

# Eficiencia del Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB) a escala piloto en el Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas provenientes de la comunidad de Carapongo - Lurigancho, Chosica

Huaytalla Ramirez, Raul Luis<sup>1</sup>, Cruz Huaranga, Milda<sup>2</sup>

Recibido 20 de abril de 2016, Aceptado 4 de mayo de 2016

*Received: Abril 20, 2016*

*Accepted: May 4, 2016*

## RESUMEN

El objetivo de la investigación es evaluar la eficiencia del Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB) a escala piloto, en el tratamiento de aguas residuales domésticas, provenientes de la Comunidad de Carapongo-Lurigancho, Chosica. El sistema anaerobio de flujo ascendente se caracteriza por separar el gas, el sólido y el líquido, este proceso, es en la zona de digestión y de sedimentación. El tratamiento de aguas residuales domésticas es necesario por la contaminación que origina al ser descargada indiscriminadamente sobre las fuentes de aguas naturales cercanas. En el tratamiento, el agua residual ingresa al fondo del reactor siguiendo una trayectoria ascendente. Los parámetros trabajados para evaluar la eficiencia son: la temperatura de 20 y 40 °C, turbiedad < 5 UNT, DBO < 100 mg/L, DQO < 200 mg/L, el período de retención de 10 y 24 horas, y actividad metanogénica. La investigación tuvo un diseño experimental factorial 22, las variables trabajadas fueron la temperatura 20 y 40 °C, y un tiempo de retención de 10 y 24 horas. Los resultados del afluente fueron: DBO 200 mgO<sub>2</sub>/L.d, turbiedad 80 NTU, DQO 290 mgO<sub>2</sub>/L.d, coliformes totales y fecales mayores a 2500 y 2450 NMP/100ml. Los datos del efluente fueron: el de DBO 20.4 mgO<sub>2</sub>/L.d, turbiedad 4,63 NTU, DQO 28.8 mgO<sub>2</sub>/L.d, coliformes totales y fecales 823 y 691 NMP/100ml, y producción metanogénica en un 63 %, en ese sentido concluimos que el tratamiento mediante el sistema Reactor UASB tuvo una eficiencia de remoción de 79.2 %.

**Palabras clave:** Digestión anaerobia, actividad Metanogénica, lodos, aguas negras, DBO, DQO.

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería ambiental. Universidad Peruana Unión.

<sup>2</sup> Ingeniera Ambiental. Universidad Peruana Unión. Email: mildacruz@upeu.edu.pe

## ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the Efficiency of Anaerobic Reactor Mud Blanket Ascending Flow (UASB) on a pilot scale in the treatment of domestic wastewater from the community of Carapongo - Lurigancho, Chosica. The anaerobic system of ascending flow is characterized by separating gas, solid and liquid, this process is in the digestion and sedimentation. The domestic wastewater treatment is necessary for the pollution caused by the indiscriminately discharges on nearby natural water sources. For treating, the wastewater enters to the bottom of the reactor following an upward trajectory. The parameters worked to evaluate the efficiency are: temperature of 20° and 40 °C, turbidity <5 NTU, BOD <100 mg / L, COD <200 mg / L, the retention period of 10 and 24 hours and methanogenic activity. The study was a 22 factorial experimental design, the variables worked were temperature 20 and 40 °C, and a retention time of 10 to 24 hours. The results of the effluent were: BOD 200 mg O<sub>2</sub> / D.L, Turbidity 80 NTU, COD 290 mg O<sub>2</sub> / D.L, total and fecal coliforms greater than 2500 and 2450 MPN / 100ml. The effluent data were: BOD 20.4 mg O<sub>2</sub> / Ld, turbidity of 4.63 NTU, COD 28.8 mg O<sub>2</sub> / Ld, total and fecal coliforms 823 and 691 MPN / 100ml, and methanogenic production by 63%, in that sense we conclude that the treatment by the UASB Reactor System had a removal efficiency of 79.2%.

**Keywords:** Anaerobic digestion, methanogenic activity, muds, sewage, DBO, DQO.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para la actividad humana, para el desarrollo económico y el bienestar social. Además, el porcentaje de agua en el planeta es 70 %; el 97 % del total es salado, el 2% está en forma de hielo y el 1% es agua dulce (Aldaya, Llamas, Garrido y Varela 2005).

Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2007) advierte que el 80% de las enfermedades más comunes (diarreas, fiebres, dengue, malaria) en las regiones en desarrollo, están relacionadas con la calidad del agua.

Sin embargo, el agua de calidad en el mundo es muy escaza, hay mayor demanda de este recurso. La escasez se debe también a la contaminación del agua, convirtiéndose en agua residual, tanto así que entre 90-95 % del agua residual generada es desechada sin ningún tratamiento (Seghezzeo, 2004).

Cabe indicar, que el agua residual, es aquella cuya característica original a sido modificada por actividades humanas (domésticas, industriales e institucionales) y que por su calidad, requieren un tratamiento previo (Terleira, 2010 y Jairo, 2013).

El riego con aguas residuales domésticas no tratadas, representa un serio riesgo, pues constituyen una importante fuente de agentes patógenos, como bacterias, virus, protozoarios y helmintos que causan infecciones gastrointestinales en los seres humanos. También contienen toxinas químicas muy peligrosas que provienen de fuentes industriales (Sperling, Chernicharo, Soares y Zerbini 2002).

Esto se traduce, que en América latina más de 500 000 ha agrícolas son irrigadas directamente con aguas residuales sin tratar, los principales países son México con alrededor de 350 000 ha, Chile con 16 000 ha, Perú con 6 600 ha y Argentina con 3 700 ha, también en otras regiones del mundo como China con aproximadamente 1 300 000 ha agrícolas (IDRC, OPS y CEPIS. 2002).

En el Perú la OEFA, (2014) informa que se genera aproximadamente 2 217 946 m<sup>3</sup> por día de aguas residuales descargadas a la red de alcantarillado. El 32% de estas recibe tratamiento (Cada habitante en el Perú genera 142 litros de aguas residuales al día). Es decir que gran parte del agua residual es vertida a ríos y lagos, consecuentemente los agricultores captan estas aguas por canales y riegan con estas, a la vez exponiéndose a enfermedades.

En Lima este, Moscoso (2012) encontró alto Niveles de contaminación con coliformes fecales (en rabanito son de 43 – 4300 CF/100 ml y lechuga son de 9.3 – 7500 CF/100 ml), parásitos (en rabanito es 101 parásitos/litros y en lechuga es 17 parásitos/litros) en el agua de los canales de regadío y en las hortalizas cultivadas de Huachipa, Nievería y Carapongo son altos. El 30% de las hortalizas en Carapongo y el 70% en Huachipa y Nievería no eran aptas para el consumo humano.

Cervantes A. et al (2011), afirma que los tratamientos biológicos aerobios y anaerobios constituyen dos grandes alternativas para la depuración de aguas residuales y residuos orgánicos biodegradables. Sin embargo, el tratamiento anaerobio resulta mucho más favorable económicamente por el hecho de no requerir aireación y por la generación de biogás (metano y bióxido de carbono).

El Proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales es el tratamiento anaerobio que se caracteriza por la producción del denominado “biogás”, formado fundamentalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica o eléctrica. En términos químicos el aceptor de electrones puede ser el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono en su estado más reducido, CH<sub>4</sub>. La utilización de este sistema, tendría, como ya se explicará, como ventaja importante, la obtención de un gas combustible (Calderón 2000).

Además este tratamiento está basado en el proceso de digestión anaerobia y puede ser simplificado considerando cuatro fases principales: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis (Morrillo y Fajardo 2005, Caicedo 2006, Paras y Campos 2013).

Basado en el tratamiento anaerobio, se desarrolló una tecnología llamado Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB), que consiste en un reactor en el cual el efluente es introducido a través de un sistema de distribución localizado en el fondo y que fluye hacia arriba atravesando un medio de contacto anaerobio. En la parte superior existe una zona de separación de fase líquida y gaseosa y el efluente clarificado sale por la parte superior. (NORMA OS.090)

En la aplicación de este reactor en Venezuela; Behling, Caldera, Marín, Rincón y Fernández (2004) evaluaron la eficiencia de un reactor anaeróbico de manto de lodo de flujo ascendente (UASB) de 4,570 L, para el tratamiento del efluente de una tenería en condiciones mesofílicas. Se evaluaron CO de 1,0; 2,0; 2,5 y 3,0 kg DQO/m<sup>3</sup>d, TRH de 24 h, DQO, producción de biogás, contenido de metano, pH, alcalinidad total, SST,SSV, AGV y temperatura. Se obtuvieron remoción de DQO de 72% y 58% para las CO de 2,5 y 3,0 kg DQO/m<sup>3</sup>d, respectivamente. El sistema mantuvo el equilibrio, relaciones AGV/alcalinidad bicarbonática menores de 0,30. Los valores porcentaje de metano fueron superiores al 89%. Los resultados muestran que el sistema estudiado tuvo alta eficiencia y una alta actividad metanogénica, bajo las condiciones operacionales aplicadas en este estudio.

Por lo tanto, es necesario tratar las aguas residuales. Esto consiste, en la eliminación de la materia en suspensión, tales como microorganismos patógenos, virus, hongos, metales pesados y otros tipos de contaminantes que se encuentran en estos cuerpos de aguas mediante operaciones unitarias.

La aplicación del reactor UASB en el tratamiento del agua residual doméstica sería una tecnología eficiente y aplicable a poblaciones rurales y periurbanas de clima cálido. Permitiría el reaprovechamiento para el agua de riego, también reduciría la composición microbiológica de las aguas residuales como los coliformes fecales y parásitos, como también los parámetros fisicoquímicos como la turbidez, carga orgánica y otros que constituyen un riesgo perjudicial para la salud y el ambiente. Esto a su vez incrementaría la calidad de los alimentos, libre de contaminantes con el riego de este tipo de agua. El objetivo de esta investigación es evaluar la eficiencia del Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB) a escala piloto en el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas provenientes de la Comunidad de Carapongo-Lurigancho, Chosica.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Lugar de ejecución**

La investigación se ejecutó en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión. En el laboratorio de ingeniería ambiental, lo referente a los análisis fisicoquímicos, en el laboratorio de microbiología, los análisis microbiológicos. La ejecución del prototipo fue en la mansión (Coordenadas UTM 18 L-E:

299750.00 y N:8674321.00) de la Universidad Peruana Unión (Km 19.5 Carretera Central, Ñaña – Lima) y los parámetros como, DBO, DQO y fósforo en los laboratorios LAASMA, de la Universidad Nacional Agraria la molina (UNALM-Av. la Molina s/n la Molina-Lima).

## El Muestreo y medición del caudal

El muestro se llevó a cabo en la comunidad de Carapongo-Lurigancho Chosica en las Coordenadas (18 L-E: 297041.00 y N: 8672071.66). Se tomó 4 muestras, con el método de muestreo simple y representativo en la época de invierno, mes de mayo. El agua residual proviene de los efluentes domésticos que se mezclan con el agua del río que ingresa mediante canales, y que finalmente, esta misma es usada para el riego de plantas de tallo bajo, tales como verduras, hortalizas y especias.

La medición del caudal se hizo con el método del área en el tramo del canal de riego, calculando así con tiempos de recorrido y las repeticiones, la unidad del caudal será en m<sup>3</sup>/s.

## Diseño estadístico experimental

Para la determinación de la influencia de las variables independientes como la temperatura y el tiempo de retención (TRH) en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales domésticas por el Reactor (UASB), se utilizará en el experimento un Diseño factorial 22 con 2 repeticiones, con 8 ensayos, codificados como: A (Temperatura 20 y 40 °C) y B (el tiempo de retención 10 y 24 Horas). Siendo sus niveles mínimo (-1) y máximo (+1) tanto para temperatura y el tiempo de retención; para su aplicación se utilizó el software Statistica 10, por su utilidad para ingeniería (Quevedo 2006, Montgomery y Runger 2011). Veamos las siguientes tablas:

**Tabla 1**  
 Las variables y sus niveles, mínimo (-1) y máximo (+1).

VARIABLES	NIVELES	
	-1	+1
Temperatura (°C):A	20	40
Tiempo de retención (TRH):B	10	24

**Tabla 2**  
 Combinaciones en un diseño factorial 22.

Temperatura (°C):A	Tiempo de retención (TRH):B	
	10 (-1): B1	24 (+1): B2
20 (-1):A1	A1 B1	A1 B2
40 (+1): A2	A2 B1	A2 B2

## Formulación de las hipótesis

Se trabajaron las hipótesis con un nivel de significancia de 0.05, estas hipótesis evaluaron la temperatura, el tiempo de retención, la interacción y las repeticiones. Veamos las siguientes:

Para la temperatura (°C), en la hipótesis nula los efectos de las diferentes temperaturas sobre la eficiencia del tratamiento son iguales y en la hipótesis alternativa los efectos sobre las eficiencias son diferentes. Con el tiempo de retención (TRH), en la hipótesis nula los efectos de los diferentes tiempos de retención sobre la eficiencia del tratamiento son iguales y la alternativa son diferentes. En las interacciones, la hipótesis nula no existe interacción entre la temperatura y el tiempo de retención y la alternativa es que si hay interacciones entre las variables. Por ultimo con las repeticiones, en la hipótesis nula las repeticiones en los tratamientos son iguales y en la alternativa son diferentes. La condición es que se rechaza la hipótesis nula de cada uno si el P value es menor de 0.05.

**Tabla 3**

*Variables y su interacción en los diferentes ensayos.*

Ensayos	Repeticiones	Temperatura (°C):A		Tiempo de retención (TRH):B	
1	1	-1	20	-1	10
2	1	+1	40	-1	10
3	1	-1	20	+1	24
4	1	+1	40	+1	24
5	2	-1	20	-1	10
6	2	+1	40	-1	10
7	2	-1	20	+1	24
8	2	+1	40	+1	24

## Análisis pre – tratamiento en el laboratorio

Se analizó los parámetros fisicoquímicos en (pH, turbidez, conductividad, DBO, DQO, fósforo y AGV), los parámetros microbiológicos (coliformes totales y fecales). Estas muestras aseguradas y cerradas adecuadamente, según el tipo de parámetros a analizar. Los parámetros tales como el pH, turbidez, conductividad, coliformes totales y fecales fueron analizados en los laboratorios de la Universidad Peruana Unión (UPeU), pero el DBO y DQO fueron trasladadas y analizadas en los laboratorios de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM) (APHA 2005).

## Construcción del Reactor prototipo UASB

La duración de la construcción del prototipo duro 8 meses completos. La construcción y diseño del Reactor considero el cálculo con las ecuaciones y parámetros reglamentarios (Caicedo 2006, Delgado y Otero 2008, Norma OS. 090) tales como:

### *Caudal y velocidad de flujo ascendente del afluente al ingreso al reactor*

El caudal se calculó teniendo de dato el tiempo de retención (10 horas y 24 horas) y el volumen total del reactor (150 litros o 0.15 m<sup>3</sup>) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{VR}{TRH}$$

Donde:

*VR*: volumen de reactor (m<sup>3</sup> o L)  
*TRH*: tiempo de retención hidráulica (horas o días)  
*Q*: caudal mínimo de ingreso (m<sup>3</sup>/h o L/h)

El caudales resultantes fueron los siguientes, para un tiempo de retención de 10 horas presentó 15 L/h y para un tiempo de retención de 24 hrs. presentó 6.25 L/h (Días y Vega 2013). Para la velocidad de flujo se calculó una velocidad del fluido de acuerdo a la siguiente ecuación de mecánica de fluidos:

$$Vel = \frac{Q}{Asup}$$

Donde:

*Vel*: velocidad ascensional del fluido (m/h)  
*Asup*: área superficial del reactor (m<sup>2</sup>), el radio es 0.126 m  
*Q*: caudal mínimo de ingreso (m<sup>3</sup>/h o L/h)

Los cálculos para un caudal de 15 L/h presentó una velocidad ascensional de 3 m/h y para 6.25 L/h fue 0.13 m/h (Morillo y Fajardo 2007).

### *Volumen, forma, altura efectiva, área, flujo másico, carga hidráulica del reactor*

El volumen del reactor es de acuerdo al aporte per cápita al alcantarillado en aguas residuales domésticas por persona en la ciudad de lima 150 L/hab.día (OEFA, 2014), por ello se aplicó un volumen de 150 litros (0.15 m<sup>3</sup>) para tratar el efluente que produce un habitante por día. Existe diseño que puede hacerse en forma rectangular o cilíndrica, sin embargo se escogió la forma cilíndrica por ventajas hidrodinámicas y para evitar las zonas muertas (Delgado y Otero 2008). La altura efectiva fue de 3 metros, el área del reactor fue 0.0498 m<sup>2</sup>, el flujo másico trabajó con dos factores tales como la DBO (200 mg/L <> a 2 Kg/m<sup>3</sup>) y la DQO (290 mg/L <> 2.9 Kg/m<sup>3</sup>), resultando 0.2 Kg DBO/d y 0.29 Kg DQO/d. por último la carga hidráulica resultó 3 m/h y 0.13 m/h (Morillo y Fajardo, 2007; Salazar, Barceló y Domínguez, 2012).

*Sistema de alimentación*

El sistema de alimentación o abastecimiento al reactor consistió mediante una bomba peristáltica la cual nos permite dosificar y mantener un caudal aproximadamente continuo del agua residual del tanque de almacenamiento al reactor (Rincón, Cepeda, Díaz, Behling, Marín y Bauza 2008). Esta bomba se conecta a una tubería de media pulgada que está en el fondo del reactor y permite que el agua residual se distribuya por la parte inferior del sistema poniéndose en contacto con el manto de lodos (Pérez, Aldana y Cárdenas, 2012). El efluente tratado sale por la parte superior por un orificio conectado a una tubería de media pulgada de diámetro, de acuerdo al siguiente diagrama gracias a Torres, Rodríguez, Barba, Morán y Jorge (2005) pp 55

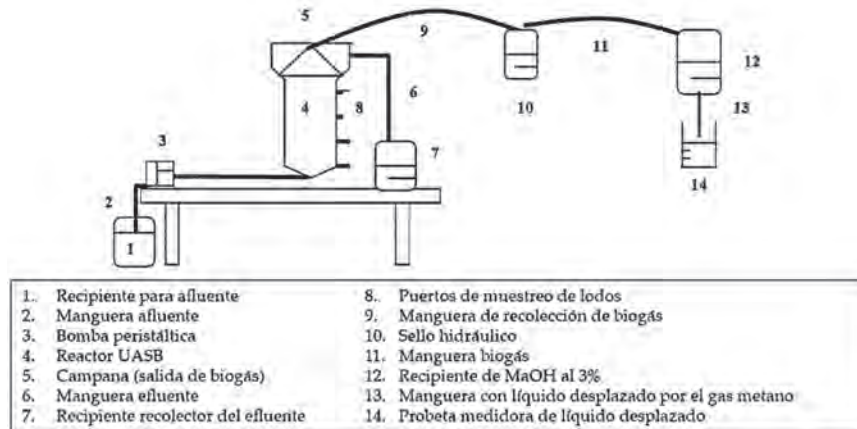


Figura 1. Esquema de sistema de tratamiento del Reactor (UASB). Torres, Rodríguez, Barba, Morán y Jorge 2005, pp 55.

*Tiempo de Retención*

El tiempo de retención del Reactor UASB es una variable independiente que se controló, debido a que se quiere evaluar la eficiencia del tratamiento, considerándose dos tiempos de retención de 10 y 24 horas como parte de la experimentación (Daniel y Hoyos 2014, Caldera, Madueño, Griborio, Fernández y Gutiérrez 2003 ).

*Temperatura de tratamiento*

La temperatura del tratamiento en el Reactor UASB es una variable independiente que estuvo controlada, debido a que se quiso evaluar la eficiencia del tratamiento, considerándose dos temperaturas de 20 °C y 40 °C como parte de la experimentación (Rodríguez y Foresti 2011).



### *Velocidad del flujo de gas y dimensiones del sedimentador (Campana)*

La velocidad del flujo de gas con la que sale, se calculó teniendo en cuenta las cargas hidráulicas que resultaron 12 m/h y 0.52 m/h y para dimensionar el sedimentador se tomó el caudal máximo de experimentación (0.15 m<sup>3</sup>/h) y el mayor flujo gas resultando un área de abertura máxima (0.0125 m<sup>2</sup>), el área de la sección transversal de la campana (0.0373 m<sup>2</sup> y su radio 0.10 m), el ancho de abertura (0.026 m), la distancia del ancho de abertura con el extremo de la campana (0.0746 m), la altura de campana (0.129 m), el traslapo (0.039 m), el ancho de los deflectores (0.065 m) y la longitud de los deflectores (0.13 m). Conforme a la figura 1, 2 y 3. (Delgado y Otero, 2008)

### *Abastecimiento y tratamiento del Biogás*

El gas que generó el tratamiento en el reactor, se lo captó en el separador de gas conectado a una llave que controlaba la salida del gas. Este gas está compuesto de CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>, dando entender que contiene impurezas que se tiene que eliminar o remover, para lograr tal pureza se desarrolló un tratamiento mediante un frasco conectado a la llave de salida de gas mediante una manguera especial para el mismo, el frasco esta contenido con Hidróxido de sodio al 3% (NaOH) que sirve para retener las impurezas y dejar libre solo al CH<sub>4</sub>. Este gas purificado se le denomina como biogás, que es el mismo metano (CH<sub>4</sub>). La medición de producción de metano será mediante una probeta graduada de polietileno (capacidad de 2000 ml) conectada a una manguera por donde sale el biogás. Esta probeta esta volteada y su entrada está en contacto con 3 litros de agua de mesa dentro de un recipiente, tal como el diagrama anterior (Pérez 2010).

## **Control durante el tratamiento**

Los parámetros considerados importantes para evaluar y controlar el agua residual doméstica antes, durante y después el tratamiento; se podrán observar en la siguiente tabla:

**Tabla 4**  
*Parámetros y variables de medición*

TIPOS DE PARÁMETROS	PARÁMETROS	FRECUENCIA	MÉTODO DE CONTROL	OBSERVACIÓN
Fisicoquímicos	ph	Diaria	Método Electrométrico o analítico	El uso de un pH metro
	Turbidez (UNT)	Diaria	Método fotométrico o nefelómetro	El uso del turbidímetro
	Temperatura (°C)	Diaria	-----	El uso de un termómetro
	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	Semanal	Método de Winkler	Por incubación
	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	Semanal	Método Titulométrico	Reflujo con Dicromato
	Caudal (m <sup>3</sup> /h o L/h)	Diario	Método de área	Medicación del diámetro, distancia y tiempo
	Producción CH <sub>4</sub> (L)	Diario	Test de AME	Diferencias volumétricas

Microbiológicos	Coliforme totales (NMP/100 ml)	Quincenal	Método NMP	Incubación y tubos múltiples
	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Quincenal	Método NMP	Incubación y tubos múltiples

*Nota.* Morillo y Fajardo 2005, Caicedo 2006, Pérez, 2010

### *Control de parámetros fisicoquímicos*

Los parámetros fisicoquímicos medidos de los efluentes del tratamiento fueron controlados de acuerdo a la tabla 3, durante los 8 meses de tratamiento se hicieron 8 ensayos conforme al método experimental factorial 2<sup>2</sup> conforme a la tabla 2. En los primeros 4 ensayos que corresponde a la primera repetición, se midieron: DBO y DQO (4 veces por mes), turbidez (24 veces por mes), pH (24 veces por mes), temperatura (24 veces por mes), caudal (24 veces por mes) y producción del biogás (CH<sub>4</sub> -24 veces por mes). En los últimos 4 ensayos que corresponde a la segunda repetición, se midieron: DBO y DQO (4 veces por mes), turbidez (24 veces por mes), pH (24 veces por mes), temperatura (24 veces por mes), caudal (24 veces por mes) y producción del biogás (CH<sub>4</sub> -24 veces por mes). Se consideró que los parámetros de control para el reactor no se analizaron los días sábados y domingos, porque no hay atención en los laboratorios de las universidades, solo se hacen las del abastecimiento y la descarga.

### *Control de parámetros microbiológicos*

Los parámetros microbiológicos medidos de los efluentes del tratamiento durante los 8 meses fueron controlados conforme a la tabla 2 y 3 (en sus 8 ensayos con sus 2 repeticiones), además se midieron de la siguiente forma: coliformes totales y fecales (2 veces al mes).

## **Análisis de datos postratamiento**

Los análisis de datos postratamiento se realizaron promediando aritméticamente los resultados en los 4 primeros ensayos y los 4 últimos. Estos resultados, son las variables de respuesta tanto para los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos considerados. Además estos resultados fueron ingresados al software de Statistica versión 10, en el cual se verificaron los efectos de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas con el Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados obtenidos fueron promediados, de acuerdo al tratamiento anaerobio con el Reactor UASB y el diseño experimental estadístico factorial 2<sup>2</sup> con 2 repeticiones, que luego serán ingresados en el software estadístico, “Statistica 10”. Se presenta la siguiente tabla:

**Tabla 5**  
La variable de respuesta de los ensayos y su eficiencia del tratamiento (%)

Ensy.	Repe.	Temp. (°C)		Tiempo Retención (TRH)	Reducción de turbidez (UNT)	Variables de respuesta											
						Remoción de la DBO (mgO <sub>2</sub> /L)	Remoción de la DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Producción del Biogás CH <sub>4</sub> (L)	Reducción de coliformes totales (NM-P/100ml)	Reducción de coliformes fecales (NM-P/100ml)	Efic. %	Efic. %	Efic. %	Efic. %	Efic. %		
						Efic. %	Efic. %	Efic. %	Efic. %	Efic. %	Efic. %	Efic. %	Efic. %				
1	1	-1	20	-1	10	11	86	24.5	83	50.0	83	40.0	43	1100	56	1000	58
2	1	+1	40	-1	10	2.5	97	20.1	90	22.0	92	61.2	62	900	64	890	63
3	1	-1	20	+1	24	4.0	95	22.5	89	30.0	90	65.1	65	810	68	600	75
4	1	+1	40	+1	24	1.2	99	17.6	91	15.0	95	80.0	71	500	80	500	81
<i>Promedio de la primera repetición</i>						4.67	94.3	21.2	88.3	29.3	90	61.5	60.3	828	67	748	69.3
5	2	-1	20	-1	10	10	88	24.0	88	40.0	86	41.0	44	1000	60	750	69
6	2	+1	40	-1	10	2.1	97	18.2	91	24.0	92	60.5	62	850	66	510	63
7	2	-1	20	+1	24	4.6	94	20	90	35.0	88	64.6	64	910	68	401	67
8	2	+1	40	+1	24	1.6	98	16.2	92	14.0	95	85	73	510	80	410	79
<i>Promedio de la segunda repetición</i>						4.6	94.3	19.6	91	28.3	90.3	62.8	60.8	818	68.5	518	69.5
<i>Promedio G</i>						4.63	94	20.4	90	28.8	90	62.2	60.6	823	67	694	71
<b>Desv. Stand</b>						<b>3.81</b>	<b>3.04</b>	<b>12.5</b>	<b>16.0</b>	<b>215.39</b>	<b>230.65</b>						

Fuente: propia

## Reducción de la turbidez (UNT)

La turbidez del agua residual antes del tratamiento fue 80 UNT, en el momento que se aplicó al Reactor (UASB) durante todo el tiempo del proyecto, se pudo observar una pronunciada reducción, logrando en los primeros cuatro ensayos un promedio de 4.67 UNT y en los últimos cuatro ensayos 4.6 UNT, no existe mucha variación entre estos dos grupos, expresando así una eficiencia de reducción en un 94 % con su promedio indicado en la tabla 6.

## Remoción de la DBO y DQO (mgO<sub>2</sub>/L)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) del agua residual antes del tratamiento fue 200 mgO<sub>2</sub>/L, en el momento que se aplicó al Reactor (UASB) durante todo el tiempo del proyecto, se obtuvieron resultados significativos, logrando en los primeros cuatro ensayos un promedio de 21.2 mgO<sub>2</sub>/L y en los últimos cuatro ensayos 19.6 mgO<sub>2</sub>/L, no existe mucha variación entre estos dos grupos, explicando así una eficiencia de remoción del 90 %. La demanda Química de Oxígeno (DQO), presentó inicialmente 290 mgO<sub>2</sub>/L y después logró un promedio en los primeros cuatro ensayos un promedio de 29.3 mgO<sub>2</sub>/L y en los últimos cuatro ensayos 28.3 mgO<sub>2</sub>/L, no existe mucha variación entre estos dos grupos, explicando así una eficiencia de remoción de 90 % con su promedio indicado en la tabla 6.

## Producción de Biogas-CH<sub>4</sub> (L)

La producción de biogás se logró gracias al Test de AME con su método volumétrico, en el que se utilizó una solución NaOH al 3 % con el objetivo de obtener un

gas más puro que el metano ( $\text{CH}_4$ ). Inicialmente se produjeron 23 litros, luego en los ensayos se incrementó la producción el primeros cuatro ensayo de 61.5 litros y luego finalmente 62.8 litros, explicando una eficiencia de 60.6 % con su promedio indicado en la tabla 6.

### Reducción de coliformes totales y fecales (NMP/100 ml)

Los resultados microbiológicos del agua residual antes del tratamiento presentó un cantidad considerable de coliformes totales y fecales, 2500 y 2450 NMP/100 ml, estos son indicadores de contaminación, durante la aplicación a dicho reactor; esto fue reduciendo significativamente en los primeros ensayos llevo a 828 y 748 NMP/100 ml y en los últimos ensayos 823 y 624 NMP/100 ml respectivamente, explicando una eficiencia de reducción de 67 y 71 %, con su promedio indicado en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Resumen de resultados del tratamiento con el Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB) y la comparación con la normativa regulatoria de agua en el Perú.*

Variables de respuesta	Resultados promedio	% Eficiencia del tratamiento	*ECA de agua categoría 3	**LMP de efluentes de PTAR
Reducción de la turbidez (UNT)	4.63	94	5	-
Remoción de la DBO( $\text{mgO}_2/\text{L}$ )	20.4	90	15	100
Remoción de la DQO( $\text{mgO}_2/\text{L}$ )	28.8	90	40	200
Producción del Biogás- $\text{CH}_4$ (L)	62.2	63	-	-
Reducción de coliformes totales (NMP/100ml)	823	67	5000	-
Reducción de coliformes fecales (NMP/100ml)	694	71	1000	10 000
Promedio		79.2		

*Nota:* \*D.S N° 002-2008-Minam ECA para agua categoría 3

\*\*D.S N° 003-2010-Minam LMP para efluentes de PTAR.

### Resultados del análisis estadístico:

En el análisis de la eficiencia del reactor y de acuerdo a la hipótesis formulada anteriormente se presentan los siguientes gráficos:

*Para la Temperatura °C, que trabaja con dos niveles (20 y 40 °C) y el Tiempo de Retención (TRH), que trabaja con dos niveles (10 y 24 horas), con sus respectivas repeticiones:*

Para el análisis sin las interacciones: fig. 2 al 5, en la mayoría observamos que tanto la temperatura como el tiempo de retención, son variables independientes muy

influyentes en el tratamiento, además en las repeticiones no muchas variaciones tanto en los cuatro primeros ensayos y los cuatro últimos ensayos. Estos resultados permiten aceptar la hipótesis alterna y rechazar la hipótesis nula.

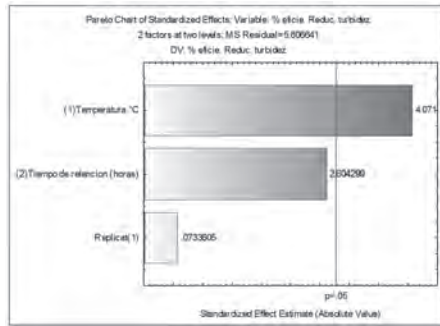


Figura 2. El coeficiente de determinación R= 85.4 %.

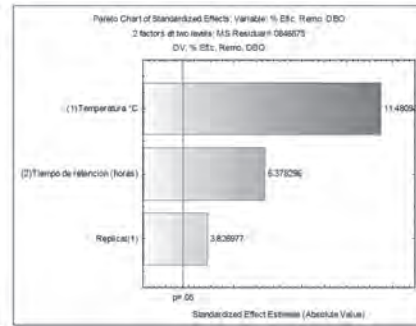


Figura 3. El coeficiente de determinación R= 97.9 %.

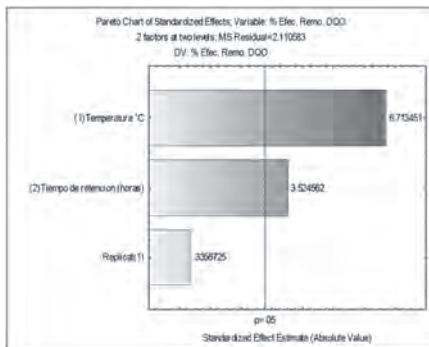


Figura 4. El coeficiente de determinación R= 93.5 %.

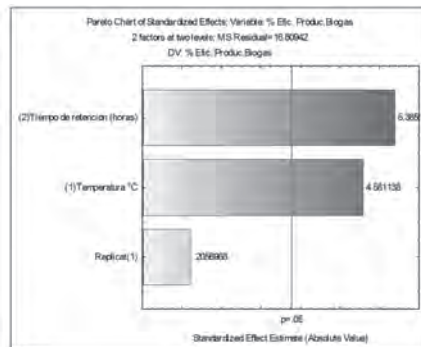


Figura 5. El coeficiente de determinación R= 92.6 %.

Para determinar la temperatura y el tiempo de retención adecuado para lograr la eficiencia en el tratamiento según el análisis que presenta los gráficos de superficie de respuesta:

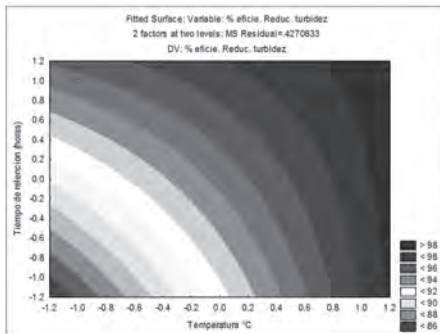


Figura 6. Indica que mayor temperatura y mayor tiempo de retención, la eficiencia de reducción de turbidez hasta un 98 %.

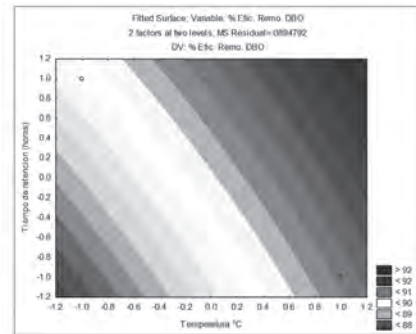


Figura 7. Indica que mayor temperatura y mayor tiempo de retención, la eficiencia de remoción de DBO hasta un 92 %.

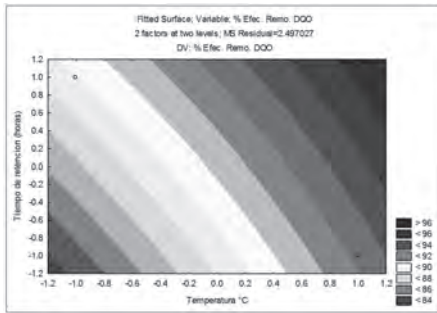


Figura 8. Indica que mayor temperatura y mayor tiempo de retención, la eficiencia de remoción de DQO hasta un 96 %.

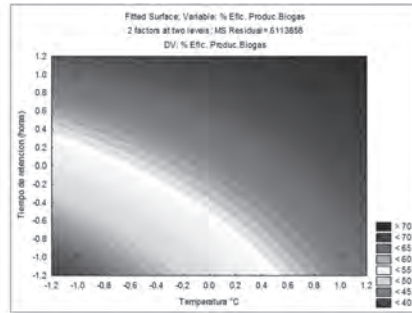


Figura 9. Indica que mayor temperatura y mayor tiempo de retención, la eficiencia de producción de Biogás hasta un 70 %.

De los gráficos anteriores, observamos que la eficiencia del tratamiento depende una temperatura mayor tal como hasta 40 °C y un tiempo de retención mayor como de 24 horas o 1 día, comprobando así lo dicho por muchos autores, pero esto dependerá del volumen de agua a tratar, el caudal y la carga orgánica. Este reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente es a escala piloto, por ello adquirió estas condiciones.

*Otros datos tales como la distribución normal, residuos aleatorios y la interacción en los siguientes gráficos:*

En los siguientes gráficos podemos observar algunos resultados importantes tales como la turbidez, DBO y la producción del biogás. En estos gráficos se analizará la distribución normal, la distribución aleatoria de los residuos y la interacción en las distintas réplicas.

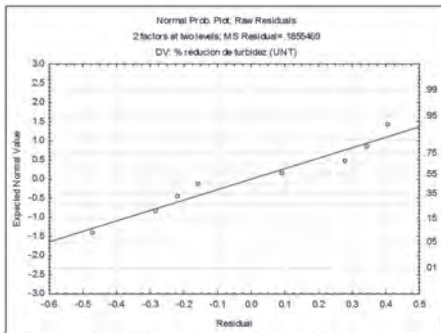


Figura 10. Indica que los datos presentados como resultados del tratamiento en la reducción de la turbidez, siguen una distribución normal.

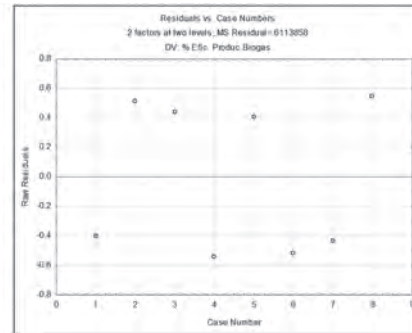


Figura 11. Indica que los datos de los residuos presentados como resultados del tratamiento en la producción del Biogás, siguen una distribución aleatoria.

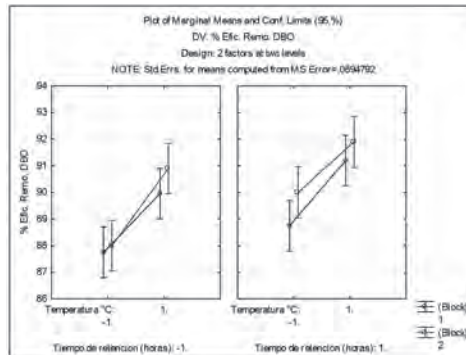


Figura 12. Indica que los datos presentados como resultados del tratamiento en la remoción del DBO, presenta una interacción significativa.

## CONCLUSIONES

Se concluye que el Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB), es un sistema tratamiento eficiente en la reducción de turbidez (94 %) , en la remoción de DBO y DQO (90 %), la producción de Biogás (CH<sub>4</sub>) (63 %) y para la reducción de coliformes totales y fecales (67 y 71 %), con promedio general de eficiencia de 79.2 %.

Además es importante destacar que las variables independientes como lo es la temperatura y el tiempo de retención son muy importantes e influyentes en el tratamiento, por lo que su interacción es significativa, indicándonos que la temperatura adecuada es de 40 °C y el tiempo de retención de 24 horas. Esto explica que en estas condiciones hay gran actividad bacteriana anaerobia que permite la rápida degradación de los contaminantes de las aguas residuales domésticas de Carapongo.

Por último los resultados demostraron que la eficiencia del reactor UASB permite el cumplimiento de la normativa ambiental para el agua, tales como el D.S N° 002-2008-Minam ECA de agua para categoría 3, de riego para plantas de tallo corto, además para el cumplimiento del D.S N° 003-2010-Minam LMPs para efluentes procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

## RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con la investigación, en lo referente a los efectos en el tratamiento con las cargas hidráulicas altas y bajas.

Investigar como incrementar la eficiencia del reactor sin la aplicación de sustancias químicas.

Aplicar para zonas rurales y en poblaciones que no cuentan con servicio completo de alcantarillado.

Por último, se recomienda la unidad de desinfección después del tratamiento del reactor, por asuntos de salubridad.

## Referencias

- Aldaya M, Llamas M, Garrido A y Varela C (2005). Importancia del conocimiento de la huella hidrológica para la política española del agua. Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid. Madrid. < [http://oa.upm.es/2239/1/INVE\\_MEM\\_2008\\_53807.pdf](http://oa.upm.es/2239/1/INVE_MEM_2008_53807.pdf) >
- Terleira E (2010). "EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN FECAL DEL AGUA SUPERFICIAL DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO SHILCAYO UBICADA ENTRE LA BOCATOMA Y EL ASENTAMIENTO HUMANO VILLA AUTÓNOMA". Tarapoto < <http://tesis.unsm.edu.pe/jspui/bitstream/11458/327/1/Enrique%20Terleira%20Garc%C3%ADa.pdf> >
- IDRC, OPS y CEPIS (2002). Sistemas integrados de tratamiento y uso de Aguas Residuales en América Latina: realidad y potencial. < <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaar/e/proyecto/proyecto.html> >
- Seghezzo, L. (2004). Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions. Thesis Ph. D. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Sperling, M., Chernicharo C, Soares A y Zerbini A (2002). Coliform and helminth eggs removal in a combined UASB reactor - baffed pond system in Brazil: performance evaluation and mathematical modelling. *Water Science and Technology* 45(10), 237-242.
- Cervantes A, Cruz, Aguilar, Castilla y Meraz (2011), febrero 7. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL AGUA TRATADA EN UN REACTOR UASB ESCALA PILOTO. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 10 (1): 67 – 77 págs.
- Organismo de evaluación y fiscalización ambiental (OEFA). (2014). p 43. Lima Perú. NORMA OS.090 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Perú.
- Cárdenas C, y otros. (2012), noviembre 29. Desempeño de un reactor biológico secuencial (RBS) en el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista colombiana de biotecnología*. Vol. 14 (2). 111-120 págs.
- Rincón N , Cepeda, Díaz, Behling, Marín y Bauza.(2008). Behavior of organic fraction in water separated from extracted crude oil with anaerobic digestion. *Revista técnica de ingeniería de la universidad de Zulia*. Vol. 31 (2). 169 – 176 págs.
- Rodríguez J. y Foresti E. (2011), mayo 20. A novel aerobic-anoxic biological filter for nitrogen removal from UASB effluent using biogas compounds as electron donors for denitrification. *Revista facultad de ingeniería de la universidad de Antioquia*. N° 60, 78 -80 págs.
- Caicedo F. (2006). DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ARRANQUE DE UN REACTOR U.A.S.B. PILOTO PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS. (tesis para el título de especialista en Ingeniería ambiental – Área Sanitaria). Aceso: Ing. Marin Jorge. Manizales: 49 pp. Universidad Nacional de Colombia. [consultado 26 de marzo]. Formato pdf.



- Morillo F. y Fajardo E., 2005. ESTUDIO DE LOS REACTORES UASB PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA [tesis para el título de especialista en Ingeniería ambiental – Área Sanitaria]. Manizales: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. 84 pp. [consultado 26 de marzo]. Formato pdf.
- Daniel J. y Hoyos G. 2014. TIEMPO DE RETENCIÓN DE UN REACTOR UASB QUE OPERA EN CLIMA TEMPLADO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS-LIMA. (Tesis para el título Ingeniero Ambiental). Asesor: Ing. Moreno Juan. Ñaña: Facultad de Ingeniería y Arquitectura. 55 pp. Universidad Peruana Unión. [consultado en Biblioteca el 25 de Abril]. Formato pdf.
- Delgado J y Otero J (2008). DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA BIOLÓGICO UASB A NIVEL PILOTO DE LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS PRODUCIDOS EN EL RELLENO SANITARIO DEL MUNICIPIO DE SAN GIL. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL SANTANDER. BUCARAMANGA.
- Torres P, Rodríguez J, Barba L, Morán A y Navarez J (2005). Tratamiento anaerobio de lixivios en reactores UASB. Ingeniería y Desarrollo. Colombia. ISSN (Versión impresa): 0122-346