concentración de SST, DQO, y AGV, eficiencia de remoción de DQO, el análisis de cada parámetro se realiza individualmente en cada porcentaje de dilución y se relacionan entre si para evaluar el comportamiento total del sistema.

#### 10.1. ANALISIS DE COMPORTAMIENTO DE PH Y DQO EN EL AFLUENTE DURANTE OPERACIÓN DEL SISTEMA



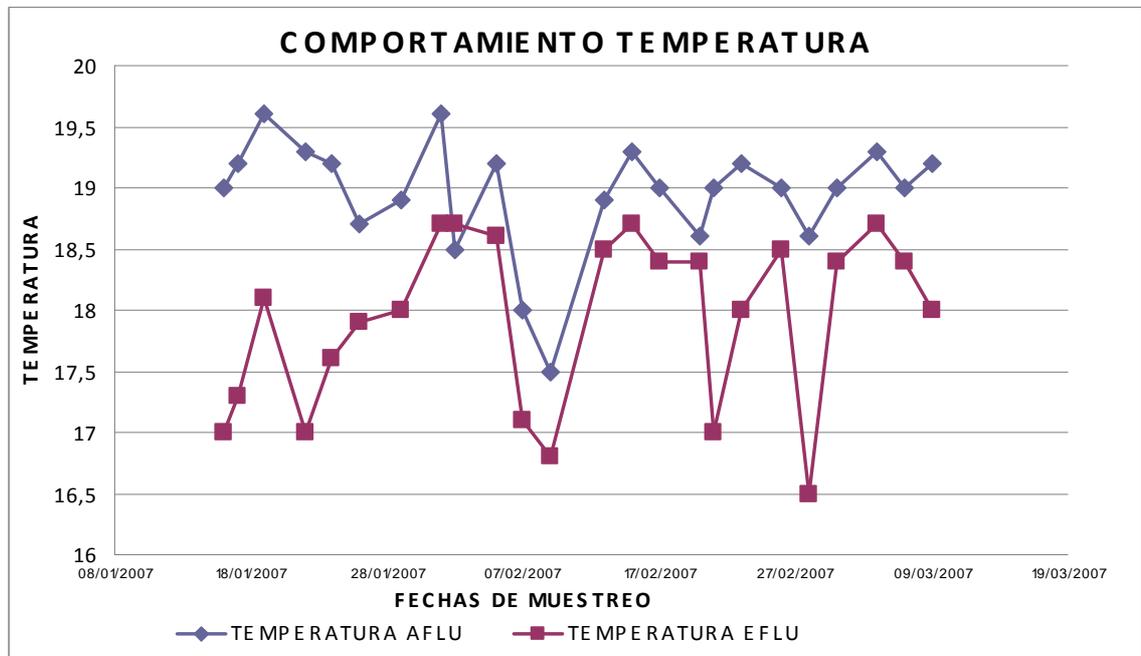
**Figura No. 41 : Comportamiento pH y DQO afluente del reactor**

En la figura No 41 se observa que el comportamiento del pH de entrada del sistema se mantuvo alcalino durante toda el proceso de operación presentándose valores cercanos a 9, una de las razones por las cuales se presentan estas condiciones radica a la degradación en condiciones anaerobias de los compuestos orgánicos que hacen parte de los componentes de los residuos sólidos en el relleno, ya que las reacciones dadas en cada una de las fases de este proceso generan gran cantidad de bicarbonatos (Breure, 1995) los cuales pasan a ser uno de los principales componentes de los lixiviados causando así su alta alcalinidad bicarbonatica. Los valores de pH no tuvieron variaciones considerables durante todo el proceso de operación esto se debe principalmente a que el lixiviado en estudio proviene de un relleno relativamente maduro en el cual no presentan variaciones considerables.

Con respecto al DQO que ingreso al reactor se evidencia una tendencia a un aumento progresivo y estable, debido a que el relleno se encuentra en una etapa de degradación metanogénica lo cual se evidencia en la figura No 41.

En la figura No. 41 se evidencia que la tendencia de disminución del pH coincide con el aumento de la DQO del mismo razón por la cual un relleno sanitario puede compararse con un gran reactor anaerobio, ya que dados los requerimientos de cubrimientos finales e intermedios que impiden el intercambio gaseoso, las condiciones anaerobias priman dando lugar a que la materia orgánica componente de los residuos sea procesada por esta vía.

## 10.2. COMPORTAMIENTO TEMPERATURA EN EL REACTOR

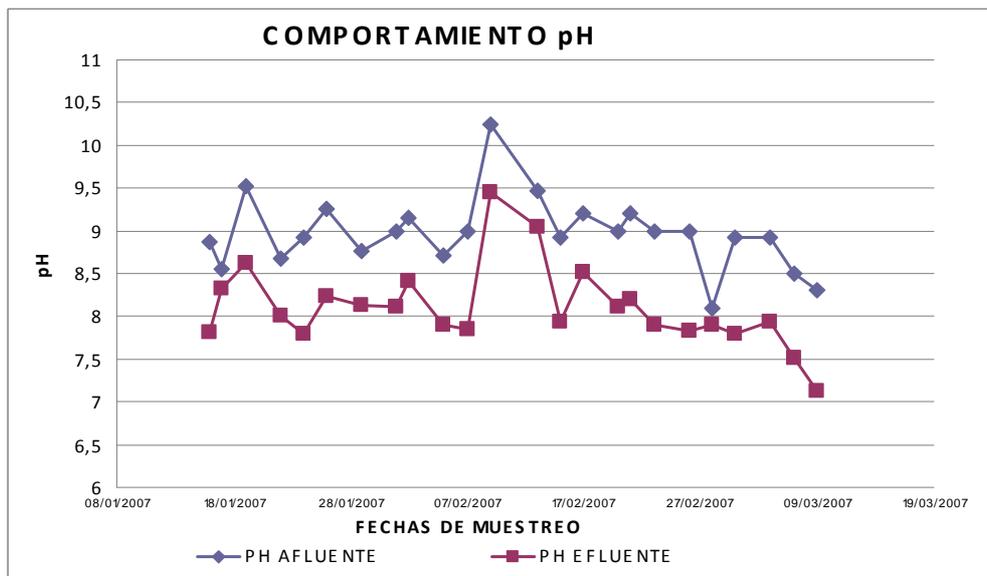


**Figura No. 42: Comportamiento Temperatura del reactor**

El comportamiento de la temperatura en el afluente se mantuvo relativamente estable durante todo el proceso en el cual se tuvo un pico máximo de 19,6 °C y un mínimo de 17,5 °C con una temperatura promedio de 18,95 °C, el descenso en la temperatura se dio en días lluviosos en los cuales la temperatura ambiente promedio del relleno se encuentra por debajo de los 10°C lo cual incide enormemente en la temperatura del lixiviado que ingresa al reactor. La temperatura afluente efluente mostró una variación promedio de 1,2°C lo cual evidencia que el reactor mantiene su temperatura interna, aunque se presenta una variación mucho mas elevada en los días lluviosos donde la temperatura del reactor descendió hasta 16,5 °C . Cabe anotar que la temperatura del lixiviado no se encuentra dentro del rango para un ambiente mesofilico recomendado en

procesos anaerobios (Tabla No 1) la cual se encuentra en un rango de 29 a 38 °C para asegurar una buena degradación en el sistema.

### 10.3. COMPORTAMIENTO pH EN EL REACTOR



**Figura No 43: Comportamiento de pH en el reactor**

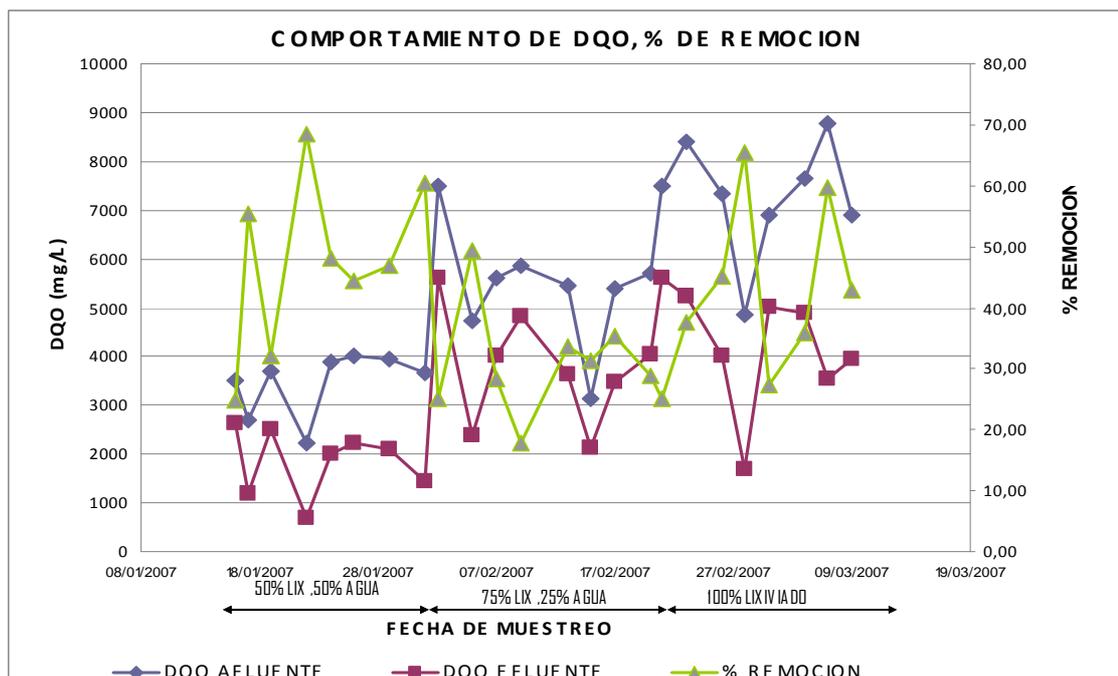
Componente del sistema	pH		
	Máx.	Prom.	Min
Afluente	10,25	8,96	8,1
Efluente	9,45	8,10	7,82

**Tabla No. 9 pH en el sistema**

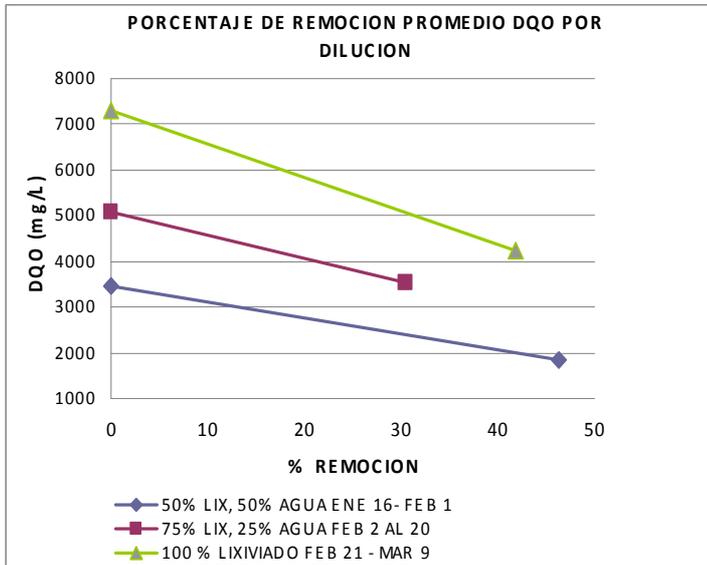
El comportamiento del pH en el reactor muestra una reducción mínima en la mayor parte del proceso de operación del reactor, esto evidencia que el comportamiento del reactor se mantuvo dentro de los márgenes apropiados para el proceso manteniendo su potencial alcalino al estar por encima de 7 unidades, conservando su característica de entrada, aunque cabe anotar que en la última etapa de muestreo para concentración de 100% lixiviado se aprecia un descenso

mucho mayor a las demás diluciones lo que se evidencia por un progresivo acumulamiento de AGV que se mostrara este análisis.

#### 10.4. COMPORTAMIENTO Y PORCENTAJE DE REMOCION DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO DQO



**Figura No 44: comportamiento DQO sistema**



**Figura No 45: % Remoción DQO**

Componente del sistema	DQO (mg/L)		
	Máx.	Prom.	Min
Afluente	8390	5278,8	2221,0
Efluente	5602	3213,25	702
Componente del sistema	% REMOCION DQO (mg/L)		
	Máx.	Prom.	Min
Afluente			
Efluente	68,39	39,13	17,70

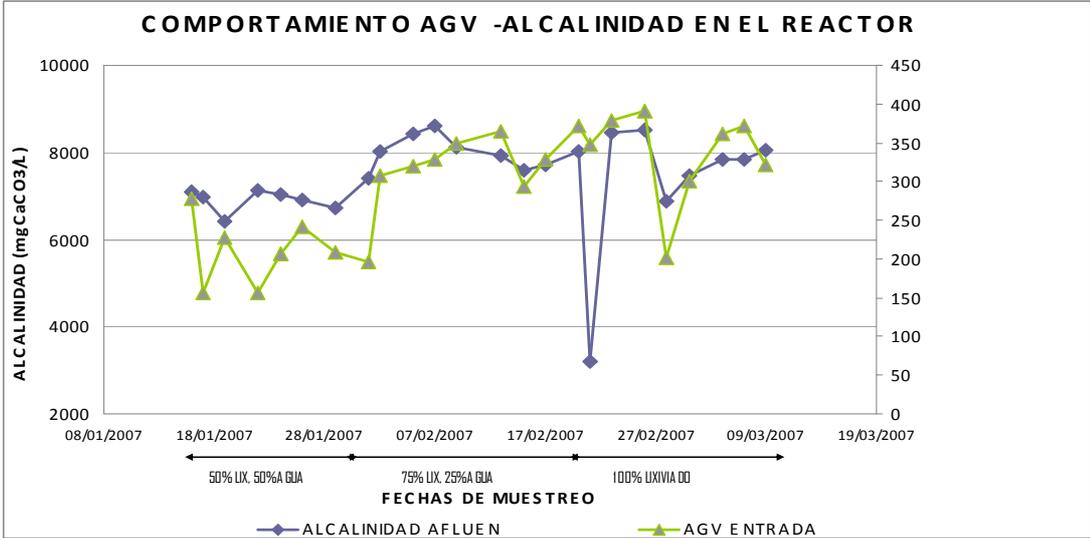
**Tabla No. 10 DQO en el sistema**

La DQO es el parámetro de mayor importancia dentro del análisis de resultados del sistema, con el se evidencia el comportamiento y el funcionamiento del reactor. El sistema respondió de manera satisfactoria al proceso de inoculación iniciando con remociones superiores al 20% en la primera dilución, la cual obtuvo el mayor porcentaje de remoción promedio llegando a un 46.3 %, en la segunda dilución se

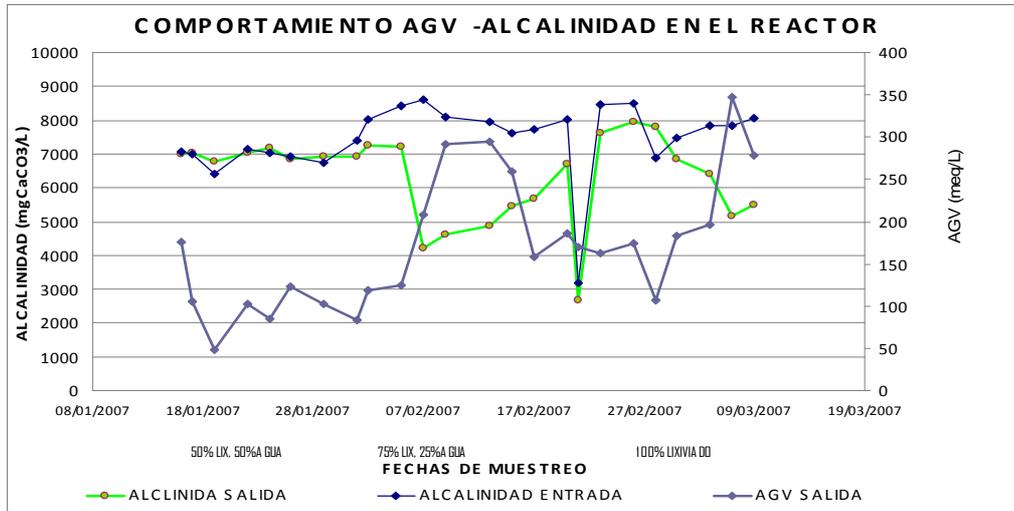
presenta una disminución en el porcentaje de remoción llegando a un 30.5% promedio y en la ultima haciendo uso de lixiviado puro se llego a una remoción de 41.8 %, notando un aumento progresivo en la eficiencia y adaptación del sistema al final del proceso de puesto en marcha, la eficiencia mostrada en el sistema se debe principalmente al estricto control de las condiciones de aclimatización y adaptabilidad de la biomasa lograda con el desarrollo de las diluciones, 50%, 75% y 100%, del lixiviado llevadas a cabo por la concentración superior a 5000 mgDQO/L encontrada en el lixiviado del afluente, (Lettinga et al., 1984).

La aplicación de esta metodología para la puesta en marcha del reactor permitió que parámetros como pH, Alcalinidad y AGV se acoplaran gradualmente al sistema impidiendo la inhibición del mismo y por ende su acidificación.

**10.5. RELACION AGV ALCALINIDAD EN EL SISTEMA**



**Figura No. 46: Alcalinidad, AGV en el afluente**



**Figura No. 47: Alcalinidad, AGV en el efluente**

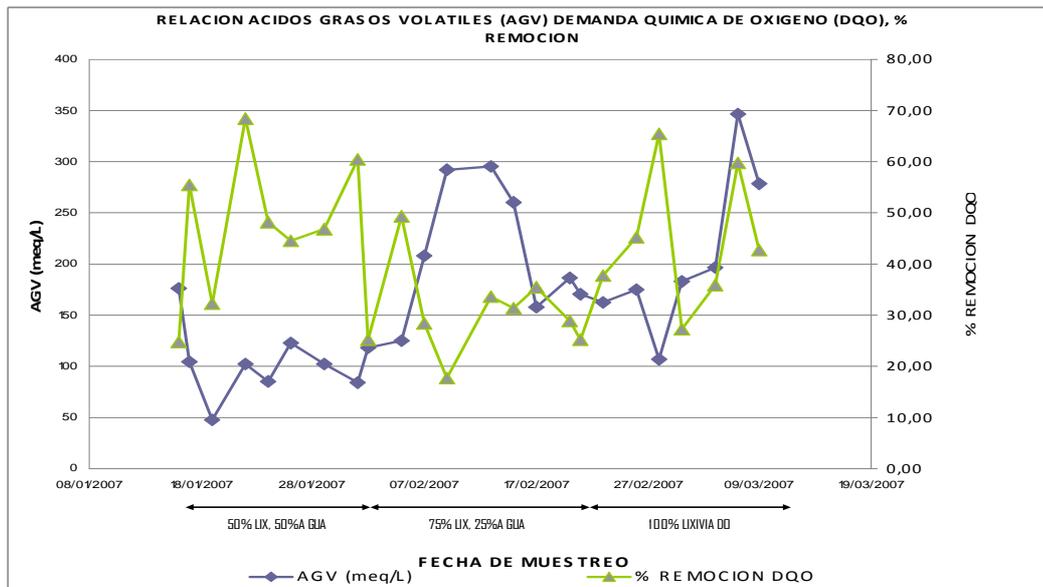
Componente del sistema	AGV (meq/L)			ALCALINIDAD (mgCaCO <sub>3</sub> /L)		
	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min
Afluente	379	291,79	156	7841	7432,38	6980
Efluente	347	170,29	48	5147	6316,46	7015

**Tabla No. 11 Valores alcalinidad, AGV**

Se observa que la alcalinidad en el efluente se aumenta respecto al afluente durante la primera dilución, donde no se presentan acumulaciones de AGV evidenciando que los procesos anaerobios se están llevando a cabo adecuadamente lo cual se ratifica en el porcentaje de remoción de DQO, la segunda dilución por su parte presenta la acumulación de AGV y el descenso de la alcalinidad en un mayor porcentaje mostrando una disminución en la eficiencia del reactor, en la tercera dilución se observa un descenso en la acumulación de AGV estabilizando la alcalinidad, al final de este periodo se observa nuevamente una acumulación mayor de AGV acompañado de un descenso de la alcalinidad, a pesar de esto se observa que el porcentaje de remoción de DQO del reactor alcanza un porcentaje superior a 40%, esto ratifica que los procesos anaerobios dentro del reactor se están llevando a cabo de manera adecuada.

Como se puede observar en las figuras No 46 y 47 la relación entre AGV y Alcalinidad se mantiene dentro de un rango muy inferior a 0.4 lo cual indica que el reactor no presenta un proceso de acidificación.

**10.6. RELACION ACIDOS GRASOS VOLATILES – DQO, PORCENTAJE DE REMOCION**



**Figura No.48: Relación AGV, % remoción DQO efluente**

AGV (meq/L)			DQO (mg/L)			% REMOCION		
Máx.	Prom.	Min	Máx.	Prom.	Min	Máx.	Prom.	Min
379	291,79	156	8390	5278,8	2221,0			
347	170,29	48	5602	3213,25	702	68,39	39,13	17,70

**Tabla No. 12 Valores AGV; DQO**

La tabla No 12 resume los valores de interés de AGV y DQO a lo largo del proceso, en los cuales se aprecia que el porcentaje de remoción promedio del reactor no sobrepasa el 40% esto debido a la gran variación de comportamiento de AGV que se dio a lo largo de la puesta en marcha del reactor, de acuerdo como

se aprecia en la figura No 48 se puede evidenciar que la relación porcentaje de remoción de DQO y concentración de AGV en el efluente es inversamente proporcional esto debido a que en la etapa de dilución dos y tres en donde se presenta mayor acumulación de AGV se evidencia los cambios súbitos y disminución en el porcentaje de remoción de DQO es decir en la eficiencia del reactor,

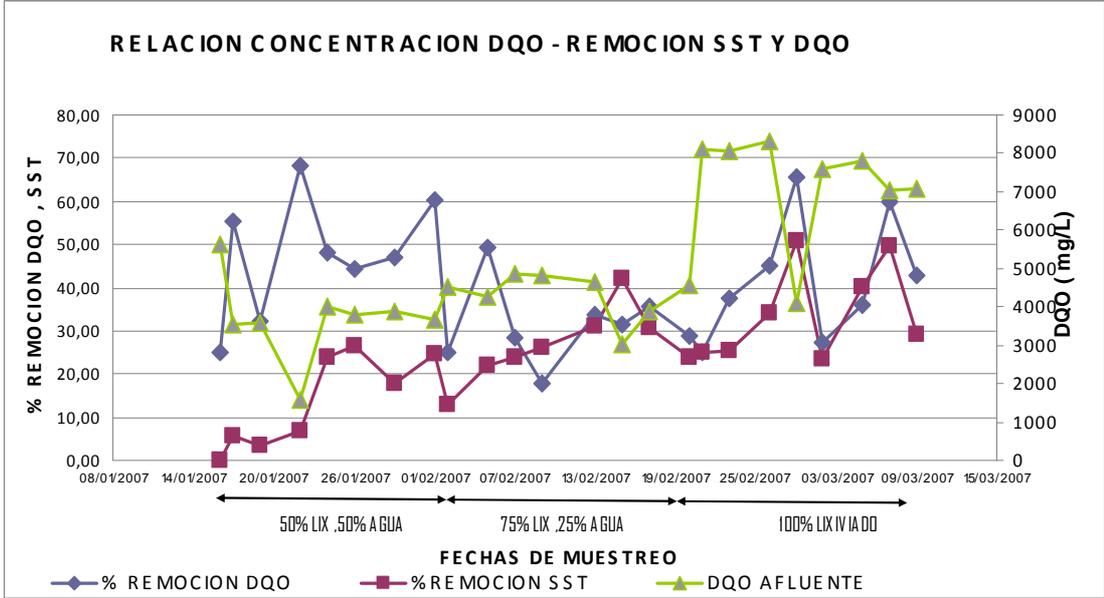
De estas relaciones se puede evidenciar que el bajo desempeño que alcanza el reactor se fundamenta en una carencia de nutrientes, ya que el proceso anaerobio es un proceso biológico que requiere ciertas condiciones ambientales para su óptimo desempeño, una de ellas se basa en la relación DBO: N:P, la cual se recomienda para tratamientos anaerobio en 800:7:1, y si el contenido de nitrógeno y fósforo en el lixiviado a tratar no alcanza una buena concentración, se desestabiliza el sistema presentándose un bajo rendimiento del mismo.

Para evaluar la relación anterior en el reactor se tomo como base una prueba realizada al termino de la etapa de puesta en marcha, tomando como parámetros el nitrógeno orgánico y fósforo total presente en el lixiviado del afluente y de esta manera poder concluir y recomendar las posibles soluciones para que en estudios posteriores se pueda alcanzar valores de remoción mas elevadas.

Componente sistema	DBO (mg/L)	Nitrógeno	Fósforo
Afluente	2531	113	7.1

De estos resultados se puede concluir que la relación apropiada seria DBO:2531,N: 22,5 y P: 3.16, pero se encuentra en 800:35:2.24, en la cual se aprecia que para una futura investigación se debe poner atención en la cantidad de nitrógeno y fósforo presentes en el lixiviado los cuales exceden la relación apropiada y denotan que el lixiviado posee una buena cantidad de nutrientes la cual debe ser supervisada para que no se presente acumulación de Nitrógeno o descenso en el fosforo que pueda afectar el comportamiento del reactor .

**10.7. RELACION SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES, % REMOCION DQO DEL SISTEMA**



**Figura No. 49 concentración SST, remoción SST y DQO**

Componente del sistema	SST (mg/L)			DQO (mg/L)		
	Max	Prom.	Min	Max	Prom.	Min
Afluyente	7823	5096,35	3014	8390	5278,8	2221,0
Efluyente	6013	3755,43	1456	5602	3213,25	702
Componente del sistema	% REMOCION SST (mg/L)			% REMOCION DQO (mg/L)		
	Max	Prom.	Min	Max	Prom.	Min
Afluyente						
Efluyente	50,90	26,311	0	68,39	39,13	17,70

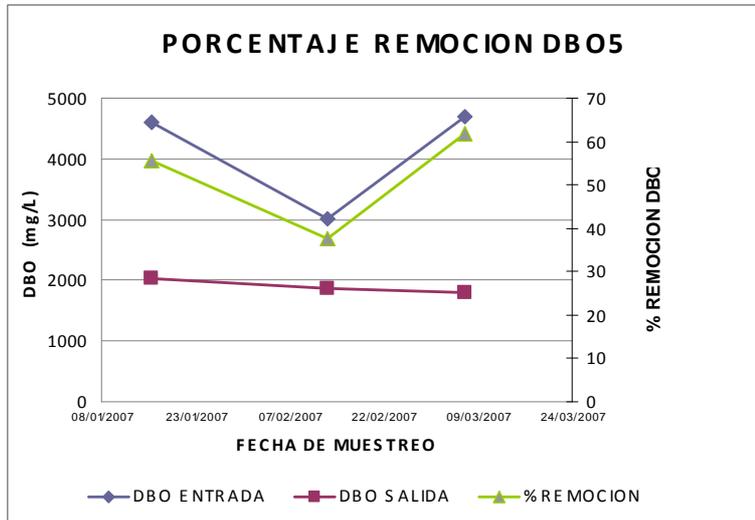
**Tabla No 13. Valores de interés de SST y DQO**

La figura No 49, muestra el comportamiento del porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales con respecto a la concentración de DQO aplica y el porcentaje de remoción de la misma en el sistema.

En los primeros cinco días de puesta en marcha correspondientes a la primera dilución se observa que no se obtuvo un porcentaje de remoción sólidos, esto se asocia a un lavado del lodo ocurrido como consecuencia de la presencia de partículas mas livianas de menor sedimentabilidad y a las características dispersas del lodo de inculo empleado, posteriormente en el final de la primera dilución e inicio de la segunda se nota un incremento del porcentaje de remoción irregular menor al 30%, lo cual pudo deberse a la retención de sólidos en el manto lodos y al mecanismo de sedimentabilidad del reactor, cabe anotar que esto se aprecio por observación visual haciendo uso de los aparejos de control y muestreo de lodos del reactor, resaltando que no fue posible la realización de mediciones de SST en cada aparejo para corroborar esta hipótesis. En el desarrollo de la ultima etapa trabajando con lixiviado puro se nota que la remoción de los sólidos se mantiene en un promedio del 30% tendiendo al aumento de remoción de SST a media que aumenta la concentración de DQO en la entrada del reactor.

Se puede observar que la remoción de DQO en esta última etapa mantuvo un comportamiento similar a la remoción de SST, llegando a un promedio de 41%.

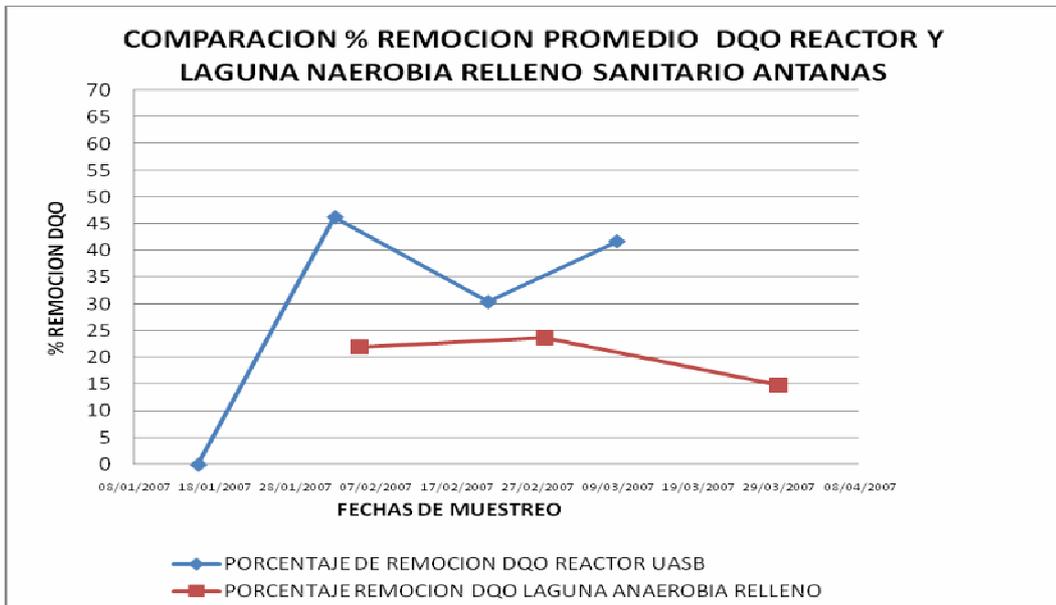
## 10.8. COMPORTAMIENTO DE DBO5 EN EL SISTEMA



**Figura No 50: Comportamiento DBO del sistema**

Se realizaron tres análisis de DBO a lo largo de la puesta marcha como parámetro de control del proceso, una para cada una de las diluciones, en la figura No 50 se puede observar que la DBO mantiene un comportamiento muy similar al del DQO observándose remociones muy similares para cada una de las diluciones teniendo como máxima la encontrada en la ultima etapa de puesta en marcha la cual se ubico por encima de 60%. Lo cual confirma que el reactor funciona de manera satisfactoria aunque la remoción de DQO no haya superado el 50% promedio.

## 10.9 COMPARACION COMPORTAMIENTO DEL REACTOR COMO TRATAMIENTO PRIMARIO Y LAGUNA ANAEROBIA RELLENO SANITARIO ANTANAS



**Figura No. 51. : Comparación % remoción DQO reactor UASB y laguna anaerobia relleno sanitario Antanas**

REMOCION DQO PROMEDIO REACTOR		REMOCION DQO LAGUNA ANAEROBIA RELLENO	
FECHA	% REMOCION	FECHA	% REMOCION
16/01/2007	0	05/02/2007	21,90
02/02/2007	46,3	28/02/2007	23,69
21/02/2007	30,5	29/03/2007	14,80
09/03/2007	41,8		

**Tabla No. 14.: Valores promedio remoción DQO reactor y Laguna anaerobia relleno sanitario Antanas**

En la figura No 51 se observa el comportamiento de la DQO expresada en valores promedios de remoción de cada una de las diferentes diluciones trabajadas a lo largo del proceso de puesta en marcha del reactor anaerobio "UASB", comparadas con los valores de remoción de DQO presentados por EMAS para la laguna anaerobia en los análisis del periodo de comprendido a la puesta en marcha del

reactor UASB, en la figura No 51 se observa claramente un porcentaje de remoción mucho mayor por parte del reactor UASB tomado como tratamiento primario en comparación al existente en el relleno con la laguna anaerobia del mismo, el reactor UASB se mantuvo siempre por encima del 30% promedio durante todo el periodo de puesta en marcha, por su parte el porcentaje de remoción de DQO de la laguna se mantiene en entre 14 % y 23%, este resultado ofrece una conclusión muy satisfactoria para el proyecto en el cual se evidencia que el reactor es una opción viable para implementar como tratamiento primario para el tratamiento de lixiviados en un relleno sanitario ofreciendo ventajas muy grandes como menor área de construcción y mejores porcentajes de remoción.

## 11. CONCLUSIONES

- De acuerdo al análisis de resultados se puede afirmar que el proceso de diseño, inoculación y puesta en marcha de un reactor UASB a escala real, que trabajo bajo condiciones existentes en el relleno sanitario Antanas de la ciudad de San Juan de Pasto, es un proyecto viable y puede ser utilizado para la depuración de lixiviado como parte integral del proceso de tratamiento que posee el relleno. Al trabajar con temperaturas bajas para el proceso anaerobio que oscilaron entre 17° C y 19° C, se obtuvo una remoción promedio en DQO de 39.13% siendo satisfactoria para un sistema de tratamiento primario.
  
- Tras el diseño y construcción del reactor UASB y las estructuras necesarias para su funcionamiento se observa que el sitio escogido para la ubicación del reactor contribuye a que las condiciones climáticas del relleno intervengan de manera desfavorable sobre el mismo haciendo que la temperatura presente picos notorios de disminución, en mayor parte en las noches y días lluviosos, por otra parte la gran distancia que hay entre la cajilla de entrada del lixiviado y el reactor hace que el fluido pierda temperatura en un porcentaje promedio del 10%, además la viscosidad propia del lixiviado y su alto contenido de sólidos provoca un rápido taponamiento de la conducción la cual se diseño con un diámetro de media pulgada.
  
- De acuerdo a los análisis realizados en el proyecto se estableció que los parámetros iniciales para el funcionamiento del reactor UASB a escala real en continuo corresponden a una dilución de 50% lixiviado, 50% agua, la cual presenta mejores condiciones para la remoción de DQO y no muestra picos en la acumulación de AGV

- Haciendo uso de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio se enfatizo la eficiencia del reactor en términos de remoción de DQO, el cual obtuvo un valor promedio de remoción de 39.13 % ratificando que el reactor funciono de manera satisfactoria y que corresponde a una alternativa viable para el proceso de depuración de lixiviado en el relleno sanitario Antanas como un tratamiento primario
- Trabajar el desarrollo del proyecto haciendo uso de las variaciones en porcentaje de agua – lixiviado, aumentando de manera gradual la carga contaminante, hace que la adaptabilidad del sistema sea más eficiente, evidenciando que no se debe buscar una sola dilución agua - lixiviado optima, sino controlar y verificar que se llegue a trabajar con la totalidad de la carga sin que el reactor pierda su eficiencia o presente problemas de inhibición o acidificación.
- El análisis de los parámetros estudiados en el proyecto demuestra que: En cuanto al comportamiento del pH este se mantuvo por encima de 7 unidades conservando su potencial básico, estando dentro de los márgenes apropiados para sistemas anaerobios, por su parte la temperatura presenta picos de disminución en los días de invierno pero el reactor tiende a mantener su temperatura interna. Los SST por su parte tuvieron un desempeño de adaptabilidad marcado en el cual se observo que en la primera parte del proceso correspondiente a la dilución 50% agua, 50% lixiviado, no se presento remoción alguna y gradualmente esta fue incrementándose con el tiempo mostrando una retención de SST en el manto de lodos del reactor aumentando la remoción de SST en el efluente a un promedio de 26,3%, el comportamiento de DQO y DBO en cuanto a remoción se mantuvo por encima de 20%, teniendo picos máximos de 68,4% y 60% manteniendo u promedio de 39,13% y 53,58%, en cuanto a Nitrógeno y Fosforo se tomo una prueba de muestra al final del proyecto donde se obtuvo una relación DBO: N : P 800:35:2.24, que la cantidad de nitrógeno y fósforo presentes en el lixiviado los cuales exceden la relación apropiada y

denotan que el lixiviado posee una buena cantidad de nutrientes. La puesta en marcha del reactor muestra que el proceso anaerobio se desarrolla de manera satisfactoria en gran parte del proceso, en el cual se observa que el reactor se encuentra en una etapa acetogénica y metanogénica, donde se puede observar que los AGV presentes en el lixiviado no se acumulan y se obtienen eficiencias de remoción más altas que en el final de la puesta en marcha, donde se observa que el sistema tiene una mayor acumulación en el efluente de AGV y un menor porcentaje de remoción de DQO, a pesar de esto es evidente que el reactor soporta de manera satisfactoria las sobrecargas y las condiciones cambiantes del afluente sin llegar a una inhibición, presentando un proceso de acidificación leve que puede ser superado tras la adición de un coagulante en futuras investigaciones con el reactor

➤ Comparando el comportamiento del reactor UASB en cada una de las diluciones se observa claramente un porcentaje de remoción mucho mayor por parte del reactor UASB tomado como tratamiento primario en comparación al existente en el relleno sanitario con la laguna anaerobia del mismo, el reactor UASB se mantuvo siempre por encima del 30% promedio durante todo el periodo de puesta en marcha, por su parte el porcentaje de remoción de DQO de la laguna se mantiene en entre 14 % y 23%, comprobando que el reactor es una opción viable para implementar como tratamiento primario para el tratamiento de lixiviados en un relleno sanitario ofreciendo ventajas muy grandes como menor área de construcción y mejores porcentajes de remoción.

REMOCION DQO PROMEDIO REACTOR		REMOCION DQO LAGUNA ANAEROBIA RELLENO	
DILUCION	% REMOCION	FECHA	% REMOCION
Dilución 50% agua 50%lixiviado	46,3	02/02/2007	21,90
Dilución 25% agua 75%lixiviado	30,5	21/02/2007	23,69
100%lixiviado	41,8	09/03/2007	14,80

- El sistema anaerobio UASB es una alternativa viable para el tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario Antanas, sin embargo se debe tener en cuenta que su funcionamiento también depende de las características cambiantes del residuo , las cuales son determinadas por los estados de degradación de la materia orgánica, teniendo en cuenta que el relleno funciona como un gran reactor anaerobio. Además el funcionamiento del sistema evaluado, depende las condiciones ambientales, de pH y el requerimiento de nutrientes, estos son factores limitantes del proceso que deben ser controlados para este tipo de residuo.
  
- La tecnología UASB no puede ser usada como único sistema de tratamiento de lixiviados, ya que las condiciones en las cuales sale el residuo después del tratamiento no son adecuadas, aun conservan altas concentraciones de carga contaminante, que debe ser removida con el fin de descartar contaminación al medio ambiente.

## 12. RECOMENDACIONES

- Evaluar las concentraciones de nutrientes como nitrógeno y fósforo, que presenta la relación DBO:N:P que incide directamente en el mejoramiento de la remoción de DQO y la estabilización de los AGV.
- Colocar mucha atención en el sistema de conducción del lixiviado el cual presento durante todo el proceso de inoculación y puesta en marcha problemas de taponamiento debido a su gran longitud y diámetro muy pequeño, de igual manera en el mantenimiento de la Temperatura dentro del reactor la cual varía notablemente debido a la falta de recubrimiento del reactor.
- Estabilizar los rangos de pH de entrada al reactor , para que no sobrepase el rango establecido como optimo para los procesos anaerobios el cual se encuentra entre 6,5 a 7,5 unidades para evitar cortos circuitos o inhibiciones en el proceso de remoción de la carga contaminante.
- Colocar en el reactor un aislante térmico para evitar que la temperatura presente variaciones tan marcadas y se vea afectado por las condiciones climáticas del relleno.
- Se recomienda que para futuras investigaciones se centren de manera más profunda en la caracterización del inculo, su actividad metanogénica y características nutricionales debido a que una buena inoculación proporciona mejores resultados en la etapa de operación.

- Analizar los lodos que produce el reactor, su carga contaminante, tratamiento y si pueden reutilizarse dentro del relleno.
  
- Implementar en el reactor un sistema de quemador de metano, para evitar que estos gases escapen hacia la atmosfera sin ser depurados o estudiar la posibilidad de implementar un sistema de aprovechamiento de este gas para beneficio del reactor.



### 13. BIBLIOGRAFIA

- CHERNICHARO CARLOS AUGUSTO DE LEMOS. Reactores Anaerobios, Principios do tratamiento Biológico de Aguas Residuales Volumen 5. Universidad Federal de Minas Gerais – UFMG. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental DESA. Belo Horizonte Brasil. Primera edición 1997.
- CHERNICHARO CARLOS AUGUSTO DE LEMOS & BORJES J. M. Metodología utilizada durante a partida de um reactor UASB de 477 m<sup>3</sup> tratando esgostos típicamente domésticos. XXV Congreso Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. México D.F. 1996
- LETTINGA, G. Y HULSHOFF POL, L.W. UASB. Process design for various types of wastewaters. Wat. Sci. Tech vol. 24 N° 8, 1991
- LETTINGA, G. Y HULSHOFF POL, L.W., KOSTER I. W., WIEGANT W.M., DE ZEEUW W.J., RINZEMA A., High- rate anaerobic waste – water treatment using UASB reactor under a wide range of temperature conditions. Biotechnology and Genetic Engineering Reviews 1984
- METCALF Y EDDY. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales , Tercera edición, Editorial Labor 1994
- POLANCO F.F., GARCIA P.A. HERNANDO S., Actas de Depuración anaerobia de aguas residuales. 4ª Seminario de Depuración de Aguas residuales Valladolid – España 1998
- ROMERO ROJAS JAIRO ALBERTO. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Escuela colombiana de Ingeniería Segunda edición 2002

- SALAZAR CANO ROBERTO E. Fundamentos de Tratamientos Anaerobios. Facultad de ingeniería. Universidad de Nariño 1998
- SALAZAR CANO ROBERTO E. Teoría y Diseño de los Tratamientos de Aguas Residuales. Facultad de ingeniería. Universidad de Nariño primera edición 2002.
- WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, Manual of Practice for Water Pollution Control. Library of congress catalog 1998

# ANEXOS

**ANEXO A:**  
PRUEBAS RELLENO SANITARIO  
ANTANAS

## **ANEXO B:**

### **PRUEBAS REACTOR ANAEROBIO “UASB” ETAPA PUESTA EN MARCHA**

## **ANEXO C:**

PLANOS DE DISEÑO REACTOR “UASB” Y  
ESTRUCUTRAS NECESARIAS PARA SU  
FUNCIONAMIENTO