

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DE UN BIODIGESTOR TUBULAR ANAEROBIO A ESCALA PILOTO

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF REMOVAL OF ORGANIC MATTER FROM A PILOT SCALE PIPELINE ANAEROBIO BIODIGESTOR

Cubillos Sierra Dayana F.¹, Huertas Huertas Diana M.², Contreras León Henry³

¹ Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, , dayanacubillos@usantotomas.edu.co

² Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás diana.huertas@usantotomas.edu.co

³ Ingeniero Ambiental y Sanitario, Esp. en Química Ambiental, Universidad Santo Tomás henrycontreras@usantotomas.edu.co

Recibido: Agosto 20 de 2017 Aceptado: Enero 20 de 2018

RESUMEN

El presente trabajo estudia la eficiencia de un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto en la Institución Educativa Agrícola Guacavía, a través de un diseño experimental completamente al azar 3x2. Se realizaron seis tratamientos; correspondientes a las combinaciones de los tiempos de retención hidráulica de 5 y 8 días y las relaciones estiércol – agua de lavado de 1:10, 1:7 y 1:4 con tres réplicas de tratamiento para evidenciar las relaciones entre estas. La evaluación se realizó mediante los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura, conductividad, DBO, DQO, SST, SSV y Ssed. Los resultados obtenidos en términos de remoción de materia orgánica mostraron que el TRH más eficiente es el de 8 días para la relación 1:7, obteniendo porcentajes de remoción de 84,95% para DBO, 88,74% para DQO, 84,48% para Ssed, 81,04% para SST, y 86,5% para SSV. Sumado a esto, estadísticamente se encontraron diferencias significativas entre los resultados obtenidos de los TRH y las relaciones, para los parámetros DBO y DQO, y SST y SSV.

Palabras clave: Tiempo de retención hidráulica, relación estiércol – agua, diseño experimental, porcentaje de remoción.

ABSTRACT

The present work studies the efficiency of an anaerobic tubular biodigester at pilot scale in the Guacavía Agricultural Educational Institution, through a completely random 3x2 experimental design. Six treatments were performed; corresponding to the combinations of the hydraulic retention times of 5 and 8 days and the manure - wash water ratios of 1:10, 1: 7 and 1: 4 with three treatment replicas to show the relationships between them. The evaluation was performed using the following physicochemical parameters: pH, temperature, conductivity, BOD, COD, SST, SSV and Ssed. The results obtained in organic matter removal terms showed that the most efficient HRT is that of 8 days for the 1: 7 ratio, obtaining removal percentages of 84.95% for BOD, 88.74% for COD, 84.48% for Ssed, 81.04% for SST, and 86.5% for SSV. Added to this, statistically significant differences were found between the results obtained from the HRT and the relationships, for the parameters BOD and COD, and SST and SSV.

Key words: hydraulic retention time, ratio manure - water, experimental design, percentage of removal.

1. INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa L.*) es considerado el cultivo más importante del mundo, además El tratamiento de aguas en Colombia se ha convertido en uno de los problemas ambientales más difíciles de manejar, puesto que los vertimientos de aguas residuales provenientes de los hogares y del sector agropecuario contaminan fuentes hídricas tales como ríos, aguas subterráneas, lagunas, humedales, entre otros, ocasionando impactos ambientales negativos sobre el ambiente y la salud humana (Flickr, 2018).

Asimismo, se reconoce que los vertimientos generados por el sector agropecuario colombiano son los más contaminantes, en especial los provenientes de la porcicultura, debido a que estas originan impactos ambientales negativos cuando no se les brinda un adecuado tratamiento y disposición final a los subproductos producidos, convirtiendo a la actividad porcícola en una de las actividades más examinadas del sector agropecuario por el control requerido durante el proceso. No obstante, estas aguas residuales pueden ser tratadas por diferentes sistemas de tratamiento tales como lagunas de oxidación, biodigestores, plantas de tratamiento, etc. (CORMACARENA, 2015).

Uno de los sistemas más eficientes son los biodigestores, que constituyen una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos generados en las empresas agropecuarias, debido a que disminuye la carga contaminante, mejora la capacidad fertilizante del material, elimina los malos olores y genera una energía renovable denominada biogás, utilizado para cocer alimentos, generar electricidad, y obtener luz directamente usando lámparas de gas (Campos, 2011).

En este estudio se implementó un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto para el tratamiento de las aguas residuales porcinas. Este es un recinto hermético que cuenta con una entrada alimentada por una dilución de estiércol en agua (kilogramo de estiércol: litros de agua), de manera que, las bacterias que se encuentran en el interior degradan la materia orgánica contenida a fin de obtener alta remoción de DQO y DBO en el efluente del sistema (Arrieta, 2016).

El objetivo de este artículo es evaluar la eficiencia de un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales porcinas, a través de un modelo experimental el cual opera con tiempos de retención hidráulica de 5 y 8 días (más cortos que los tiempos convencionales) y cargas orgánicas teniendo en cuenta las relaciones de estiércol porcino – agua 1:4, 1:7 y 1:10 (kilogramos de estiércol húmedo: litros de agua) según expone Millares (2011), demostrando que es posible obtener porcentajes de remoción de materia orgánica en tiempos cortos de retención, con un biodigestor de dimensiones inferiores a las convencionales.

Además, se realizó una comparación de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en los monitoreos con la normatividad vigente, se calculó el porcentaje de remoción de materia orgánica y se plantearon propuestas de optimización en cuanto al manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales provenientes del proceso de cría de cerdos, con el propósito de garantizar su producción con mejores condiciones operativas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se llevó a cabo en la Institución Educativa Agrícola Guacavía, ubicada en la Inspección Guacavía, municipio de Cumaral, Meta, los análisis se realizaron en el laboratorio de Aguas Residuales de la Universidad Santo Tomás, Campus Aguas Claras de la ciudad de Villavicencio, Colombia.

Para la evaluación de la eficiencia de remoción del biodigestor tubular anaerobio a escala piloto, inicialmente se estableció un sistema de variables para elaborar el modelo experimental. En este caso se trata de un diseño completamente al azar 3x2 con seis tratamientos que cuenta con tres repeticiones cada uno, el cual se realizó a partir de los tiempos de retención cortos establecidos (5 y 8 días) y las cargas contaminantes ingresadas (1:4, 1:7 y 1:10), seleccionados a partir de la literatura donde se encontraron estudios como el realizado por Beteta 2005 y Millares 2011, donde proponen relaciones 1:4 (una parte de estiércol por cuatro partes de agua) como la recomendada, pero se puede disponer hasta la proporción 1:10 para el estiércol de cerdo.

Para la implementación de los sistemas se elaboraron 3 cajas trapezoidales (Figura 1) de madera, las cuales fueron ubicadas en un área dentro de la granja porcina de la institución, y se realizó la construcción de cada uno de los biodigestores con base en el Manual de construcción y uso de biodigestores tubulares plásticos (Beteta y González, 2005) (En este caso se trata de un plástico negro calibre 6 de ancho de rollo de 1 metro). Una vez elaborados los reactores se dio inicio a la fase de adaptación la cual tardó 19 días en evidenciar la producción de biogás, seguido de esto se realizaron los seis tratamientos teniendo en cuenta las variables anteriormente establecidas.

Los análisis de muestra se realizaron según las técnicas establecidas en los métodos estándar para el monitoreo de aguas residuales de la Asociación Estadounidense de Salud Pública (APHA), la Asociación Estadounidense de Obras Hídricas (AWWA) y la Federación Internacional del Agua (WEF), (2005) y el instructivo para la toma de muestras de aguas residuales del IDEAM (2007), realizando la recolección de la muestra cada biodigestor a escala piloto y analizándolas en el laboratorio del Campus Aguas Claras de la Universidad Santo Tomás.

El total de muestras fue de 288 teniendo en cuenta el diseño experimental completamente al azar 3x2, estas muestras se tomaron en horas de la mañana en el efluente y afluente de cada biodigestor durante el inicio y finalización de cada tiempo de retención hidráulico establecido para cada tratamiento durante los 4 meses de duración del proyecto, los tratamientos evaluados fueron 6: 1) Relación estiércol: agua 1:10, 8 días, 2) Relación estiércol: agua 1:7, 8 días, 3) Relación estiércol: agua 1:4, 8 días, 4) Relación estiércol: agua 1:10, 5 días, 5) Relación estiércol: agua 1:10, 5 días, 6) Relación estiércol: agua 1:10, 5 días, según los valores establecidos para cada variable teniendo en cuenta la literatura encontrada. Además se realizó un triplicado para cada uno de los seis tratamientos que permitió relacionar la información recopilada para cada TRH y carga contaminante determinada.

La hipótesis planteada en esta investigación fue que el biodigestor tubular anaerobio a escala piloto presentará remociones de materia orgánica superiores al 80%, en alguno de los experimentos empleados en la presente investigación, operando con tiempos de

retención hidráulicos (5 y 8 días) y relaciones estiércol – agua (1:4, 1:7 y 1:10) determinados a través de una serie de experimentos.

Por otra parte, con base en los datos obtenidos en el laboratorio se realizó el cálculo del porcentaje de remoción de materia orgánica teniendo en cuenta los parámetros DBO, DQO, SST, SSV y Ssed, para determinar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales con TRH de 5 y 8 días, empleando la Ecuación 1 propuesta por (Gutiérrez, Aragón, y Valencia, 2014).

Eficiencia de remoción (%) = $\frac{\text{Carga cont.de entrada} - \text{Carga cont.de salida}}{\text{Carga cont.de entrada}} \times 100$ (Ecuación 1) (Gutiérrez et al., 2014)

La evaluación se efectuó finalmente comparando el promedio de los datos obtenidos a partir de las muestras tomadas de los efluentes provenientes del biodigestor tubular durante los seis tratamientos ejecutados, con base en la Resolución 1207 de 2014 que establece los valores máximos permisibles que debe cumplir el efluente proveniente del sistema de tratamiento de agua residual, para su posterior utilización en actividades agrícolas, como por ejemplo, agua para riego en cultivos de pastos y forrajes para consumo animal. Además, se considera la Resolución 0631 de 2015, que expone los parámetros permisibles que debe cumplir la ganadería de porcinos-cría para verter sus aguas en una fuente hídrica superficial.

Para el análisis estadístico se empleó el software IBM SPSS Statistics para analizar las correlaciones existentes para cada TRH (5 y 8 días) con las relaciones estiércol – agua (1:4, 1:7 y 1:10) entre las diferencias máxicas obtenidas a partir del valor de entrada y de salida de los promedios obtenidos de las tres réplicas para cada uno de los cinco parámetros fisicoquímicos considerados para determinar los porcentajes de remoción de materia orgánica (DBO, DQO, SST, SSV y Ssed). Se realizó una correlación bivariada a partir de la cual se manejó el coeficiente de correlación de Pearson para una prueba de significación unilateral.

Posteriormente, se realizaron ANOVAS por medio del análisis de varianza de dos factores (tiempo de retención hidráulica y relación estiércol – agua) elaborados por Parcelas Divididas en Excel 2013, a partir de los porcentajes de remoción obtenidos en cada una de las réplicas realizadas del diseño experimental, de manera que se determinó la existencia de diferencias significativas entre los TRH, las relaciones o entre ambas variables. Todos los ANOVAS fueron realizados con un nivel de significancia de $p=0,05$.

Igualmente, con base en los resultados obtenidos, se plantean medidas de manejo que permitan mejorar el sistema de tratamiento del agua residual porcina a escala piloto estudiado y su implementación en fincas agropecuarias, para que los pequeños productores puedan emplear este sistema con las dimensiones evaluadas en este estudio y a su vez logren adecuarlo según sus necesidades de producción en el sector porcícola.

3. RESULTADOS

Como se observar en la Figura 2 para el potencial de hidrogeno (pH) los datos de entrada oscilan entre 7,3 y 8,21 y los de salida oscilan entre 6,5 y 6,99, de manera que dan cumplimiento a la normatividad vigente (Resolución 1207 de 2014 y 0631 de 2015)

y a lo expuesto por Olaya y Gonzáles (2009) donde para un adecuado funcionamiento del biodigestor presentará un pH “entre 6,5 y 7,5”. También se evidencia un descenso en los datos de salida con respecto a los de entrada, debido a que durante la fermentación anaerobia las bacterias acidogénicas se encargan de disminuir el pH por debajo de 6,8 mientras convierten los materiales orgánicos simples en “ácidos grasos volátiles (AGV), alcoholes, aldehídos, agua, formato, acetato, dióxido de carbono e hidrógeno” (Lagos, 2013).

La conductividad en la Figura 3 se observa que según la resolución 1207 del 2014 el valor máximo permisible es 1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ para agua de riego. Los valores de entrada oscilaron entre 1342 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 1747 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y los de salida entre 415,2 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 1198,62 $\mu\text{s}/\text{cm}$, indicando que cumple con lo establecido para vertimientos. Además, se denota una disminución de los valores de salida con respecto a los de entrada, teniendo que del primer al sexto tratamiento se evidenciaron reducciones porcentuales de la siguiente manera: 55,07% para el primero, 71,24% para el segundo, 46,13% para el tercero, 73,08% para el cuarto, 55,53% para el quinto y 62,36% para el sexto. Este descenso se debe al contenido de sales incorporadas en el alimento, las excretas y la orina (Domínguez y Faz, 2009) y también Soria et al. (2001) expone que, “se encuentra asociado al consumo de los compuestos solubles del sustrato por parte de los microorganismos”.

La temperatura media obtenida en el afluente fue de 25°C y en el efluente de 27°C, registrando un ascenso de 2°C durante el desarrollo de los seis tratamientos, debido a que la temperatura del afluente se encuentra aclimatizada y al ingresar al biodigestor se adapta a la temperatura conservada en el interior, favorecida por el aporte calórico generado por el plástico negro, concordando con lo propuesto por la FAO (1995) quien determinó que la temperatura promedio para el adecuado funcionamiento de los biodigestores anaeróbicos es de 30°C, y los resultados obtenidos son cercanos a este valor.

En la Figura 4 se evidencia que los valores obtenidos cumplen con la resolución 0631 de 2015, donde se establece como límite máximo permisible 40°C para el vertimiento en la ganadería porcina, cumpliendo para cada uno de los tratamientos realizados en este estudio, donde el valor mínimo obtenido de temperatura fue de 24°C y el máximo de 28°C, manteniéndose por debajo de este valor.

Los sólidos sedimentables como se observa en la Figura 5 se logra ver que el mayor porcentaje de remoción de materia orgánica, para este parámetro, fue para el tiempo de retención hidráulica de 8 días con una relación de estiércol – agua de 1:7 (84,48%), y el menor porcentaje para el tiempo de retención hidráulica de 5 con la relación estiércol – agua 1:4. Por otra parte, las desviaciones estándar determinadas teniendo en cuenta las réplicas de tratamiento, evidencia que el mayor valor se obtuvo en el primer tratamiento (TRH de 8 días con la relación 1:10) con una $S = 7,75$, lo cual indica que el valor promedio 78,88% puede tener una variabilidad de $\pm 7,75\%$, debido a que los valores de las réplicas presentan datos más dispersos, en comparación con los otros tratamientos en donde la desviación expresa que los valores se encuentran menos alejados de la media aritmética.

Además, en cuanto a los datos que representan la eficiencia del sistema (entrada y salida), se evidencia como se observa en la Figura 6, que los valores de entrada tienden

a aumentar su valor conforme la relación estiércol – agua disminuye a razón de 1:10, 1:7 y 1:4 respectivamente en los dos tiempos de retención hidráulica. Adicionalmente, se denota una disminución de los valores de salida con respecto a los de entrada, debido a que según Botero esta remoción corresponde a que estos sólidos son los que “sirven de alimento a los microorganismos responsables de la biodigestión”(Botero y Preston, 1987). Asimismo, se evidencian del primer al sexto tratamiento reducciones porcentuales promediando los datos de salida de las réplicas de la siguiente manera: 57,76% para el primero, 68,97% para el segundo, 61,11% para el tercero, 55,56% para el cuarto, 57,84% para el quinto y 50,93% para el sexto. También, indica la presencia de un número alto de microorganismos presentes en los lodos que por acción de las bacterias encargadas del proceso de fermentación hacen que los sólidos se encuentren en menor cantidad “que al no ser agitados evita sólidos en suspensión” (Sánchez, Peón, Cardona, Ortega y Urriolagoitia, 2016). Por otra parte, según la resolución 0631 de 2015, el valor máximo permisible es 5 mL/L, pero los efluentes no dan cumplimiento a esta normatividad debido a que sobrepasan este límite, señalando que se requiere un postratamiento para mejorar la eficiencia de remoción de materia orgánica.

En la Figura 7 el mayor porcentaje de remoción de materia orgánica evaluado para el parámetro de sólidos suspendidos totales (SST) se obtuvo en el segundo tratamiento (TRH de 8 días para la relación 1:7) con un valor del 81,04%. Por otra parte, se observa baja variabilidad de los datos entre las distintas réplicas. No obstante, dentro de estos valores, la mayor desviación estándar se reporta en el primer tratamiento (TRH de 8 días con la relación 1:10) con un valor de $S = 13,17$, el cual fue hallado a partir de las tres réplicas realizadas para dicho tratamiento, lo que señala que estos datos poseen una menor homogeneidad en sus resultados ya que pueden variar ese valor por encima o por debajo del valor promedio que es 78,17%, y por otra parte, el tratamiento donde los datos presentaron mayor homogeneidad, y por ende mayor confiabilidad en los datos obtenidos en las réplicas, fue en el tratamiento cuatro (TRH de 5 días con una relación 1:10), ya que puede existir un cambio en el porcentaje de remoción de $\pm 0,69\%$.

También se puede observar en la Figura 8, que en todos los tratamientos los valores de salida disminuyeron considerablemente (Entre el 69,81% al 81,04% de remoción). Es así que los datos presentaron un descenso en los valores siendo el promedio máximo del afluente de 3186,67 mg/L y el promedio mínimo del efluente de 580,60 mg/L, alcanzando porcentajes de remoción hasta del 81,04% para la relación 1:7 en el tiempo de retención hidráulica de 8 días. Teniendo como supuesto que según Martínez “gran parte de estos son sólidos volátiles, que son la materia prima para la producción del biogás, y en la medida que la producción de biogás sea mayor, mayores serán los porcentajes de remoción” (Martínez, Murcia, y Suárez, 2015), cabe resaltar que tanto las concentraciones de entrada y salida del biodigestor son muy altas, comparadas con otras aguas residuales como las domésticas donde sus concentraciones varían entre 250 mg/L a 200 mg/L en el afluente para DBO y SST (Noyola, 1997). Por otra parte, según la resolución 0631 de 2015 establece como límite máximo permisible 400 mg/L, de acuerdo con los datos obtenidos ninguna de las concentraciones en el efluente de los biodigestores es admisible para vertimiento a un cuerpo de agua superficial.

En la Figura 9 los porcentajes de remoción de Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) indican una remoción del 68,85% a 86,50% para las relaciones 1:4 en el tiempo de retención hidráulica de 5 días y 1:7 para el tiempo de retención hidráulica de 8 días, coincidiendo con el estudio elaborado por Molina (1999) quien obtuvo porcentajes de

remoción de materia orgánica del 56% al 61% de SSV en tiempos de retención de 2, 3 y 6 días considerando una alta eficiencia de remoción de materia orgánica en este sistema de tratamiento.

También se observa la desviación estándar la cual indica la dispersión de los datos con respecto a la media para cada tratamiento, donde el valor más alto se obtuvo en el tercer tratamiento (TRH de 8 días para la relación 1:4) con una $S=5,89$, mostrando que, si la media del porcentaje de remoción de materia orgánica para las réplicas de este tratamiento es de 79,91%, se espera un cambio en el porcentaje de remoción del $\pm 5,86\%$.

Asimismo, en la Figura 10 se aprecian los datos de entrada y salida del sistema de tratamiento de agua residual porcina, registrando un descenso notorio de los valores de salida del triplicado del biodigestor anaerobio, donde la media mínima obtenida fue de 311,6 mg/L para el tratamiento dos (TRH de 8 días con la relación 1:7) y la media máxima fue de 843,67 mg/L para el tratamiento seis (TRH 5 días con la relación 1:4), disminuyendo en un 13,59% y 31,15% con respecto a los valores de entrada.

En cuanto a la normatividad vigente para aguas residuales este parámetro no está contemplado. Sin embargo, se considera importante como indicador de remoción de materia orgánica, puesto que corresponde a un 80% de los sólidos totales. (De acuerdo con el contenido de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles medidos en esta investigación). Es decir, que los porcentajes de remoción aumentan directamente proporcional a la producción de biogás de acuerdo con lo encontrado en la literatura (Chará, Pedraza, & Conde, 2002).

En la Figura 11 con respecto a la demanda biológica de oxígeno se observan los porcentajes de remoción de materia orgánica en los seis tratamientos obtenidos para este parámetro, donde se evidencia que el valor máximo se obtuvo en el tratamiento dos (TRH de 8 días con la relación 1:7), con un porcentaje del 84,57% y un porcentaje mínimo de 52,02% para el tratamiento seis (TRH de 5 días con la relación 1:4), esto se debe a la relación estiércol-agua, ya que a menor cantidad de agua es mayor la concentración de materia orgánica y los microorganismos no cuentan con un tiempo de retención hidráulica suficiente para la descomposición (5 días). Sin embargo, coincide con otros estudios propuestos que a pesar de utilizar otros reactores en tiempos de retención hidráulica diferentes, concuerdan en cuanto al porcentaje de remoción, tal es el caso de la investigación realizada por Méndez et al (2013) donde implementaron un reactor UASB para tratar aguas residuales porcinas y alcanzan porcentajes de 60% de DBO y el estudio elaborado por Garzón y Buelna (2013) quienes utilizando un digestor anaerobio DALYS alcanzaron el 96% de remoción de DBO, corroborando la eficiencia de eliminación de materia orgánica de estos sistemas de tratamiento de agua residual a través de los porcentajes de remoción.

En cuanto a la desviación estándar se registró el valor máximo en el primer tratamiento (TRH de 8 días con la relación 1:4) siendo $S= 2,07$, indicando que existe mayor variabilidad en los datos obtenidos a partir del triplicado realizado, al igual que un cambio en el porcentaje de remoción de materia orgánica del $\pm 5,86\%$.

En la Figura 12 se consideran los valores del afluente y efluente del biodigestor anaerobio observando una disminución con respecto a los datos de entrada del sistema

de tratamiento, siendo el promedio mínimo obtenido 224,67 mg/L O₂ para el tiempo de retención hidráulica de 8 días con la relación estiércol-agua de 1:7 con un descenso del 15,43% y el máximo de 697,67 mg/L O₂ para el tiempo de retención hidráulica de 5 días para la relación estiércol-agua 1:4 descendiendo en un 47,98%.

Por otra parte, teniendo en cuenta la resolución 0631 de 2015, la cual establece como valor máximo permisible 450 mg/L O₂ para verter el agua tratada a un cuerpo de agua superficial, los tratamientos que cumplen con esta normatividad son el tiempo de retención hidráulica de 8 días para las relaciones estiércol-agua 1:10 y 1:7, ya que registran valores inferiores al límite establecido, mientras que los tratamientos restantes exceden este valor por lo tanto se requiere de un postratamiento que complemente la remoción del material orgánico.

En la Figura 13 se observan los valores porcentuales de remoción de materia orgánica de la demanda química de oxígeno, con base en el triplicado elaborado para este estudio, donde la media más alta se presentó en el segundo tratamiento (TRH de 8 días con la relación 1:7) con una remoción del 88,74%, pasando de una concentración de 23672,49 mg/L O₂ a 2664,82 mg/L O₂ en el efluente del sistema, y la media menor se dio en el tratamiento seis (TRH de 5 días para la relación 1:4), eliminando el 58,73% de la materia orgánica presente en el agua, descendiendo de una carga de 17924,4 mg/L O₂ a 7396,71 mg/L O₂.

Por otra parte, las desviaciones estándar determinadas para este parámetro son consideradas bajas porque no se presenta gran variabilidad en los datos obtenidos en las réplicas, no obstante, dentro de estos valores la mayor desviación estándar corresponde al tiempo de retención hidráulica de 8 días con la relación estiércol-agua de 1:4 ($S = 4,74$), indicando una mayor dispersión en los datos, al igual que un cambio porcentual de $\pm 4,74\%$.

En la Figura 14 se aprecian los datos registrados en la entrada y salida del sistema de tratamiento de agua residual porcina, reconociendo el descenso en el efluente del biodigestor en cuanto a las cargas orgánicas del afluente, siendo el valor promedio mínimo obtenido de 2664,82 mg/L O₂ en el tiempo de retención hidráulica de 8 días para la relación estiércol-agua 1:7 disminuyendo en un 11,72% con respecto a la concentración de entrada de 23672,49 mg/L O₂ y el valor promedio máximo fue de 7396,71 mg/L O₂ en el tiempo de retención hidráulica de 5 días para la relación 1:4 con una disminución del 41,26%.

Por otra parte, la resolución 0631 de 2015 establece como límite máximo permisible 900mg/L O₂ para ser vertido en una fuente hídrica, sin embargo, de acuerdo con los datos obtenidos ninguno de los tratamientos es admisible con el límite establecido por esta normatividad, a pesar de obtener porcentajes de remoción considerables, por lo que se requiere de un postratamiento que mejore la remoción del material biológico.

En la Figura 11 tratamiento que presenta porcentajes mayores de remoción para los parámetros en discusión es el correspondiente al tiempo de retención hidráulica de 8 días con la relación estiércol – agua 1:7. Además, se reflejó un incremento de eficiencia en el orden de menor a mayor remoción, siendo menos óptima la relación 1:4, seguido por la relación 1:10 y finalmente la más óptima la relación 1:7 para cada tiempo de retención hidráulica (5 y 8 días), lo anterior apoya la relación excreta-agua propuesta

por Beteta y González (2005) considerando que los valores límites dados presentan bajas eficiencias de remoción (1:4 y 1:10), puesto que a menor concentración de agua la materia orgánica tiende a compactarse dentro del sistema y por el contrario cuando presenta mayor cantidad de agua también puede influir como inhibidor de la fermentación anaerobia, interponiéndose en el tiempo necesario para que los microorganismos realicen su descomposición.

No obstante, teniendo en cuenta que en esta investigación el biodigestor tubular anaerobio cuenta con dimensiones a escala piloto, inferiores a los biodigestores convencionales, los porcentajes obtenidos son más eficientes con respecto a los tiempos de retención hidráulica manejados de 5 y 8 días, confirmando así lo mencionado por Díaz (2002) quien afirma que “se deben disminuir los tiempos de retención hidráulicos en los digestores anaerobios para mejorar el contacto entre el lodo y el sustrato, lo cual significa construir reactores de menor volumen ya que son sistemas más estables, de fácil operación y costos más bajos, viables para productores más pequeños”(MADS, 1974).

El análisis estadístico de la información se llevó a cabo por medio de una correlación de Pearson de los parámetros indicadores de remoción. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos a partir de las diferencias másicas de los parámetros fisicoquímicos con sus relaciones estiércol – agua (1:4, 1:7 y 1:10) a partir de la Ecuación 2.

Diferencia másica=Dato carga de entrada promedio-dato carga de salida promedio (Ecuación 2)

Tabla 1. Proyección de incremento del biodigestor tubular por cada 10 unidades de cerdos.

A	B	C	D	E	F	G
Cantidad de agua						
Estiércol promedio por cerdo (kg/día)	N° cerdos	Estiércol total (kg) (A*B)	según relación 1:7 (C*7 L) (litros de agua)	Volumen líquido (L) (D*8días)	Volumen gas (L)	Volumen total (L) (E+F)
1,5	10	15	105	840	360	1200
1,5	20	30	210	1680	720	2400
1,5	30	45	315	2520	980	3500
1,5	40	60	420	3360	1340	4700
1,5	50	75	525	4200	1700	5900
1,5	60	90	630	5040	1960	7000
1,5	80	120	840	6720	2580	9300
1,5	100	150	1050	8400	3600	12000

Nota: Cálculo del volumen necesario para instalar un biodigestor conforme aumenta la producción acorde a los resultados obtenidos. A: Estiércol promedio por cerdo, B: Número de cerdos, C: Estiércol total, D: Agua según relación 1:7, E: Volumen líquido (70%), F: Volumen del gas (30%) y G: Volumen total.

A partir de esta prueba se evidenció una correlación positiva (Pearson, $r= 80,1\%$, $p= 0,028$) entre las variables Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química

de Oxígeno (DQO) siendo directamente proporcionales entre sí según las diferencias másicas. Por ejemplo, la diferencia másica en el tiempo de retención hidráulica de 8 días con una relación estiércol – agua 1:7 para DBO fue de 1038 mg/L O₂ y para DQO de 16067,25 mg/L O₂.

Así mismo, se determinó una correlación positiva entre las variables sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) (Pearson, $r = 98,1\%$, $p = 0,000269$) a causa de que el valor de los SSV aumentó directamente proporcional a los SST, debido a que estos últimos son el resultado de la muestra no filtrable y para la obtención de los SSV se llevan los sólidos totales a calcinación a 550°C, donde la materia orgánica se oxida en forma de gas como dióxido de carbono (CO₂) y agua, y a continuación se establecen por la diferencia entre la muestra anterior y los sólidos fijos indicando la cantidad de materia orgánica presente en la muestra (Argandoña & Macías, 2013).

También, se identificó la correlación positiva existente entre DBO y SSV (Pearson, $r=57,8\%$, $p = 0,115$) debido a que los SSV son de naturaleza orgánica (Molina y Tigreros, 2005) aportando a una DBO de tipo insoluble susceptible a ser biodegradada por los microorganismos (Olivares, 2014).

Por otra parte, el valor de sólidos sedimentables (Ssed) se correlacionó negativamente con los parámetros DBO y DQO debido a que regularmente los sólidos sedimentables son sólidos de fácil decantación que se degradan difícilmente por el tamaño y la densidad de las partículas presentes.

También se realizó un análisis de varianza con los resultados obtenidos se encuentran de la Tabla 2 a la 6 referidos cada uno a un parámetro diferente. El valor F (valor del estadístico de prueba) para las muestras en el caso de los porcentajes de remoción de sólidos sedimentables (Ssed) en la Tabla 2, indican que no existen diferencias significativas ($F_c=2,78$, $GL_{Total} =5$, $p=0,05$) de los datos entre los dos tiempos de retención hidráulica y las tres relaciones planteadas ($F_c=4,45$, $GL_{Total} =17$, $p=0,05$),

Tabla 2. Análisis de varianza de los porcentajes de remoción de sólidos sedimentables para el esquema de parcelas divididas

	GL	SC	CM	Fc	Ft
TRH	1	224,64	224,65	18,36	7,71
Error TRH	4	48,94	12,23		
Total TRH	5	273,59			
Relaciones	2	81,70	40,85	8,09	4,45
TRH X Rel.	2	8,58	4,29	0,85	4,45
Error Rel.	8	40,41	5,05		
Total	17	404,28			

Nota: GL: Grados de libertad, SC: Suma de cuadrados, CM: Cuadrados medios, Fc: Estadístico calculado y Ft: F teórico

Por otra parte, para los sólidos suspendidos totales en la Tabla 3 se observa que se encontraron diferencias significativas entre los tiempos de retención hidráulica de 5 días y 8 días al ser F_c mayor que F_t ($F_c=7,71$, $GL_{Total}=5$, $p=0,05$), al igual para las relaciones estiércol – agua, 1:10, 1:7 y 1:4 ($F_c=4,45$, $GL_{Total}=17$, $p=0,05$).

Tabla 3. Análisis de varianza de los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos totales para el esquema de parcelas divididas

	GL	SC	CM	Fc	Ft
TRH	1	224,64	224,65	18,36	7,71
Error TRH	4	48,94	12,23		
Total TRH	5	273,59			
Relaciones	2	81,70	40,85	8,09	4,45
TRH X Rel.	2	8,58	4,29	0,85	4,45
Error Rel.	8	40,41	5,05		
Total	17	404,28			

Nota: GL: Grados de libertad, SC: Suma de cuadrados, CM: Cuadrados medios, Fc: Estadístico calculado y Ft: F teórico.

En la Tabla 4 se observa que para el parámetro de sólidos suspendidos volátiles existen diferencias ($F_c=7,71$, $GL_{Total}=5$, $p=0,05$) entre los tiempos de retención hidráulica analizados al ser F_c mayor que el valor de F_t , del mismo modo para las relaciones estiércol – agua ($F_c=4,45$, $GL_{Total}=17$, $p=0,05$).

Tabla 4. Análisis de varianza de los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos volátiles para el esquema de parcelas divididas

	GL	SC	CM	Fc	Ft
TRH	1	310,58	310,59	10,37	7,71
Error TRH	4	119,82	29,96		
Total TRH	5	430,41			
Relaciones	2	319,93	159,97	26,40	4,45
TRH X Rel.	2	18,13	9,06	1,50	4,45
Error Rel.	8	48,47	6,06		
Total	17	816,94			

Nota: GL: Grados de libertad, SC: Suma de cuadrados, CM: Cuadrados medios, Fc: Estadístico calculado y Ft: F teórico

Para la Demanda Biológica de Oxígeno según el análisis de varianza existen diferencias significativas entre las relaciones realizadas de 1:10, 1:7 y 1:4 ($F_c=7,71$, $GL_{Total}=17$, $p=0,05$), y los tiempos de retención hidráulica ($F_c=4,45$, $GL_{Total}=5$, $p=0,05$) al ser F_c mayor que F_t como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis de varianza de los porcentajes de remoción de demanda biológica de oxígeno para el esquema de parcelas divididas.

	GL	SC	CM	F_c	F_t
TRH	1	1862,58	1862,59	1829,51	7,71
Error TRH	4	4,07	1,02		
Total TRH	5	1866,66			
Relaciones	2	662,72	331,36	274,21	4,45
TRH X Rel.	2	355,89	177,94	147,25	4,45
Error Rel.	8	9,67	1,21		
Total	17	2894,93			

Nota: GL: Grados de libertad, SC: Suma de cuadrados, CM: Cuadrados medios, F_c : Estadístico calculado y F_t : F teórico.

En la Tabla 6, para el parámetro demanda química de oxígeno, se observa que existen diferencias significativas entre los dos tiempos de retención hidráulica y las relaciones estiércol – agua.

Tabla 6. Análisis de varianza de los porcentajes de remoción de demanda química de oxígeno de oxígeno para el esquema de parcelas divididas.

	GL	SC	CM	F_c	F_t
TRH	1	1623,93	1623,93	338,46	7,71
Error TRH	4	19,19	4,80		
Total TRH	5	1643,12			
Relaciones	2	587,09	293,55	51,29	4,45
TRH X REL.	2	101,83	50,91	8,90	4,45
Error Rel.	8	45,79	5,72		
Total	17	2377,83			

Nota: GL: Grados de libertad, SC: Suma de cuadrados, CM: Cuadrados medios, F_c : Estadístico calculado y F_t : F teórico.

Para lograr mayor eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales porcinas implementado a escala piloto se realizan las siguientes propuestas de optimización del sistema con el fin de garantizar la actividad de cría de cerdos con mejores condiciones operativas que permitan implementar una porcicultura sustentable:

Inicialmente basado en los resultados de los tratamientos realizados, este sistema puede funcionar con una capacidad de 307 litros operado con una relación de estiércol – agua 1:7 y un tiempo de retención hidráulica de 8 días, e instalar otro biodigestor en serie con las mismas condiciones operativas, para mejorar la remoción del efluente que proviene del TRH 8 (1:7) con una carga de 224,66 mg/L O₂ de DBO y entra a un postratamiento en un biodigestor en serie tiende a reducirse en 33,81 mg/L O₂ de DBO (Tabla 7), logrando mayores eficiencias de remoción, en comparación con sistemas de mayores dimensiones que requieren largos tiempos de retención hidráulica de aproximadamente 30 a 40 días para una fermentación mesofílica con una temperatura de 20 a 35°C asociado a los biodigestores tubulares (Olaya y González, 2009).

Tabla 7. Cálculos de implementación de un biodigestor en serie.

	A	B	C	D
	TRH 8 (1:7)	Eficiencia de	TRH 8 (1:7)	Salida del
	Salida del	remoción para	Cantidad removida	biodigestor en
	biodigestor	el TRH 5 (1:7)	((A*B)/100 %)	serie
				(A-C)
DBO (mg/L)	224,66	84,95	190,85	33,81
DQO (mg/L)	2664,82	88,74	2364,76	300,06
Ssed (mL/L)	9,00	84,48	7,60	1,40
SST (mg/L)	580,60	81,04	470,52	110,08
SSV (mg/L)	311,67	86,50	269,59	42,08

Nota: Cálculos para mejorar la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales porcinas con base en los resultados obtenidos.

Además, se tiene que conforme se incrementa el número de cerdos en una granja porcina es necesario implementar un sistema con dimensiones mayores que tenga la suficiente capacidad de tratar la carga orgánica ingresada, es así como teniendo en cuenta el promedio de estiércol de cerdo por día propuestas por Vera, Martínez, Estrada, y Ortiz (2014). Se realizó una proyección de 10 cerdos hasta un total de 100 con base en los resultados que presentaron mayor eficiencia (Tiempo de retención hidráulica de 8 días con una relación estiércol – agua de 1:7), se obtuvo que para 10 cerdos el volumen del biodigestor debería tener un volumen de 1200 L (Tabla 8). De tal forma que, en la Figura 16 se evidencia en la regresión lineal la función $y = 118,61x - 32,37$ que representa el incremento del volumen del biodigestor con respecto a la cantidad de cerdos, lo cual es directamente proporcional con una R de 99, 93% que soporta la predicción realizada a partir de los cálculos.

4. CONCLUSIÓN

A través de las combinaciones realizadas de tiempos de retención hidráulica (5 y 8 días) y relaciones estiércol – agua de lavado (1:4, 1:7 y 1:10) en el biodigestor tubular anaerobio, se evidencio que el tratamiento que presentó la mayor eficiencia de remoción de materia orgánica teniendo en cuenta los parámetros fisicoquímicos del presente estudio fue el correspondiente al tiempo de retención hidráulica de 8 días con la relación estiércol – agua 1:7, con porcentajes de remoción de 84,48% para Ssed, 81,04% para SST, 86.5% para SSV, 84,57 para DBO y 88,74 para DQO, seguido de la relación estiércol-agua 1:10 para el tiempo de retención hidráulica de 8 días, con porcentajes de remoción del 78,88% para Ssed, 78,17% para SST, 78,82% para DBO y 81,52 para DQO. De modo que, pequeños productores pueden implementar esta tecnología en sus sistemas productivos, para mitigar la carga contaminante emitida al medio ambiente cuando se realiza una disposición inadecuada del estiércol porcino, exponiendo a la proliferación de vectores que pueden afectar la salud humana.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Santo Tomás – sede Villavicencio, y a la Unidad de Investigación por el apoyo financiero para la ejecución de dicho trabajo.

También, al Ingeniero Henry Contreras por el apoyo y orientación para la elaboración de esta investigación

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- APHA/AWWA/WEF. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater (SMAWW) (21th Ed.). Washington D.C.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Argandoña, L., & Macías, R. (2013). Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles en el efluente de las lagunas de oxidación situadas en la Parroquia Colón, Cantón Portoviejo, Provincia de Manabí. Disponible en: <http://repositorio.utm.edu.ec/bitstream/123456789/137/1/DETERMINACION%20DE%20SOLIDOS%20TOTALES%2C%20SUSPENDIDOS%2C%20SEDIMENTADOS%20Y%20VOLATILES.pdf> [Consultado 05 agosto de 2018].
- Arrieta, W. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Disponible en: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2575/IME_200.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Consultado 13 marzo de 2018]
- Beteta, T., & González. (2005). Manual de construcción y uso de biodigestores tubulares plásticos. Guía Técnica No. 7, Universidad Nacional Agraria, Managua. Disponible en: <http://repositorio.una.edu.ni/2412/1/nf04b562.pdf> [Consultado 15 de febrero 2018].
- Campos C. (2011). Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 20(2): 37-41.
- Chará, J., Pedraza, G., & Conde, N. (2002). Instalación y mantenimiento de biodigestores plásticos. Cali, Colombia: CIPAV.
- CORMACARENA. (2015). Guía ambiental para sistemas de producción porcícola en el Departamento del Meta. Disponible en: <https://asociados.porkcolombia.co/porcicultores/images/porcicultores/publicaciones/GUIA-AMBIENTAL-PARA-SISTEMAS-PORCICOLAS-CORMACARENA.pdf> [Consultado 15 abril 2018].

- Díaz, M., Espitia, S., & Molina, F. (2002). Digestión anaerobia: Una aproximación a la tecnología. (Primera edición). Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/43178/2/9587011961_Parte%201.pdf. [Consultado 14 abril 2018].
- FAO. (1995). Biodigestor de plástico de flujo continuo, generador de gas y bioabono a partir de aguas servidas. Guatemala: CIPAV Fundación Centro para Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria.
- Flickr. (2018). Twenergy. Disponible en: <https://twenergy.com/co/a/el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-colombia-1142>. [Consultado 15 abril 2018].
- Garzón, M., & Buelna, G. (2013). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 30(1): 65-79.
- Gutiérrez, N., Aragón, E., & Valencia, R. (2014). Eficiencia de remoción de DBO5 y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales en el beneficio del café. *Colombia Forestal*, 17(2): 151-159.
- IDEAM. (2007). Demanda bioquímica de oxígeno 5 días. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125581/30-3.16_HM_Promedio_DBO_3_FI.pdf/0a5a3ba7-d6d9-49b8-85f3-dde52f30530c. [Consultado 03 enero 2018].
- Lagos, F. (2013). Análisis de factibilidad técnica y económica de la generación de biogás a partir de purines mediante biodigestores anaerobios. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/131621/Analisis-de-factibilidad-tecnica-y-economica-de-la-generacion-de-biogas-a-partir-de-purines-mediante-biodigestores-anaerobios.pdf?sequence=1>. [Consultado 06 febrero 2018].
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (1974). Decreto 2811. Disponible en: <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2014/04/decreto-ley-2811-de-1974.pdf> [Consultado 18 de octubre 2017]
- Méndez, R., Mena, R., Castillo, E., & Sauri, M. (2013). Evaluación de un reactor UASB para aguas porcinas inoculado con líquido ruminal. *Ingeniería*, 17(1): 41-55.
- Millares, P. (2011). Manejo de efluentes. Buenos Aires: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Disponible en: <http://www.ciap.org.ar/ciap/Sitio/Archivos/Manejo%20de%20efluentes%20porcinos.pdf> [Consultado 15 de septiembre 2017].
- Molina, K., Caicedo, L. & Duque, C. (1999). Tratamiento de las excretas de cerdo mediante un reactor anaeróbico SCFBR a nivel de banco. *Revista colombiana de biotecnología*. 2(1): 7-15.
- Molina, A., & Tigreros, J. (2005). Evaluación preliminar de la remoción de sólidos suspendidos en el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Arauca. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/4864/1/tesissas.pdf>. [Consultado 15 de octubre 2017].
- Noyola, A. (1997). Tratamiento anaerobio de aguas residuales. En: *Foro Internacional Comparación de dos Tecnologías en Aguas Residuales Domésticas para Municipalidades*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 40 p.
- Olaya, Y., & González, L. O. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/7967/4/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf> [Consultado 08 diciembre 2017].
- Olivares, M. (2014). Calidad de las aguas residuales. Obtenido de Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento: http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/2015/ANEAS_PRESENTACIONES2014/Presentaciones%20C%20y%20T/8%20Calidad%20del%20Agua/Calidad%20de%20las%20aguas%20residuales%20ANEAS%20XXVIII%20Convencion%20MXOP.pdf [Consultado 08 enero 2018].
- Sánchez, M., Peón, I., Cardona, T., Ortega, L. & Urriolagoitia, G. (2016). Evaluación inicial de parámetros de campo en un biodigestor anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1): 173-184.
- Soria, M., Ferrera, R., Etchevers, J., Alcántar, G., Santos, J., Borges, L. y Pereyda, G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante digestión de excreta líquida de cerdo. *Terra latinoamericana*, 19(4): 353-362.
- Vera, I., Martínez, J., Estrada, M., y Ortiz, A. (julio- septiembre de 2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 15(3): 429-436.