



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y  
AMBIENTALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES  
RENOVABLES**

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LAS REACCIONES  
ANAERÓBICAS EN UN REACTOR TIPO PISTÓN, PARA EL  
TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS GANADEROS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO  
EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**AUTORA:**

Carolin Mishell Arteaga German

**DIRECTOR:**

Ing. Jorge Edwin Granja Ruales

**JUNIO, 2020**



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y  
AMBIENTALES**

**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Ibarra, 18 junio del 2020

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LAS REACCIONES ANAERÓBICAS EN UN REACTOR TIPO PISTÓN, PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS GANADEROS** de autoría de la señorita **CAROLIN MISHHELL ARTEAGA GERMAN** estudiante de la Carrera de **INGENIERÍA RECURSOS NATURALES RENOVABLES** el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que la autora ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

**TRIBUNAL TUTOR**

Ing. Jorge Granja  
**DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN**

**FIRMA...**

MSc. Melissa Layana  
**MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN**

MSc. Santiago Cabrera  
**MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Misión Institucional:**

Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA IDENTIDAD:</b>	<b>DE</b>	1753863776	
<b>APELLIDOS NOMBRES:</b>	<b>Y</b>	ARTEAGA GERMAN CAROLIN MISHELL	
<b>DIRECCIÓN:</b>	EL QUINCHE CALLE QUITO OE1 355 (QUITO - PICHINCHA)		
<b>EMAIL:</b>	cmarteagag@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	-	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0993962922

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LAS REACCIONES ANAERÓBICAS EN UN REACTOR TIPO PISTÓN, PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS GANADEROS
<b>AUTOR (ES):</b>	CAROLIN MISHELL ARTEAGA GERMAN
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	18/06/2020
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	<b>INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES</b>
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	<b>ING. JORGE EDWIN GRANJA RUALES</b>

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 18 días del mes de Junio de 2020

**EL AUTOR:**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Carolin Mishell Arteaga German', written over a horizontal line.

Nombre: Carolin Mishell Arteaga German

## **AGRADECIMIENTO**

*A mis padres, que con su amor, trabajo y sacrificio me han impulsado a no rendirme y seguir luchando por lo que anhelo.*

*A mi familia, que me ha brindado su ayuda y apoyo incondicional en cada paso recorrido.*

*Y a todas las personas que han hecho que esta meta se cumpla con éxito, en especial a aquellos que compartieron sus conocimientos y me abrieron las puertas.*

*¡Gracias!*

***Carolin Arteaga***

## DEDICATORIA

*A una de las personas más importantes en mi vida. Ella, que siempre estuvo en cada uno de mis pasos dándome aliento y su amor incondicional, mi admiradora número uno, la que siempre creyó en mí sin importar todas las equivocaciones que cometiera, a ella que no le importaba lo que hiciera nunca se sentía decepcionada. Hoy, quiero dedicarte esta y cada una de las metas que cumpla en mi vida a ti abuelita, que a pesar de que ya no estas con nosotros sigues siendo la mayor razón de mi fortaleza y si hoy estoy aquí es por ti y todo el amor que supiste entregar.*

***Carolin Arteaga.***

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido	Páginas
<b>RESUMEN</b> .....	xii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiii
<b>CAPITULO I INTRODUCCIÓN</b> .....	14
1.1 Revisión de Antecedentes. ....	14
1.2 Problema de investigación y justificación .....	17
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1. Objetivo general .....	19
1.3.2 Objetivos específicos .....	19
1.4 Preguntas directrices .....	19
<b>CAPITULO II REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	21
2.1 Marco teórico referencial. ....	21
2.1.1 Contaminación por residuos .....	21
2.1.2 Residuos orgánicos ganaderos y su utilidad como materia prima.....	21
2.1.3 Digestión anaerobia.....	22
2.1.4 Parámetros ambientales y de control .....	23
2.1.5 Sistemas de Digestión Anaerobia: Reactores anaerobios .....	25
2.1.6 Análisis dimensional .....	26
2.2 Marco legal .....	27
2.2.1 Constitución de la República del Ecuador .....	27
2.2.2 Convenios Internacionales .....	27

2.2.3 Código Orgánico Ambiental .....	28
2.2.4 Ley Orgánica de Recursos Hídricos Uso y Aprovechamiento del Agua .....	28
2.2.5 Decretos y Reglamentos .....	29
<b>CAPITULO III METODOLOGÍA.....</b>	<b>30</b>
3.1. Descripción del área de estudio.....	30
3.2. Métodos .....	31
3.2.1. Fase 1 Caracterización de la materia orgánica.....	31
3.2.2. Fase 2. Velocidad de desplazamiento de la materia orgánica .....	34
3.2.3. Fase 3 Parámetros de diseño del reactor anaeróbico tipo pistón.....	34
3.3 Materiales y equipos .....	36
<b>CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>37</b>
4.1 Caracterización de la materia orgánica.....	37
4.1.1 Sólidos totales .....	37
4.1.2 pH .....	37
4.1.3 Temperatura .....	38
4.1.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) y Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	39
4.2 Velocidad de desplazamiento de la materia orgánica .....	41
4.3 Parámetros de diseño del reactor anaeróbico tipo pistón .....	45
<b>CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>49</b>
5.1 Conclusiones.....	49
5.2 Recomendaciones.....	50

<b>REFERENCIAS</b> .....	51
<b>ANEXOS</b> .....	57
Anexo 1. Planos de los reactores anaeróbicos utilizados en el estudio .....	57
Anexo 2. Desplazamiento de la materia orgánica a los 20 y 25 días de haber alcanzado la distancia máxima. ....	58
Anexo 3 Tabla de volúmenes en R1 y R2 .....	59
Anexo 4. Registro fotográfico .....	61
Anexo 5. Análisis de laboratorio (DBO <sub>5</sub> y Nitratos) .....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Valores de TRH recomendado .....	24
<b>Tabla 2.</b> Dimensiones de los reactores uno y dos. ....	32
<b>Tabla 3.</b> Materiales y Equipos .....	36
<b>Tabla 4.</b> Valores de pH al inicio y al final del proceso de digestión anaeróbica .....	37
<b>Tabla 5.</b> DBO <sub>5</sub> y nitratos .....	40
<b>Tabla 6.</b> Relación dimensional en R1 y R2 .....	41
<b>Tabla 7.</b> Tabla comparativa de parámetros medidos entre R1 y R2.....	47
<b>Tabla 8.</b> Parámetros de diseño para un reactor anaeróbico de flujo pistón .....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Granja bovina (FAO, 2012) .....	11
<b>Figura 2.</b> Esquema de fases del proceso de digestión anaerobia (Ocaña, 2011). .....	20
<b>Figura 3.</b> Diagrama de un reactor de flujo pistón (1) y un reactor de mezcla completa (2). .....	23
<b>Figura 4.</b> <i>Ubicación de la parroquia la Esperanza.</i> .....	27
<b>Figura 5.</b> Diseño de los reactores anaeróbicos tipo pistón uno y dos.....	28
<b>Figura 6.</b> Valores máximos y mínimos de pH .....	38
<b>Figura 7.</b> Valores promedio de Temperatura al inicio y al final del proceso de digestión .....	39
<b>Figura 8.</b> Porcentajes de remoción de $\text{DBO}_5$ y $\text{NO}_3^-$ en R1 y R2 .....	37
<b>Figura 9.</b> Zonas de Flujo en un reactor anaeróbico de tipo pistón .....	38
<b>Figura 10.</b> Velocidad de flujo en R1 y R2.....	39
<b>Figura 11.</b> Volumen dinámico de R1 y R2 durante el período de observación.....	39
<b>Figura 12.</b> Velocidad de Flujo durante el período de observación .....	44
<b>Figura 13.</b> Remoción de $\text{DBO}_5$ frente la relación dimensional de R1 y R2.....	44
<b>Figura 14.</b> Remoción de $\text{NO}_3^-$ frente a la relación dimensional de R1 Y R2 .....	44
<b>Figura 15.</b> Niveles de concentración de $\text{DBO}_5$ del sustrato en diferentes TRH. ....	45
<b>Figura 16.</b> Niveles de concentración de $\text{NO}_3^-$ del sustrato en diferentes TRH.....	46
<b>Figura 17.</b> Plano del Reactor dos (R2). .....	47

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y**  
**AMBIENTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES**  
**RENOVABLES**

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LAS REACCIONES**  
**ANAERÓBICAS EN UN REACTOR TIPO PISTÓN, PARA EL**  
**TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS GANADEROS**

Arteaga German Carolin Mishell

**RESUMEN**

Las mayores emisiones de Gases de Efecto Invernadero producidas por el hombre provienen de la ganadería, sin considerar la deficiencia de los sistemas de tratamiento y disminución en la calidad del recurso hídrico. Diversas alternativas existen para contrarrestar los efectos de estas actividades sobre el medioambiente, una de ellas es la implementación de sistemas de digestión anaeróbica a través reactores, a fin de mejorar la calidad del efluente y obtener subproductos de valor agregado. El objetivo del estudio fue evaluar el comportamiento de la digestión anaeróbica en un reactor tipo pistón en el tratamiento de los residuos orgánicos ganaderos mediante la evaluación de la operación de dos reactores anaerobios (R1 y R2) bajo las mismas condiciones y misma configuración geométrica, con la única diferencia en la relación ancho – altura. Los parámetros de operación pH y temperatura se midieron constantemente para controlar la estabilidad del proceso en cada uno de los reactores, mediante el análisis de similitud geométrica y cinemática se determina la incidencia de la velocidad de desplazamiento del flujo de materia orgánica en la capacidad de remoción de  $\text{DBO}_5$  y  $\text{NO}_3^-$  obteniendo mejores resultados en el reactor R2 con una relación ancho/altura = 1 y velocidad de desplazamiento menor pero con mayor conversión. Como parte de los análisis dimensionales se realizó el cálculo de la velocidad de remoción de  $\text{DBO}_5$  y  $\text{NO}_3^-$  tomando en cuenta las relaciones ancho – longitud, ancho – altura y las variaciones de  $\text{DBO}_5$  y  $\text{NO}_3^-$  en cada reactor; se reflejó mayor velocidad de remoción para la relación ancho – longitud puesto que los valores obtenidos fueron mayores.

**Palabras clave:** digestión anaeróbica, materia orgánica, reactor tipo pistón, velocidad de desplazamiento.

## ABSTRACT

Most emissions of greenhouse gases produced by humans come from livestock, without considering deficiency treatment systems and decreased water resources quality. There are several ways to counteract the effects of these activities on the environment, one of them is the implementation of anaerobic digestion systems through reactors, in order to improve the quality of the effluent and obtain value-added products. The objective of the study was evaluating the behavior of anaerobic digestion in a piston-type reactor for the treatment of livestock organic waste by evaluating the operation of two anaerobic reactors (R1 and R2) under the same conditions and the same geometric configuration, with the only difference in the width - height ratio. The operating parameters of pH and temperature were continuously measured to control the stability at the reactors process, by analyzing geometric and kinematic similarity incidence speed of the flow of organic matter was determined in the removal capacity of BOD<sub>5</sub> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, obtaining better results in R2 reactor with a width / height ratio = 1 and lower travel speed but with greater conversion. In addition, the analysis between the dimensional variations of width and height was performed by calculating the slopes in each reactor with respect to the removal values obtained; higher removal rate was reflected BOD<sub>5</sub> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in the width ratio - length since the values were higher.

**Key words:** anaerobic digestion, displacement speed, organic matter, plug flow reactor.

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Revisión de Antecedentes.

El crecimiento demográfico con el aumento de ingresos y la urbanización a nivel global proyectan un incremento en la demanda de recursos naturales para la producción de bienes y servicios (Morales, Vivas y Teran, 2016). De acuerdo con estudios realizados por La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO (2012) se prevé que la población mundial pasará de 7 200 millones a 9 600 millones de habitantes en el año 2050, representando un crecimiento del 73% de la demanda de productos pecuarios en relación al año 2010. No obstante los recursos naturales necesarios para satisfacer dicha demanda se encuentran comprometidos debido a la problemática ambiental generada por las crecientes actividades agropecuarias como erosión de suelo, contaminación de fuentes de agua, pérdida de la biodiversidad y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) .



**Figura 1.** Granja bovina (FAO, 2012)

La adecuada utilización de los recursos naturales en las prácticas agropecuarias está estrechamente ligado a la intensidad de emisiones de GEI, entre ellas óxido nitroso ( $N_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y metano ( $CH_4$ ) (Flotats, 2016). Dentro del

sistema pecuario la contaminación por emisiones significa pérdida de energía, nutrientes y materia orgánica (Franch, 2000). Para mitigarla se puede intervenir con prácticas eficientes de manejo ligadas a la implementación de tecnologías de producción limpia e incrementar el uso de subproductos y reusó de desechos para reducir la generación de residuos y emisiones, además de convertir las descargas ambientales en productos con valor agregado (Reyes, Díaz, Espinosa, Quiñonez y Borrero, 2015).

Dentro del uso de tecnologías limpias están los sistemas de digestión anaeróbicos mediante reactores biológicos, utilizados en tratamiento de residuos orgánicos provenientes de las actividades municipales, industriales y agropecuarias. Los objetivos de estos sistemas varían según el sector de aplicación, en el caso de la producción pecuaria se utiliza la digestión anaeróbica principalmente para la gestión del estiércol y producción de bioenergía, constituye una oportunidad de reducción de los costos de electricidad y aprovechamiento de nutrientes útiles para la conservación del suelo agrícola (Mitchel et al., 2015).

Osejo, Jaramillo, Merino, Quimis y Alcívar (2018), en el estudio sobre el tratamiento de las excretas de cerdo, encontraron que mediante el manejo de los desechos porcinos en la granja situada en Jipi Japa - Ecuador se logró la generación de biogás y la formación de abonos orgánicos de interés agronómico ricos en nutrientes como fósforo, potasio y nitrógeno, libres de patógenos y sustancias que puedan afectar a la calidad del suelo.

Si bien es cierto, los gases de combustión producidos por la putrefacción de materia orgánica proveniente de alimentos y excretas animales se han estudiado desde 1630 por Von Humboldt, entre 1883 y 1884 Pasteur y Gayón descubrieron que la fermentación anaeróbica de estiércol producía un gas útil para la producción de calefacción e iluminación (Gropelli y Giampaoli, 2012). Sin embargo, no fue hasta 1990 que se puso en marcha uno de los primeros reactores anaeróbicos en Bombay-India siendo una de las primeras naciones en realizar investigaciones sobre estos sistemas enfocándose al tratamiento los residuos animales y agrícolas (Gropelli y Giampaoli, 2012).

Gerber, Steinfeld, Henderson, Opio, Dijickman, Falucci y Tempio (2013), realizaron estudios para evaluar el potencial de mitigación en los países de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) donde se generan cerca del 28% de las emisiones de GEI provenientes de la producción de leche, estiércol, elaboración de piensos y la fermentación entérica; evidenciándose una correcta gestión de estiércol a través de reactores anaeróbicos permite reducir las emisiones entre 14% y 17% y aumentar la eficiencia energética mediante la producción de biogás. Otros estudios realizados por los mismos autores revelaron que en América del Norte el mayor potencial de mitigación está en la sustitución de lagunas por digestores anaeróbicos reduciendo un total de 12,7% de emisiones generadas (Gerber et al., 2013).

La utilización de reactores anaerobios genera efluentes amigables con el ambiente. En este sentido, Botero y Hernández (2016) desarrollaron un sistema denominado tipo Taiwán para reducir la demanda biológica de oxígeno (DBO) de 1360 a 10,8 mg/l y la demanda química de oxígeno (DQO) de 3180 a 166 mg/l, con una mejora significativa en las descargas producidas. Adicionalmente el biogás generado se aplicó a la calefacción y cocción de alimentos reduciendo la planilla por consumo de energía eléctrica en el 50%.

Aunque los reactores biológicos se han utilizado desde finales del siglo XIX, el modelamiento y diseño se va afinando cada vez con el empleo de componentes microbiológicos y bioquímicos para el desarrollo de los microorganismos y trabajar eficientemente, mejorar la calidad del efluente y descargar a las fuentes de agua o suelos agrícolas sin acarrear las consecuencias negativas tanto para la salud humana como para el medioambiente (Lazcano, 2016).

En la investigación de Jiménez y Mojica (2005) realizaron el estudio de factibilidad de un reactor anaerobio de flujo pistón (RAP) a escala de laboratorio en el tratamiento de las aguas residuales domésticas del municipio de Tunja – Colombia a una temperatura de 14°C, en este estudio se evaluó el comportamiento de dos RAP mediante el análisis de la remoción de materia orgánica y sólidos totales; los reactores se diferenciaron entre sí por la existencia de un medio de soporte de

biomasa. Se obtuvo una remoción del DBO promedio del 81.9% en el reactor 1 y 86,4% en el reactor 2 con un tiempo de retención hidráulica de 10 horas dando como resultando un lodo floculento con buena capacidad de sedimentación.

Otro caso es el estudio de la evaluación inicial de parámetros en un reactor anaerobio para el tratamiento de aguas residuales en la ciudad de México, desarrollado por Sánchez, Peón, Cardona, Ortega y Urriolagotia (2016), la investigación realizada con base a la medición de parámetros de campo como pH, conductividad, sólidos sedimentables, temperatura del influente y efluente y oxígeno disuelto para verificar el comportamiento del proceso del reactor durante la fase de arranque, los resultados mostraron variaciones en el pH de 8,5 a 7,42 conductividad de 1.539,54  $\mu/cm$  a 1.206,54  $\mu/cm$ , temperaturas de 18,24 °C a 19,14°C, sólidos sedimentables de 143,5 ml/l a 0.01 ml/l y oxígeno disuelto de 4,59 mg/l a 0.9 mg/l. El estudio concluyó que el sistema contribuye al cumplimiento de la normativa de descargas en la zona y los efluentes generados pueden ser utilizados en fines diferentes, sin involucrar alteraciones al medio.

## **1.2 Problema de investigación y justificación**

El crecimiento demográfico e incremento de la demanda de productos alimentarios cárnicos y sus derivados han contribuido al aumento acelerado de las actividades ganaderas, repercutiendo directa e indirectamente sobre la calidad y disponibilidad de los recursos naturales como: suelo, agua, aire y biodiversidad (Morales, Vivas y Teran, 2016). A nivel mundial han surgido tres principales fuentes de preocupación: i) la ganadería extensiva que genera deforestación y erosión de la tierra, ii) la producción intensiva que se acumula en sectores estratégicos y genera exceso de nutrientes y contaminación, iii) la producción de proteína animal (Lorente, 2010).

Uno de los mayores impactos de la actividad ganadera sobre el ambiente son las emisiones de GEI y repercusión en el cambio climático, de acuerdo con datos de la FAO (2009) el 14,5% las emisiones producidas por el hombre provienen de la ganadería siendo el CH<sub>4</sub> el gas de mayor emisión en un 44% seguido del N<sub>2</sub>O con 29% y el CO<sub>2</sub> con 27%. Las principales fuentes de emisión provienen de la

producción, elaboración y transporte de forraje, la fermentación entérica, el almacenamiento y elaboración de estiércol.

América Latina y el Caribe tienen los niveles de emisión más altos de CO<sub>2</sub>; cerca de un tercio de estas son originadas por el cambio de uso de suelo debido a la expansión de pastizales para la producción vacuna. En segundo lugar está Asia oriental con la mayor producción ganadera seguida de América del Norte con la producción de carne y Europa con la producción de leche (Gerber et al., 2013).

En el Ecuador una de las principales problemáticas es la deficiencia de políticas de desarrollo agropecuario para combatir al sistema extensivo que ocasiona impactos como la alta tasa de deforestación (Silva, Cevallos, Sarabia y Boza, 2016). La producción intensiva también genera repercusiones, debido a la escasa implementación de tratamientos de remediación ambiental, de manera que las medidas tomadas generalmente son insuficientes para alcanzar los estándares de calidad establecidos (FAO, 2012).

Los antecedentes enunciados permiten considerar relevante ampliar el estudio sobre el comportamiento de un reactor anaeróbico de flujo pistón, para optimizar el diseño y facilitar la operación, con el propósito de reducir las emisiones generadas por la actividad pecuaria. Adicionalmente, obtener beneficios como la producción de biogás una forma de energía limpia y renovable

Además con este sistema es posible generar abonos a partir de los lodos producidos a través de la materia fecal, lo que representa beneficios para la elaboración de fertilizantes orgánicos que pueden ser incorporados en el suelo y mejorar la producción de pastos para el ganado, reduciendo el impacto provocado por la utilización de productos agroquímicos. Es así que el uso de reactores anaeróbicos constituye una opción viable y caracterizada por ser de bajo costo, sostenible y de fácil implementación (Pizarro, 2005).

Los sistemas de tratamiento de residuos al contribuir a la disminución de emisiones y mejora del efluente de las prácticas ganaderas, aporta al tercer objetivo del Plan

Nacional de Desarrollo Toda una Vida establecido por la Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo –SENPLADES- (2017), el cual busca garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones, teniendo como una de sus políticas principales la promoción de buenas prácticas que aporten a la reducción de la contaminación, conservación, mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático.

El estudio se llevó a cabo a nivel de laboratorio, con el tratamiento de excretas provenientes del ganado vacuno a fin de evaluar el rendimiento de las reacciones anaeróbicas en dos reactores tipo pistón con diferentes velocidades de desplazamiento, de esta manera se busca establecer parámetros de diseño asociados a una mejora en la productividad y eficiencia en reactores anaeróbicos para el tratamiento de residuos orgánicos.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar el rendimiento de las reacciones anaeróbicas en un reactor tipo pistón, para el tratamiento de residuos orgánicos provenientes de las prácticas ganaderas.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar la materia orgánica antes y después del proceso de tratamiento en el reactor.
- Determinar la incidencia de la velocidad de desplazamiento en las reacciones anaeróbicas en dos reactores de tipo pistón.
- Establecer parámetros de diseño eficientes para un reactor anaeróbico tipo pistón.

### **1.4 Preguntas directrices**

¿Qué reactor tienen mejor rendimiento en cuanto al tratamiento de residuos orgánicos ganaderos?

¿Cómo incide la velocidad de desplazamiento de la materia orgánica en el rendimiento de las reacciones anaeróbicas del reactor?

## **CAPITULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **2.1 Marco teórico referencial.**

##### **2.1.1 Contaminación por residuos**

El deterioro de los recursos naturales se compromete a lo largo de los años debido a procesos de contaminación provenientes de residuos inorgánicos como plásticos, latas, vidrio, fibras sintéticas, baterías, entre otros, que se acumulan y biomagnifican, y de residuos orgánicos como restos vegetales y animales cuya aportación de sustancias biodegradables al medio excede la capacidad de descomposición natural de los mismos (De la Orden, 2007).

Según Hoornweg y Bhada (2012), aproximadamente el 46% de los residuos generados a nivel mundial son de origen orgánico, aunque en como Guatemala, Honduras, Salvador, y Ecuador este valor aumenta al 59% siendo las principales fuentes de origen las actividades domésticas, forestales, de relleno de sanitarios y agropecuarias.

##### **2.1.2 Residuos orgánicos ganaderos y su utilidad como materia prima**

Si bien es cierto, los residuos orgánicos originados por las actividades agropecuarias especialmente del sector ganadero generan grandes cantidades de descargas, emisiones y vertidos capaces de alterar la calidad del medioambiente. Por tal razón, surge la necesidad de realizar planes de gestión ligados al aprovechamiento sostenible de dichos residuos para minimizar el impacto y reducir excesos, entre ellos se encuentra el compostaje, elaboración de bioles, consorcios microbianos y la biodigestión siendo esta última una de las más recomendadas (Herrero y Gil, 2008).

Los residuos orgánicos ganaderos como purines y estiércol producen grandes cantidades de nitrógeno no metabolizado que es liberado hacia el ambiente en forma de amonio durante los procesos de descomposición, ésta pérdida de nutrimentos

con una correcta gestión puede ser aprovechada para la obtención de subproductos útiles (Agencia Extremeña de la Energía, 2017).

### **2.1.3 Digestión anaerobia**

La digestión anaerobia es un proceso biológico que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y se encarga de descomponer la materia orgánica en compuestos químicos más simples; este proceso resulta muy útil para el tratamiento de derivados de residuos orgánicos como lodos de depuradoras, residuos sólidos municipales, desechos verdes botánicos, residuos industriales y residuos agropecuarios (Chen, Cheng y Creamer, 2008).

El proceso de digestión anaeróbica engloba diferentes etapas intervenidas por diversas poblaciones de bacterias descritas por Olaya (2009):

- En la hidrólisis la materia orgánica es metabolizada por microorganismos encargados de descomponer las cadenas largas de proteínas en otras más cortas.
- La acidogénesis y acetogénesis convierte los productos de la hidrólisis en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono con la intervención de bacterias hidrolíticas – acidogénicas y bacterias acetogénicas que se encargan de hidrolizar y fermentar las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos orgánicos simples dando origen a la formación de oxígeno molecular.
- En la metanogénesis, los ácidos orgánicos son transformados en metano y dióxido de carbono por acción de bacterias metanogénicas y los ácidos propanoicos y acéticos por bacterias metanogénicas acetoclásticas. Además, en este proceso las bacterias hidrogenófilas consumen el hidrogeno generado en la primera reacción para ser convertido en biogás.

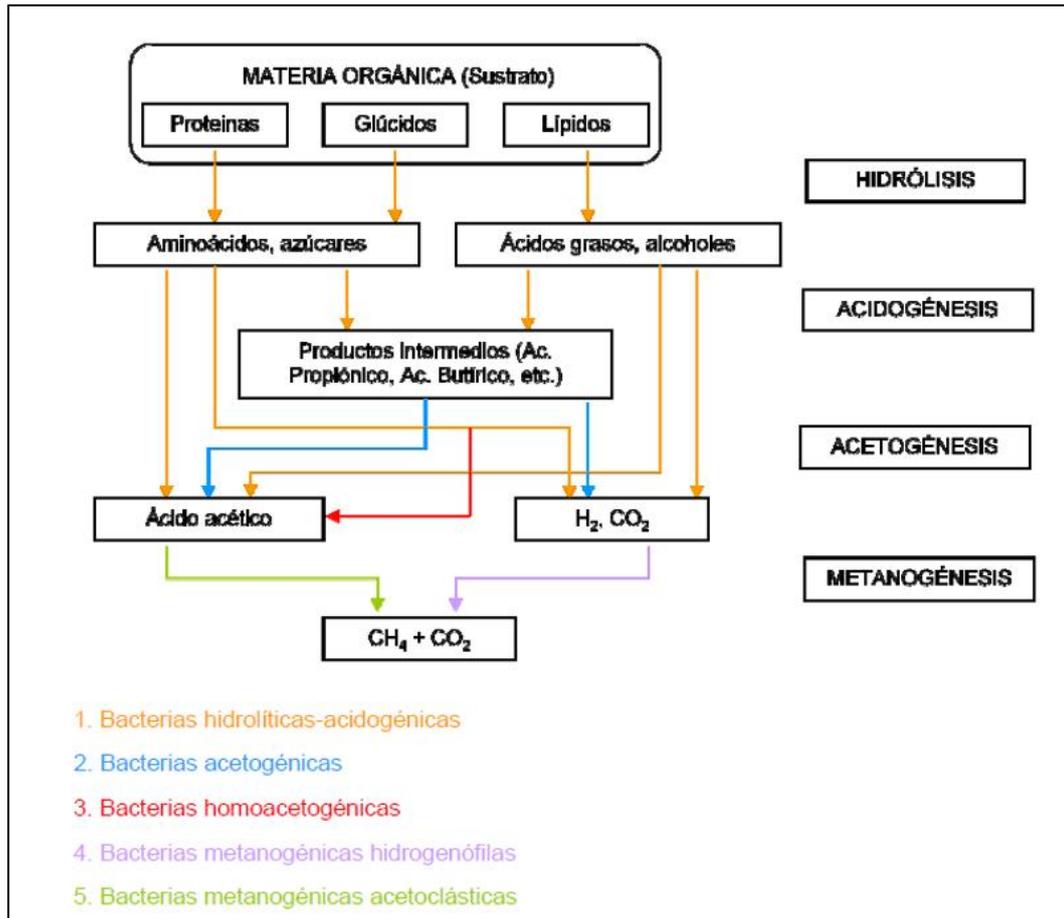


Figura 2. Esquema de fases del proceso de digestión anaerobia (Ocaña, 2011).

#### 2.1.4 Parámetros ambientales y de control

Algunos estudios revelan que hay varios parámetros de funcionamiento que influyen significativamente el rendimiento del proceso de digestión anaerobia, incluyendo pH, temperatura, tiempo de retención hidráulico (TRH), velocidad de carga orgánica, la concentración de sólidos y configuración del reactor (Rincón et al., 2008). A continuación se describen algunas de ellos:

- La cantidad de sólidos totales consiste en la materia que queda como residuo después de la evaporación del contenido de agua del sustrato, esta medida tiene como objetivo determinar la cantidad de agua necesaria al momento de ingresarla a los reactores, es importante tomar en cuenta que el contenido de sólidos debe bordear el 8% del total del sustrato para obtener óptimos resultados en la fermentación (Guillén y Rivas, 2011).

- El pH determina la inhibición o toxicidad de los procesos bacteriológicos, el rango óptimo de pH está entre 6,2 y 8,5 cuando dichos valores se encuentran fuera de rango se produce una inhibición del proceso biológico, aumento de ácidos grasos volátiles y la producción de metano disminuye rápidamente.(Ferrer y Seco, 2008).
- La temperatura se maneja en tres rangos que son psicrófilico de 10 - 25°C, mesófilo de 25 – 40°C y termófilo mayores a 40°C las bacterias desarrolladas en cada uno son diferentes de manera que se debe controlar la temperatura para mantener la eficiencia de la digestión anaeróbica (Solano, Vargas, y Watson, 2011).
- El tiempo de retención hidráulico (TRH) de acuerdo con Muzaffar, Athar y Chanchal (2016), es considerado como el parámetro más importante que incide en el rendimiento del proceso de digestión anaerobia; el TRH representa el tiempo que la materia orgánica está dentro del digestor para su fermentación, está asociado directamente con la temperatura de modo que a mayor temperatura el TRH es menor. Para ello se recomienda lo siguiente:

**Tabla 1.** Valores de TRH recomendado

Temperatura de funcionamiento (°C)	Tiempo de retención recomendado (días)
18	28
24	20
30	14
35	10
40	10

Fuente: Muzaffar, Athar y Chanchal (2016). *Design considerations and operational performance of anaerobic digester.*

- La Demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO), indican indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo mediante el oxígeno necesario para oxidar biológicamente o químicamente

la materia orgánica. Este parámetro es importante para determinar el grado de contaminación del agua y los medios para poder tratarla (Ocaña, 2011).

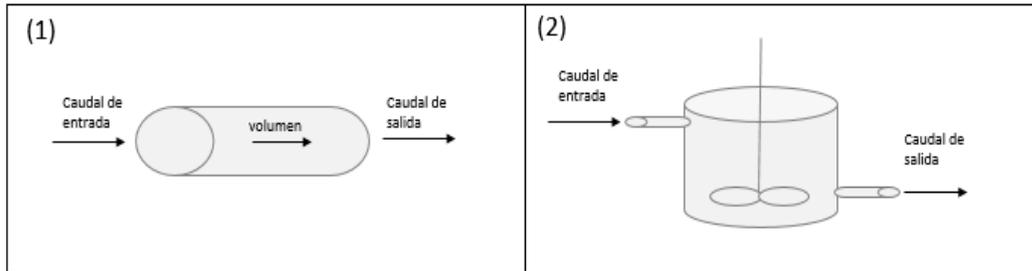
- La agitación o mezcla del sustrato está asociada a la temperatura y tipo de reactor, Bonet y Costa (2016) sugieren que a nivel mesofílico el proceso de digestión anaerobia no requiere de agitación. Sin embargo, al operar a nivel termófilo es necesario un buen sistema de agitación para incrementar el contacto entre las bacterias y la carga.
- El dimensionamiento del digestor, dependerá de su utilidad es decir, puede funcionar como planta productora de biogás o de tratamiento de residuos. Para el primer caso, es necesario definir desde el principio el volumen de biogás que se desea obtener diariamente acotando la cantidad de residuos orgánicos a utilizar, el segundo caso por otra parte responde a la necesidad de utilizar todo el residuo orgánico disponible cercano al lugar donde se instalará el digestor o reactor anaeróbico, esto con el fin de resolver o minimizar el impacto ambiental generado (Pizarro, 2005).

### **2.1.5 Sistemas de Digestión Anaerobia: Reactores anaerobios**

Los sistemas de digestión anaerobia para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos trabajan dependiendo de distintas condiciones como: el tipo de carga del sustrato, ya sea continuo o discontinuo, la concentración de sólidos por vía húmeda (sólidos totales menores al 22%) o seca (sólidos totales mayores al 22%), la agitación y el tipo de reactor que puede ser discontinuo (de mezcla completa o tipo batch), continuo de flujo estacionario (tipo pistón) y semicontinuo de flujo no estacionario (semibatch o SBR) (Chamy, Vivanco y Yaya, 2018).

En lo que se refiere al tratamiento de excretas y purines los reactores más utilizados son los de mezcla completa o tipo batch y flujo pistón (Figura 3). En los reactores tipo batch el sustrato es mezclado regularmente con agitadores, haciendo que las partículas se dispersen y forme una composición uniforme y homogénea en volumen (Lazcano, 2016). Por otra parte, los reactores de tipo pistón no cuentan con sistemas de recirculación de lodos, las partículas de fluido viajan a lo largo del

reactor sin mezclarse y por tanto son descargadas en la misma frecuencia con la que entran (Férrer y Seco, 2008).



**Figura 3.** Diagrama de un reactor de flujo pistón (1) y un reactor de mezcla completa (2).

Fuente: Elaboración propia

Orozo y Salazar (citado en Jiménez y Mojica, 2005), afirman que el reactor de flujo pistón es teóricamente más eficiente que el de mezcla continua debido a la alta conversión de materia por unidad de volumen y trabaja en estado estacionario haciendo que las propiedades del reactor se mantenga constantes en el tiempo. Cabe destacar otras ventajas de este tipo de digestores como los bajos costos de construcción, fácil transporte, calefacción efectiva, limpieza de descarga y mantenimiento simples (Palau, 2016).

### 2.1.6 Análisis dimensional

El análisis dimensional es una herramienta para generar parámetros adimensionales útiles en el diseño de experimentos y obtener leyes de escalamiento sobre el desempeño de un prototipo a partir de un modelo. Sin embargo, es importante tomar en cuenta tres condiciones necesarias, la primera condición es la similitud geométrica que indica una escala de longitud, la similitud cinemática que equivale a una escala de tiempo y finalmente la similitud dinámica que equivale a una escala de fuerza; en un campo de flujo general, la similitud completa entre un modelo y el prototipo se logra solamente cuando se cumplen estas tres condiciones (Cenegal y Cimbala, 2012).

## **2.2 Marco legal**

El desarrollo del proyecto de investigación ha sido efectuado con base a los diferentes cuerpos normativos vigentes en la República del Ecuador y relacionados con la conservación del aire, suelo y recurso hídrico.

### **2.2.1 Constitución de la República del Ecuador**

El título II de derechos, capítulo segundo derechos del buen vivir, sección segunda ambiente sano; artículos 14 y 15 reconoce los derechos de la población a vivir en un ambiente sano señalando la importancia de la prevención del daño ambiental y la promoción del uso de tecnologías ambientalmente limpias y energía alternativa no contaminante y de bajo impacto. En el capítulo séptimo de derechos de la naturaleza artículo 72 se señala también la obligación del estado y personas naturales o jurídicas para adoptar medidas de eliminación y mitigación de las consecuencias ambientales nocivas.

En el título VI régimen de desarrollo, capítulo primero, artículo 276 se establecen como objetivos la recuperación y conservación de la naturaleza que garantice un acceso equitativo permanente de calidad y cantidad de agua, aire y suelo, adicional a esto, en el título VII del régimen del buen vivir, artículos 411, 413 se señala la regulación de actividades capaces de afectar a la calidad y cantidad de agua y equilibrio de los ecosistemas y se promueve la eficiencia energética, desarrollo y uso de prácticas tecnológicas ambientalmente sanas, el estado además a través de los gobiernos autónomos descentralizados según se indica en el artículo 415, desarrollará programas de uso racional de agua, reducción, reciclaje y tratamiento adecuado de desechos sólidos y líquidos.

### **2.2.2 Convenios Internacionales**

Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático suscrito en 1992 relativo a las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por las actividades antrópicas.

Protocolo de Kyoto suscrito en 1997 para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la atmosfera a niveles que impidan interferencias peligrosas.

### **2.2.3 Código Orgánico Ambiental**

Libro tercero, Título V de la gestión integral de residuos y desechos, los artículos 224, 225 y 231 se refieren a la obligación del estado en todas sus formas y niveles de gobierno al igual que las personas naturales o jurídicas al cumplimiento del manejo de residuos y desechos a través fortalecimiento de la investigación, desarrollo y uso de mejores tecnologías disponibles capaces de minimizar los impactos al medioambiente y salud humana.

Libro cuarto, Título I del cambio climático, el artículo 248 hace referencia a los fines del estado en materia de cambio climático, entre ellos prevenir y evitar la ocurrencia de los daños ambientales, desarrollar programas de educación, investigación, innovación, desarrollo y transferencia de tecnologías sobre el cambio climático, regular medidas de adaptación y mitigación y fomentar el uso de energías renovables.

### **2.2.4 Ley Orgánica de Recursos Hídricos Uso y Aprovechamiento del Agua**

La ley Orgánica de Recursos Hídricos tiene por objeto desarrollar el derecho humano al agua, así como regular la autorización, gestión, preservación, conservación, uso y aprovechamiento del agua, comprendidos dentro del territorio nacional. El artículo 12, hace referencia a la corresponsabilidad del Estado, juntas de agua potable, juntas de riego, sistemas comunitarios, consumidores y usuarios con respecto a la protección recuperación y conservación de fuentes de agua que se hallen en sus tierras; así mismo el artículo 14, señala que el estado regulará cualquiera actividad que pueda afectar a la calidad y cantidad de agua además del equilibrio ecosistémicos especialmente en zonas de protección hídrica.

### **2.2.5 Decretos y Reglamentos**

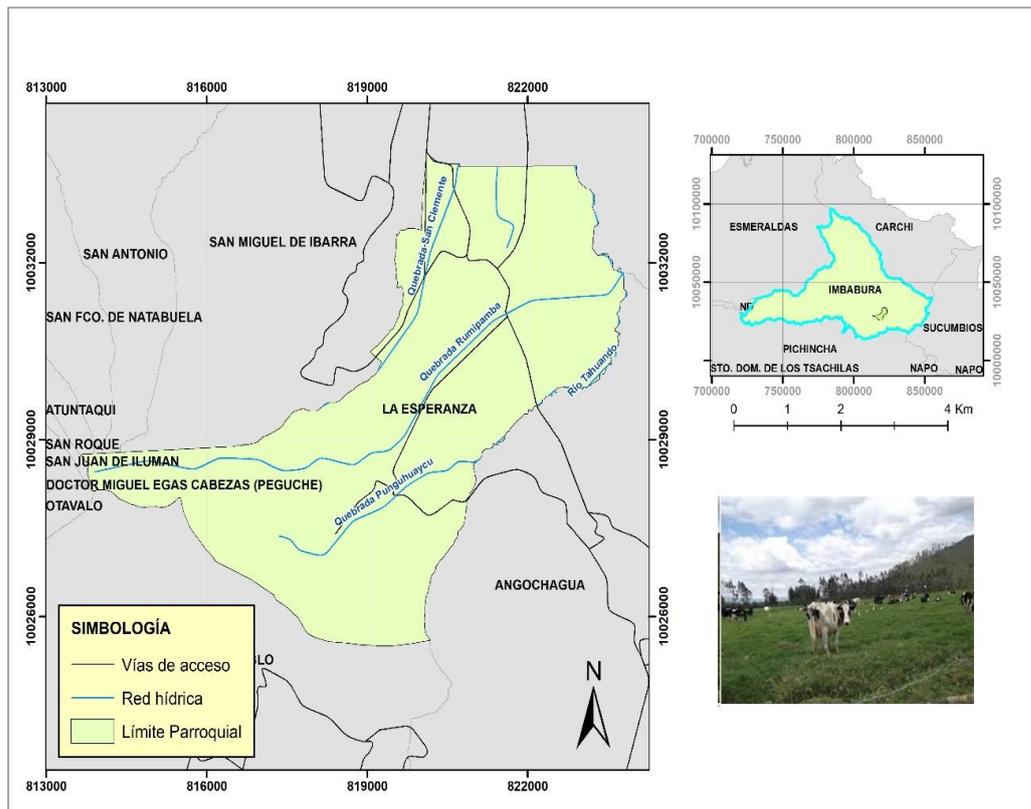
Decreto ejecutivo n° 3516 Texto Unificado de Legislación Secundaria de Ambiente, señala que todas las actividades productivas son susceptibles a degradar y/o contaminar mediante la generación de desechos por lo tanto, se requiere de acciones energéticas y oportunas para combatir y evitar la degradación y contaminación.

Reglamento de aplicación de código orgánico ambiental, título VII de la gestión integral de residuos y desechos, en el artículo 562 se establecen políticas generales para fomentar y fortalecer el desarrollo de iniciativas de gestión de residuos a nivel nacional, regional, local, público, y privado.

## CAPITULO III METODOLOGÍA

### 3.1. Descripción del área de estudio

El estudio se desarrolló a escala de laboratorio, la materia fue obtenida de una unidad experimental agropecuaria que consta de 40 cabezas de ganado vacuno, situada en la comunidad La Cadena, Parroquia la Esperanza, Cantón Ibarra (Figura 4).



**Figura 4.** Ubicación de la parroquia la Esperanza.

La Esperanza posee una extensión de 3476,3 hectáreas, limita al norte con la cabecera cantonal de San Miguel de Ibarra, al sur con la parroquia San Pablo, al este con la parroquia Angochagua y al oeste con la cabecera cantonal de Otavalo; el área se encuentra en un rango altitudinal de 2400 a 4600 m s.n.m. con un relieve montañosos predominante, temperatura promedio de 15°C y una precipitación anual que varía entre los 750 a los 1250 mm (GAD parroquial La Esperanza, 2015).

Según el plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia rural La Esperanza 2015-2019, Las principales actividades y fuentes de ingreso en la comunidad pertenecen al sector terciario alrededor del 86% de la población, mientras que un 14% se dedican a actividades agropecuarias y extractivas, existen cerca de 380 unidades productoras animales situando a la parroquia en el tercer lugar a nivel de cantonal de Ibarra.

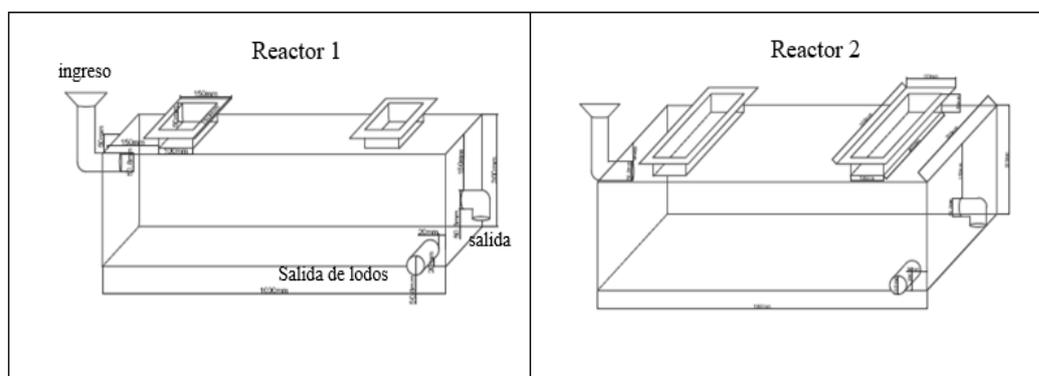
### 3.2. Métodos

A continuación se presentan las fases en las que se dividió la investigación y los procedimientos realizados para cada una.

#### 3.2.1. Fase 1 Caracterización de la materia orgánica

##### *Diseño de los reactores anaeróbicos*

El estudio se desarrolló paralelamente en dos reactores anaeróbicos de flujo pistón con diferentes dimensiones, diseñados en material acrílico transparente de 5 mm de espesor con una configuración rectangular (Figura 5). La configuración permite que cada porción de residuo ingresado cumpla con el tiempo de residencia necesario dentro del reactor antes de salir por el conducto de descarga.



**Figura 5.** Diseño de los reactores anaeróbicos tipo pistón uno y dos.

Las dimensiones de cada reactor se especifican a continuación en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Dimensiones de los reactores uno y dos.

<b>Dimensiones (cm)</b>	<b>Reactor uno (R1)</b>	<b>Reactor dos (R2)</b>
Alto	30 cm	30 cm
Largo	100 cm	100 cm
Ancho	15 cm	30 cm

### *Toma de muestras*

La materia orgánica para la alimentación de los reactores se obtuvo en campo, se tomaron muestras homogéneas de estiércol de ganado vacuno en envases plásticos industriales de 30 litros de capacidad y fueron almacenados en un congelador a 4°C de temperatura.

### *Contenido de sólidos totales*

Con el fin de conocer la composición de los residuos orgánicos a tratar, se tomó una fracción de 100 gramos del sustrato y se colocó en un crisol para ser evaporada completamente en un horno a temperatura de 105°C por un tiempo aproximado de 24 horas, se registraron las variaciones de peso en el crisol hasta que se mantuvieron constantes, finalmente se pesó nuevamente la muestra y se calculó el porcentaje de sólidos totales de acuerdo a la siguiente expresión dada por Basturdo (2013):

$$P_{Si} = (G_1/G_i) \times 100$$

Ecuación I

$$P_{Si} = (0,0209/0,1) \times 100$$

$$P_{Si} = 20,9\%$$

Donde:

$P_{Si}$  = porcentaje de subproducto considerado.

$G_1$  = peso del subproducto considerado en Kg.

$G_i$  = Peso total de la muestra en Kg.

### *Caudal de alimentación del reactor anaeróbico*

El caudal de alimentación se calculó comparando el volumen del reactor y el tiempo de retención hidráulica, que para este caso fue de 25 días de acuerdo a lo recomendado por la literatura (Muzaffar, Athar y Chanchal , 2016).

$$Q_i = V_r / TRH$$

Ecuación II

$$Q_i = 45 \text{ litros} / 25 \text{ días}$$

$$Q_i = 1.8 \text{ litros/día}$$

Donde:

$Q_i$  = caudal diario de alimentación del reactor.

$V_r$  = volumen del reactor.

$TRH$  = tiempo de retención hidráulico en días.

#### *pH y Temperatura*

Los reactores funcionaron de manera estacionaria manteniendo una temperatura constante en condiciones psicrófilas a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Para asegurar el funcionamiento del sistema, el pH y temperatura en el afluente y efluente se midieron periódicamente durante el tiempo de alimentación de los reactores utilizando un multiparámetro modelo Constort 562.

#### *Demanda bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y Nitratos ( $NO_3^-$ )*

Las muestras del sustrato para determinar el  $DBO_5$  y  $NO_3^-$  se tomaron del afluente y efluente en cada uno de los reactores y fueron analizadas en el laboratorio mediante el método APHA 5210 y HACH 8093 respectivamente.

Además se realizó una prueba estadística de t de Student para determinar si los porcentajes de remoción en los reactores fueron o no significativos.

### **3.2.2. Fase 2. Velocidad de desplazamiento de la materia orgánica**

Las relaciones dimensionales fueron analizadas a través de la técnica de análisis adimensional y similitud descrita por Cenegal y Simbala (2012), tomando en cuenta para la comparación como prototipo a R2 y como modelo a R1. El estudio se focalizó en dos condiciones principales que son la similitud geométrica y cinemática.

Similitud geométrica: para el análisis adimensional geométrico, se consideró la variable ancho, manteniéndose constante la longitud y altura con relación al caudal de alimentación.

Similitud cinemática: para el análisis adimensional cinemático, se consideró la velocidad de desplazamiento de la mezcla mediante observación visual y la distribución del sustrato. Se tomaron mediciones diarias de la altura del sedimento en cada reactor con intervalos de distancia de 50 mm durante un período de 30 días; Posteriormente se analizó la relación entre la configuración de cada reactor con la altura media del sedimento.

Además, se determinó la velocidad de flujo utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación III} \quad V = Q/A$$

Donde:

V = velocidad de flujo.

Q = Tasa de flujo volumétrico

A = Área de la sección transversal del fluido (Nave, 2017).

### **3.2.3. Fase 3 Parámetros de diseño del reactor anaeróbico tipo pistón**

El método de evaluación cinética de la co-digestión anaeróbica descrita por Fazil, Ilham, Sarbiaini y Purwanto (2017), sirvió para evaluar la conversión de materia orgánica en cada reactor. Para ello se determinó una constante media de velocidad

de conversión con respecto a los sustratos hidrolizados en cada reactor; es decir, se tomó en cuenta el consumo del sustrato y el crecimiento microbiano enfocándose como parámetros principales el TRH y la remoción de  $\text{DBO}_5$  Y  $\text{NO}_3^-$ . Las ecuaciones utilizadas para este procedimiento se describen a continuación:

Ecuación IV 
$$K'S = -ds/dt$$

Donde:

$K'$  = constante.

$S$  = concentración del sustrato.

$ds$  = cambio de la concentración del sustrato.

$dt$  = variación del tiempo.

La Ecuación IV está considerada con un crecimiento exponencial y puede ser relacionada con el TRH, describiendo la concentración del sustrato:

Ecuación V 
$$S = S_0 \exp(-K_s t)$$

Donde:

$S_0$  = concentración del sustrato en el influente (mg/l).

$S$  = concentración del sustrato en el efluente (mg/l).

$t$  = TRH en días.

La Ecuación V, representa el crecimiento exponencial de los microorganismos a medida que se consume la materia orgánica, cuando a ambos lados de esta ecuación se les da un logaritmo natural, la fórmula final es expresada de la siguiente manera:

Ecuación VI 
$$\ln(S/S_0) = -K_s t$$

Ecuación VII 
$$K_s = -\ln(S/S_0) / t$$

Donde:

$K_s$  = la constante media de velocidad de conversión (mg/l).

$S_0$  = concentración del sustrato en el influente (mg/l).

$S$  = concentración del sustrato en el efluente (mg/l).

Una vez determinada la constante de velocidad de conversión y con el análisis realizado en las fases anteriores, se establecieron diferentes parámetros de control, funcionamiento y dimensionamiento para el diseño de reactores anaeróbicos tipo pistón, enfocado al tratamiento de residuos orgánicos ganaderos.

### 3.3 Materiales y equipos

A continuación se detallan los materiales utilizados para la investigación (Tabla 3).

**Tabla 3.** Materiales y Equipos

Materiales de ensamblaje	Material de campo	Equipos
Lámina de acrílico 5 mm de espesor	Estiércol de ganado vacuno	Multiparámetro CONSORT 562
Silicona RTV transparente		Congelador
220 Tornillos de acero inoxidable 3 x 15 mm		Estufa eléctrica
Latas de aluminio 15 x 30 cm (2) 15 x 15 cm (2)		
4 adaptadores de cisterna polimex 1 ½"		
4 adaptadores PVC 50mm x 1 ½" macho BSP AM3		
6 codos 50 x 90 gr. PVC pegado		
1m de Tubo PVC E/C 50 mm		

## CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Caracterización de la materia orgánica

Los resultados de la caracterización de la materia orgánica corresponden al promedio de las mediciones de cada parámetro de las muestras evaluadas a fin de precautelar la precisión de los valores obtenidos.

#### 4.1.1 Sólidos totales

La medición de sólidos totales se tomó con el fin de conocer las cantidades necesarias de agua y estiércol para la mezcla en los reactores. De acuerdo con Estrada, Martínez, Ortiz y Vera (2013), estadísticamente el estiércol vacuno fresco tiene alrededor del 18,8% de sólidos totales, las muestras analizadas en el presente estudio corresponden a un total de 20.9%, siendo necesario adicionar agua para obtener una mezcla adecuada en la alimentación a los reactores y alcanzar una concentración entre el 4 al 10 %, sugerido por Flores, Alarcón, Vélez y Domínguez (2016) como facilitar la digestión anaerobia según Hernández, Berriel, Benavides, Pérez y Delgado (2008).

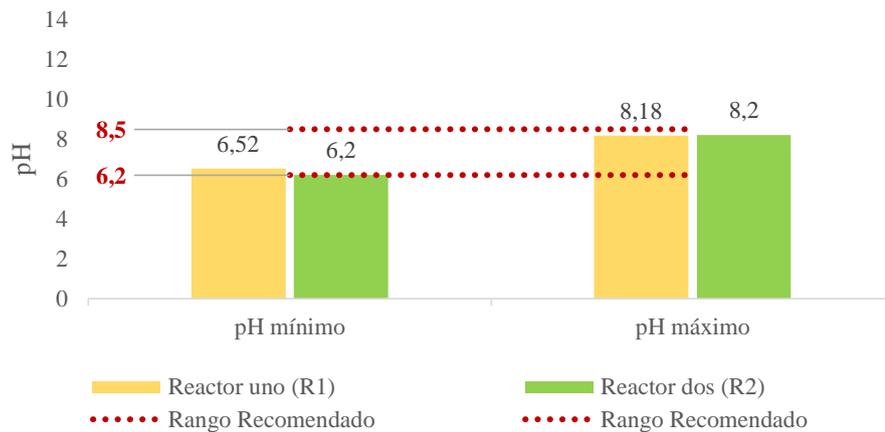
#### 4.1.2 pH

En la tabla 4 se indican los valores de pH obtenidos al inicio y al final de proceso de digestión anaeróbica evidenciando un descenso en el valor final de pH para ambos reactores; precisamente los ácidos grasos volátiles y el acetato que se forma en el proceso tienen a disminuir el pH del sustrato, razón por la cual es importante mantener controlada la temperatura y cantidad de carga en el reactor (MAE, 2015).

**Tabla 4.** Valores de pH al inicio y al final del proceso de digestión anaeróbica

	pH inicio	pH Final
R1	7,42	7,07
R2	7,42	7,09

Los valores de pH máximos y mínimos obtenidos durante el proceso y los rangos recomendados para el desarrollo de la actividad microbiana (Figura 6).



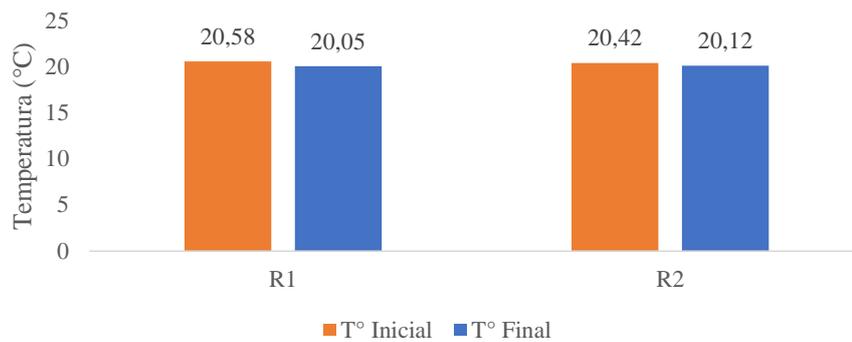
**Figura 6.** Valores máximos y mínimos de pH

Fuente: Sosnowski, Wieczorek, y Ledakowicz (2002).

De acuerdo con Zhang, Lee, y Jahng (2011) El valor de pH varía en las diferentes etapas de la digestión anaerobia. No obstante, el rango óptimo recomendado por autores como Sosnowski, Wieczorek, y Ledakowicz (2002) y Xiaojiao, Yang, Feng, Ren, y Han (2012) está entre 6,2 y 8,5; por lo tanto, los valores registrados en R1 y R2 se encuentran dentro del rango recomendado, indicando que el proceso de digestión anaerobia ha sido normal.

#### 4.1.3 Temperatura

La figura 7 refleja los valores de temperatura obtenidos, evidenciándose un descenso en la temperatura de ambos reactores. Sin embargo, los datos registrados no reflejaron cambios bruscos, por lo que la temperatura se mantuvo estable.



**Figura 7.** Valores promedio de Temperatura al inicio y al final del proceso de digestión

Las reacciones anaeróbicas en los reactores R1 y R2 se llevaron a cabo a nivel psicrófilo. Pizarro (2005) afirma que los niveles de reacción química y biológica, generalmente, aumentan con el incremento de la temperatura, los microorganismos tienen nivel óptimo de crecimiento y metabolismo cuando la el rango de temperatura está bien definido durante todo el proceso. De acuerdo con Muzaffar, Athar y Chanchal (2016), la digestión anaerobia en condiciones termófilas permite una mayor carga, rendimiento, digestión del sustrato, producción de metano, y la destrucción de patógenos pero tiene menor estabilidad frente a cambios ambientales.

Por otra parte, la investigación realizada por Jiménez y Mojica (2005), revelaron que a niveles psicrófilo de temperatura permite la formación de lodos con buena capacidad de sedimentación además de tener una mayor estabilidad frente a cambios ambientales. En este caso los resultados obtenidos en las temperaturas de R1 y R2 son satisfactorios ya que operan con consorcios microbianos resistentes y buena capacidad de sedimentación lo que resulta útil para la remoción de materia orgánica.

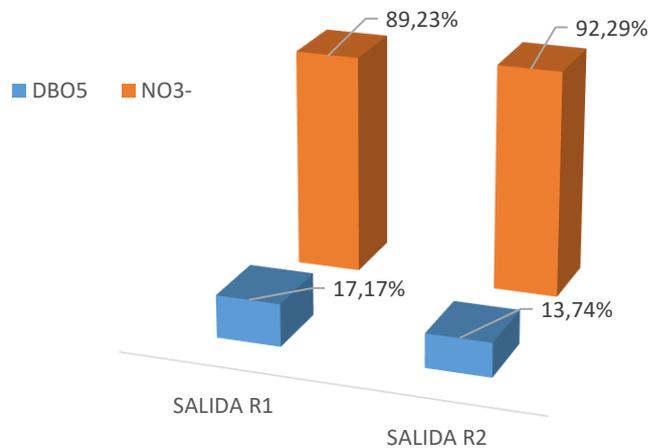
#### **4.1.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

Los valores de DBO<sub>5</sub> y nitratos obtenidos al inicio y final del proceso de digestión en los reactores uno y dos están señalados en la siguiente tabla:

**Tabla 5.** DBO<sub>5</sub> y nitratos

	DBO <sub>5</sub> (ppm)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)
Inicio	723,67	118,00
Final R1	609,00	12,70
Final R2	595,67	9,10

En R2 el porcentaje remoción de DBO<sub>5</sub> fue mayor obteniendo un 17,68% y 15,84% en R1 (Figura 8). Sin embargo, en el análisis estadístico se demostró que la diferencia obtenida entre los valores de los efluentes en los dos reactores no es significativa ( $p$  valor = 0,40). Se obtuvo también mayor remoción de nitratos en R2 con porcentajes del 92,29% y 89,23% para R1, en éste parámetro el análisis estadístico realizado demostró que la diferencia obtenida entre los efluentes de ambos reactores es significativa ( $p$  valor = 0,004).



**Figura 8.** Porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en R1 y R2

Cuenca (2014) analizó el comportamiento de DBO<sub>5</sub>, y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la depuración de aguas residuales, allí se encontró que existe una relación inversa y altamente significativa entre estos dos parámetros los cuales están directamente influenciados por la actividad biológica.

Por otra parte, la presencia de nitrógeno (N) en cantidades adecuadas es importante ya que este elemento en conjunto con otros macronutrientes, son esenciales para el desarrollo de las plantas. EL nitrógeno es absorbido del suelo bajo forma de nitrato

(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) o de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) involucrándose en todos los procesos principales de crecimiento y rendimiento de cultivos, de tal manera que un buen suministro de nitrógeno en los mismos es importante también para la absorción de otros nutrientes; Es importante tomar en cuenta que los niveles recomendados de nitratos para no afectar la vida acuática y la calidad de suelo se encuentran entre 0 y 40 mg/l, cuando el nivel de nitratos excede los 80 mg/l puede ser tóxico (FAO, 2002). Siendo así los resultados obtenidos para R1 y R2 son favorables ya que los niveles de nitratos en los efluentes están dentro de los límites recomendados.

#### 4.2 Velocidad de desplazamiento de la materia orgánica

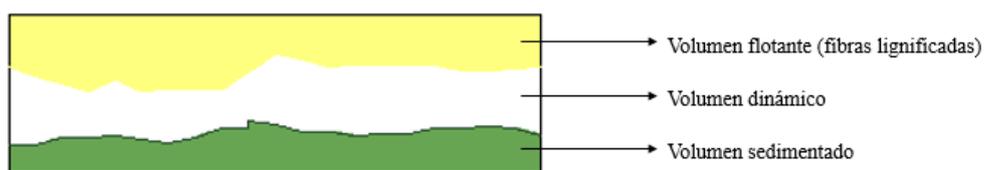
Las relaciones en la configuración de cada reactor se detallan a continuación en la tabla 6:

**Tabla 6.** Relación dimensional en R1 y R2

Reactor	Relación ancho/altura (cm)	Relación ancho/longitud (cm)
R1	15/30	15/100
R2	30/30	30/100

Los reactores R1 y R2 tienen una configuración rectangular, cuya única diferencia es la variación del ancho entre sí, esto permite realizar la comparación de los reactores basándose en el principio de similitud geométrica. R1 completó la superficie de sedimentación en el fondo hasta alcanzar la distancia total de 100 cm en un período de 20 días y 25 días para R2 respectivamente (véase anexo 2).

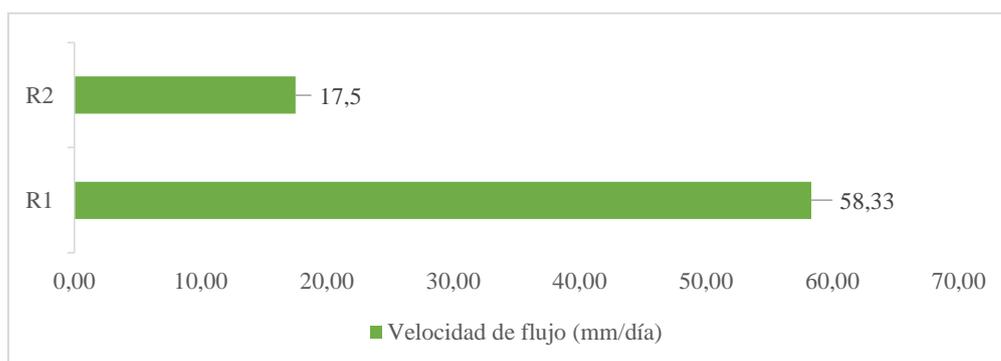
Durante el desarrollo experimental se observó en los reactores un comportamiento similar llegándose a identificar tres zonas bien marcadas (Figura 9). Para facilitar el análisis se domina tres términos: i) volumen dinámico, como la zona de mayor homogenización hidráulica por donde fluyen los elementos, ii) volumen sedimentado como la zona estática de partículas más pesadas sedimentadas y iii) volumen flotante como la zona de partículas livianas caracterizadas por la presencia de fibras lignificadas.



**Figura 9.** Zonas de Flujo en un reactor anaeróbico de tipo pistón

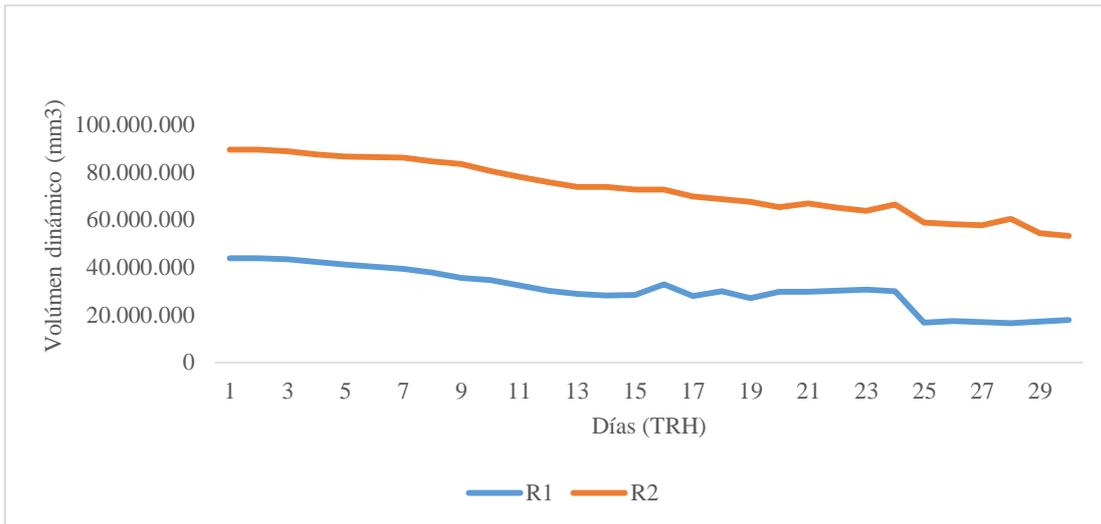
Esto puede ser explicado mediante el término de densidad de distribución descrito por Giacoman, Frías, Hurtado, Coronado y Méndez (2003) donde se considera que un fluido está constituido por una infinidad de elementos expuestos a diversas y variadas fuerzas de empuje y obstrucción al movimiento de los mismos, se asumen que cada elemento del fluido tiene un comportamiento definido dentro del sistema que determina su permanencia en el mismo, para ello plantean remontar imaginariamente líneas de flujo para cada uno de los elementos con el fin de reconocer las estructuras de flujo que conducen la dispersión del tiempo de residencia.

El cálculo de la velocidad de flujo se realizó tomando en cuenta el volumen dinámico de cada reactor obteniendo el siguiente resultado:



**Figura 10.** Velocidad de flujo en R1 y R2

La velocidad de flujo fue mayor en R1, como se evidencia en la Figura 11 el volumen de flujo dinámico ocupado por R1 mantiene valores inferiores a R2, acortando así el tiempo de residencia de los elementos al interior del reactor.



**Figura 11.** Volumen dinámico de R1 y R2 durante el período de observación

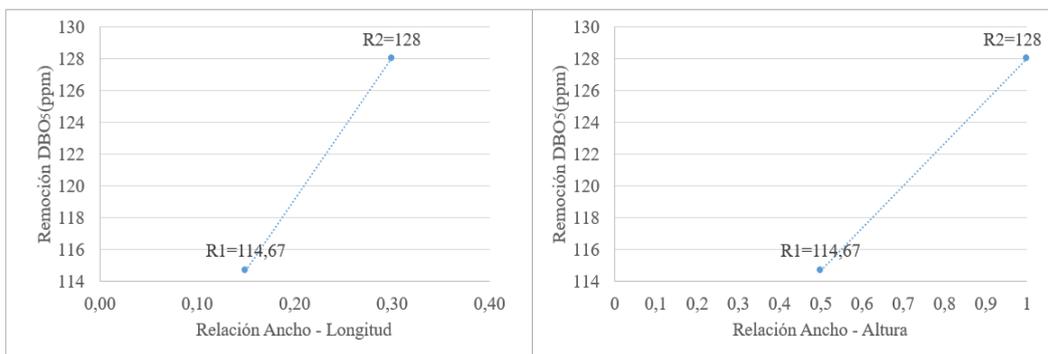
Por otra parte se puede observar que a medida que el volumen dinámico de cada reactor disminuye, la velocidad de flujo se incrementa; para el caso de R1 la velocidad de flujo aumenta rápidamente en comparación con R2 (Figura 12) debido a que el volumen de flotación en el reactor es mayor y por ende el volumen dinámico por el que pasa el fluido disminuye (Véase Anexo 2). Dicho fenómeno puede ser explicado por Giacomani, Frías, Hurtado, Coronado y Méndez (2003), quienes afirman que tanto los efectos macroscópicos como los microscópicos están entrelazados de forma compleja, y considera a los efectos de dispersión macroscópica influenciados por la geometría del dispositivo donde se desarrolla el flujo; en el caso de sistemas de una sola fase como son los reactores de tipo pistón, la velocidad de los elementos dentro del sistema varían en función a su posición respecto al área transversal de flujo.



**Figura 12.** Velocidad de Flujo durante el período de observación

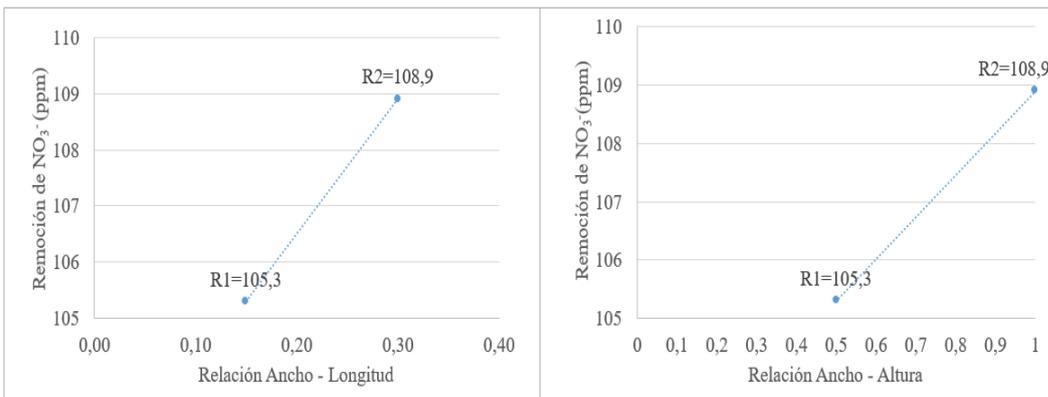
La verificación de los resultados obtenidos para determinar su significancia se realizó mediante una prueba estadística de T de student, se comparó el volumen dinámico de cada reactor obteniéndose diferencias significativas ( $p$  valor = 0,00) entre R1 y R2.

Finalmente para evaluar la incidencia de la velocidad de desplazamiento sobre el rendimiento de los reactores, se analizaron las relaciones dimensionales: ancho – longitud y ancho – altura frente a la remoción de  $\text{DBO}_5$  y  $\text{NO}_3^-$  (Figura 13 y 14).



**Figura 13.** Remoción de  $\text{DBO}_5$  frente a la relación dimensional de R1 y R2.

El valor de la pendiente en cada relación dimensional se calculó para determinar la velocidad de remoción de  $\text{DBO}_5$ , en el caso la relación ancho – longitud se obtuvo un valor 88,86 mientras que para la relación ancho – altura se obtuvo un valor de remoción de 26,66. Se realizó el mismo procedimiento para determinar la remoción de  $\text{NO}_3^-$ , para ello se obtuvieron valores de 24 en la relación ancho – longitud y 7,20 en la relación ancho – altura.

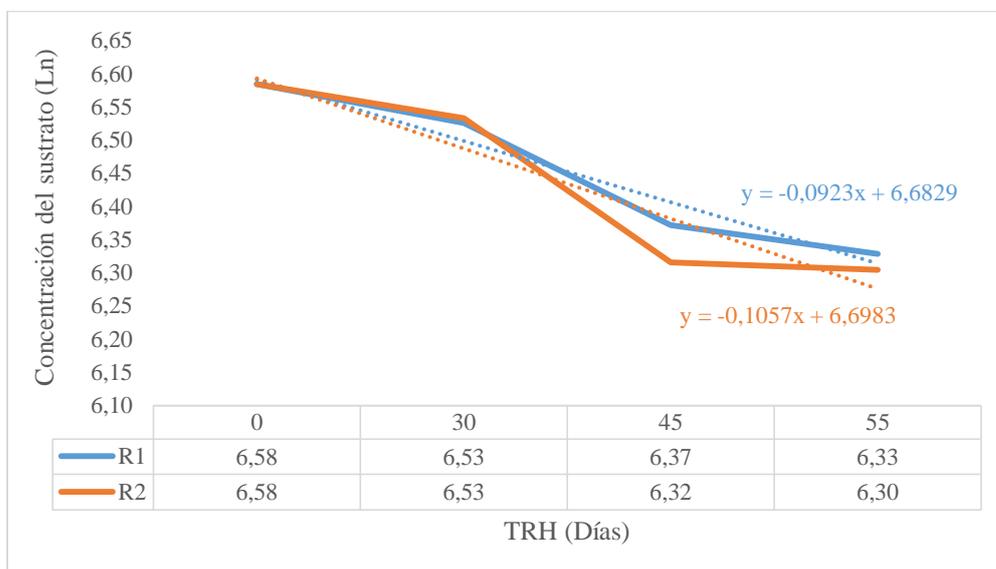


**Figura 14.** Remoción de  $\text{NO}_3^-$  frente a la relación dimensional de R1 Y R2

Según Stewart, Redlin, y Watson (2012) el valor de la pendiente es una medida de cómo la variable dependiente (remoción  $\text{DBO}_5$  y  $\text{NO}_3^-$ ) cuando se presentan cambios en la variable independiente (relaciones dimensionales), para así comprender lo que ocurre con el fenómeno de estudio; de esta manera, se determina que en la relación ancho- longitud existe mayor incidencia que la relación ancho - altura del reactor, sobre la velocidad de remoción de  $\text{DBO}_5$  y  $\text{NO}_3^-$  debido a que el valor de la pendiente obtenidos en ambos parámetros fue mayor. Por tal razón Romero (2004) sugiere que para alcanzar una eficiencia de remoción igual o mayor al 60% es importante considerar cuidadosamente la longitud y el ancho del reactor.

### 4.3 Parámetros de diseño del reactor anaeróbico tipo pistón

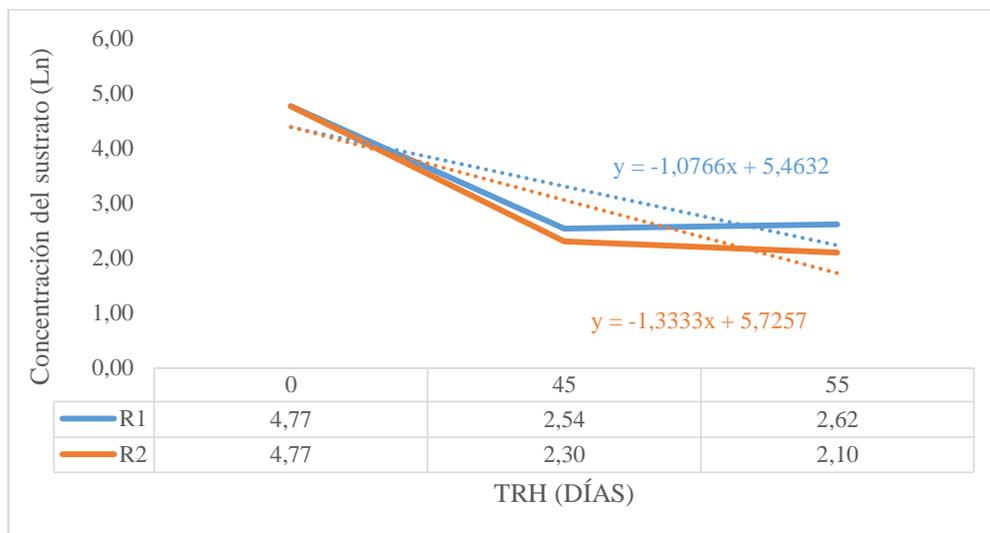
La constante media de velocidad de conversión ( $K_s$ ) de materia orgánica para  $\text{DBO}_5$  y  $\text{NO}_3^-$  se calculó mediante las siguientes gráficas:



**Figura 15.** Niveles de concentración de  $\text{DBO}_5$  del sustrato en diferentes TRH.

La constante media de velocidad de conversión de materia orgánica para  $\text{DBO}_5$  en R1 es de 0,09 mientras que en R2 es de 0,10 esto significa mayor rendimiento en R2 debido a que la tasa de conversión es más alta, en la gráfica se puede apreciar que las concentraciones de sustrato en R2 disminuyen con mayor rapidez a medida que el TRH aumenta. De acuerdo con Jiménez y Mojica (2005), Los reactores anaeróbicos de flujo pistón permiten la remoción de materia orgánica a medida que

se operan por más tiempo de retención, la DBO<sub>5</sub> va disminuyendo y se reducen los niveles de contaminación, la biomasa presente en el reactor se adapta mejor al sustrato y permite mayor crecimiento bacteriano.



**Figura 16.** Niveles de concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> del sustrato en diferentes TRH.

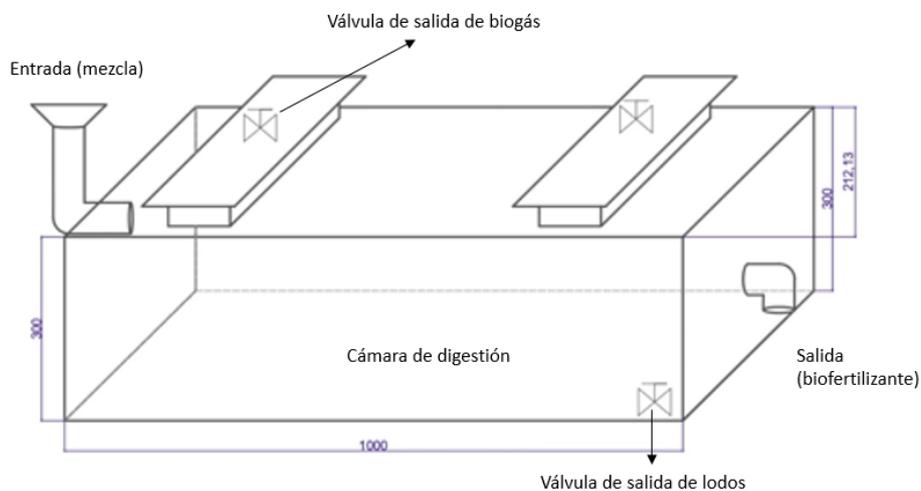
La constante media de velocidad de conversión de materia orgánica para NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Es de 1.07 en R1 y 1.33 en R2, representando mayor tasa de conversión en R2. Si bien es cierto, a diferencia de al DBO<sub>5</sub> la concentración de nitratos no disminuye progresivamente a medida que el TRH aumenta. Sin embargo, es importante considerar que durante los procesos de nitrificación los compuestos de amonio son oxidados a nitritos para posteriormente ser oxidados nuevamente a nitratos, los cuales son menos tóxicos que los nitritos y pueden ser usados como fuente de nutrientes en cultivos, siendo así que un incremento en la concentración de nitratos puede significar mejor rendimiento en el proceso de nitrificación (Lenntech Water Treatment, 2019).

Considerando lo mencionado anteriormente, se ha elaborado la siguiente tabla de resumen de los parámetros tomados durante el estudio, con el fin de evaluar que reactor tuvo mejor rendimiento:

**Tabla 7.** Tabla comparativa de parámetros medidos entre R1 y R2

Parámetro	R1	R2	Análisis estadístico
Remoción de DBO <sub>5</sub>	15,84%	17,68%	No significativo (p valor = 0,4)
Remoción de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	89,23%	92,29%	Significativo (p valor = 0,00)
Volumen dinámico (dm <sup>3</sup> )	1 714,28	5 711,42	Significativo (p valor = 0,00)
Velocidad de flujo (mm/día)	58,33	17,50	
Constante media de velocidad de conversión K <sub>s</sub>	0,09 (DBO <sub>5</sub> ) 1,07 (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0,10 (DBO <sub>5</sub> ) 1,33 (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	

El rendimiento de las reacciones anaeróbicas en reactores de tipo pistón está influenciado por la velocidad de desplazamiento de materia orgánica, de acuerdo con los resultados obtenidos, se comprobó que a mayor velocidad de desplazamiento la tasa de conversión de materia orgánica es menor y por ende la eficiencia en los procesos anaeróbicos disminuye. Es así que se determina que la relación dimensional ancho - altura más efectiva para el tratamiento de residuos orgánicos ganaderos es 1:1 (Figura 17), reflejando mayor eficiencia el R2 debido a que el volumen dinámico del reactor al ser mayor, permitió que la materia orgánica ingresada tenga una mejor capacidad de remoción especialmente para NO<sub>3</sub><sup>-</sup> cuya eficiencia alcanzó el 92,29%.



**Figura 17.** Plano del Reactor dos (R2).

Una de las ventajas de los reactores de flujo pistón es que su geometría permite obtener una mejor optimización de espacio. Chamy, Vivanco y Yaya (2018), afirman que este tipo de reactores se caracterizan por su configuración compacta y de bajo costo además de requerir menos controles para mantener la estabilidad durante los procesos microbiológicos. Por otra parte, Víquez (2017) recomienda utilizar reactores de flujo pistón para explotaciones agropecuarias y pequeñas comunidades, pues su diseño horizontal permite optimizar espacio a diferencia de otros reactores de configuración vertical, cuya construcción se dificulta al momento de realizar excavaciones debido al requerimiento de mayor profundidad, lo que genera aparición de humedad excesiva por la presencia de las napas freáticas.

En la tabla 8, se resumen los principales estándares de diseño de un reactor anaeróbico de flujo pistón aplicado al tratamiento de residuos orgánicos ganaderos.

**Tabla 8.** Parámetros de diseño para un reactor anaeróbico de flujo pistón

Parámetros	Valores
Tiempo de retención (TRH)	En función a la temperatura
Contenido de sólidos totales en la mezcla	8 - 10%
DQO del afluente	1000 – 3000 mg/l (Romero, 2004).
Caudal de alimentación	En base al volumen del reactor ( $V_r$ ) y el TRH se determina con la siguiente fórmula: $Q_i = V_r / TRH$
Relación ancho - altura	1:1
Relación ancho - longitud	1:3 (Romero, 2004).

## CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

La materia orgánica almacenada a 4°C durante los primeros 30 días, utilizada en la alimentación de los reactores no presentó ninguna alteración relevante, conservando la calidad de sustrato en cada carga; el contenido de sólidos totales correspondió al 20.9%. Por otra parte las concentraciones de DBO<sub>5</sub> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> disminuyeron al final del proceso, obteniéndose como resultado porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> 15,84% en R1 y 17,68% en R2 DBO<sub>5</sub>, y remoción de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> del 89,23% en R1 y 92,29% en R2. Adicionalmente Los parámetros de pH, Temperatura se mantuvieron estables durante todo el proceso de digestión por tanto no fue necesario de controles adicionales.

El análisis de los valores obtenidos para la velocidad de desplazamiento en los reactores evidenciaron mayor velocidad en R1 (58,33 mm/día y 17,5 mm/día en R2) y menor TRH. Sin embargo, se determinó que éste último está relacionado directamente con la capacidad de conversión de materia orgánica, al incrementar el TRH del sustrato la capacidad de conversión es mayor y por ende los niveles de contaminación en el efluente disminuyen. Además el análisis de similitud para evaluar las relaciones dimensionales de los reactores con respecto a la remoción de materia orgánica en función de DBO<sub>5</sub> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, reflejó que existe mayor incidencia de la longitud sobre la altura del reactor.

La velocidad de desplazamiento tiene una incidencia inversamente proporcional en el rendimiento de las reacciones anaeróbicas del reactor, es decir que a mayor velocidad la capacidad de conversión de materia orgánica es menor, de tal manera queda demostrado que R2 obtuvo mejor rendimiento durante el proceso de tratamiento de residuos orgánicos provenientes de prácticas ganaderas.

Con referencia al diseño de reactores tipo pistón, la relación dimensional óptima para el tratamiento ambiental de residuos orgánicos ganaderos es 1:1 (altura -

ancho) y 1:3 (ancho - longitud) para lograr una mayor capacidad de conversión de materia orgánica. No obstante, en la generación de abonos orgánicos la relación 2:1 (altura - ancho) es favorable puesto que el TRH es menor y el sustrato obtenido cuenta con mayor cantidad de nutrientes, sin mencionar que las fibras obtenidas del volumen flotante son mayores y pueden ser aplicadas directamente sobre el suelo en forma de abono, teniendo como ventaja la reducción de patógenos y otros vectores de enfermedades en el ambiente.

## **5.2 Recomendaciones**

En un reactor anaeróbico de tipo pistón es necesario verificar la hermeticidad y cumplir con rigor las condiciones anaeróbicas para el desarrollo de las bacterias participantes en los procesos de digestión. Además, se debe evaluar periódicamente parámetros como la relación carbono nitrógeno, micronutrientes, población microbiana, cantidad y calidad de biogás producido; para fortalecer el entendimiento del proceso de digestión anaeróbica.

Los espacios muertos atribuidos a volúmenes flotantes y sedimentados afectan al proceso anaeróbico y se considera relevante continuar con trabajos de investigación sobre la incidencia de la homogenización hidráulica en la digestión anaeróbica mediante reactores tipo pistón.

## REFERENCIAS

- Agencia Extremeña de la Energía. (2017). *Los residuos ganaderos*. Recuperado de <https://www.agenex.net/images/stories/deptos/los-residuos-ganaderos.pdf>
- Asociación Estadounidense de Salud Pública (APHA). (2005). *Método estándar para la examinación de agua y aguas residuales*. Washington: APHA
- Basturdo, A. (2013). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaeróbico con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya, Bolivia* (Tesis de posgrado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Barcelona.
- Bonet, J. y Costa, J. (2016). *Tratamiento de aguas residuales: un enfoque práctico*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Botero, R. y Hernández, C. (2016). *Manejo productivo de excretas en sistemas ganaderos tropicales*. Recuperado de Engormix website: <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/manejo-productivo-excretas-sistemas-t26557.html>
- Cenegal, Y, y Simbala, J. (2012). *Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw- Hill companies.
- Chamy, E., Vivanco, R. y Yaya, R. (2018). *Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales*. España: Red Tritón.
- Chen, Y., Cheng, J. y Creamer, C. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99 (10).
- Código Orgánico del Ambiente (COA). (2017). *Registro oficial*, 983 (12 de abril 2017)
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Registro oficial*, 449 (20 de

octubre del 2008)

- Cuenca, G. (2014). Comportamiento de DBO5, DQO, NH4 + y NO3 - , mediante el diseño de un Humedal Artificial Subsuperficial para depurar aguas residuales de origen doméstico. *Revista La Técnica*, 13(1), 82-89.
- De la Orden, E. (2007). *Contaminación*. Catamarca: Editorial científica universitaria.
- Estrada, J., Martínez, J., Ortíz, A. y Vera, I. (2013). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica, Parte I: excretas de ganado porcino y bovino. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 9(3), 429-436.
- FAO (2002). *Los Fertilizantes y su Uso*. Roma:FAO.
- FAO. (2009). *La larga sombra del ganado*. Roma: FAO.
- FAO. (2012). *Ganadería Mundial 2011- la ganadería en la seguridad alimentaria*. Roma:FAO
- Fazil, A., Ilham, M., Sarbaini, S. y Purwanto H. (2017). Kinetics on anaerobic co-digestion of bagasse and digested cow manure with short hydraulic retention time. *Research in Agricultural Engineering*, 63(3), 121-127.
- Ferrer, J. y Seco, A. (2008). *Tratamientos biológicos de aguas residuales* (Primera Ed). México: Alfaomega Grupo Editor.
- Flores, R., Alarcón, M., Vélez, C. y Domínguez, I. (2016). Tratamiento de residuos ganaderos en un reactor anaerobio de flujo ascendente. *VI Congreso Internacional y XII nacional de ciencias ambientales, México*, 0187-3296.
- Flotats, X. (2016). Diseño de procesos para el tratamiento de los residuos ganaderos. En J. Bustillo. y, M. Navarro (Eds). *Tecnología aplicables a la reutilización de los residuos orgánicos urbanos, agrícolas o alimentarios*. (pp. 127-144). Burgos: Servicios de publicaciones de la Universidad de Burgos.

- Franch, A. (2000). Tratamiento de residuos ganaderos de los residuos ganaderos. *Frisona Española*, 2(116), 128-130.
- GAD parroquial La Esperanza. (2015). *Plan de Ordenamiento Territorial de la Parroquia de La Espeanza 2015 - 2019*. Ibarra.
- Gerber, P., Steinfeld, H., Henderson, B., Opio, C., Dijickman, J., Falucci , G. y Tempio, G. (2013). *Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería*. Roma: Organización de las naciones unidas para la alimentación y agricultura  
Roma: FAO
- Giacoman, G., Frías, T., Hurtado, J. y Coronado, F. (2003). Análisis de la hidrodinámica de un reactor de flujo pistón. *Ingeniería* 2(3), 7-19.
- Guillen, R. y Rivas, O. (2011). Producción de metano a partir de desechos orgánicos generados en el Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 25(2), 73-79.
- Gropelli, E. y Giampaoli, O. (2012). *Biodigestores. Una propuesta sustentable* (1 a ed.). Santa Fé: Ediciones UNL.
- Hach Company. (2018). *Nitrate, HR Cadmium Reduction Method 8039* (10ma ed.). Colorado: Hach Lange.
- Herrero, M. y Gil, S. (2008). Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecología Austral*, 18, 273-289.
- Hernandez-Berriel, M., Benavides, L., Perez, D. y Delgado, O. (2008). The effect of moisture regimes on the anaerobic digestion of municipal solid waste from Metepec (Mexico). *Waste Management*, 28, 14–20.
- Hoornweg, D. y Bhada, P. (2012). *What a waste a global review of solid waste management*. Washington: Urban development Series.
- Jiménez, E. y Mojica, M. (2005). Estudio de factibilidad de un reactor anaerobico de flujo puston a escala de laboratorio, en el tratamiento de las aguas residuales

- domésticas del municipio de Tunja a una temperatura promedio de 14°C. *Tecnogestión. Una mirada al ambiente*, 2(1), 1-18.
- Lazcano, C. (2016). *Biotecnología ambiental de aguas y aguas residuales* (Segunda Ed). Bogotá: Ecoe Ediciones: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Lenntech Water Treatment (2019). *Tratamiento y purificación de aguas: Nitratos*. Recuperado de: <https://www.lenntech.es/nitratos.htm>
- Lorente, A. (2010). Ganadería y cambio climático: una influencia recíproca. *Geographos*, 1(3), 1-22.
- Ministerio de Ambiente del Ecuador (MAE). (2015). *Introducción de Biodigestores en Sistemas Agropecuarios en el Ecuador. Un aporte a la mitigación y adaptación al cambio climático*. Quito.
- Mitchel, S., Keneddy, N., Ma, J., Yorgey, G., Kruger, C., Ullman, J. y Frear, C. (2015). *Anaerobic digestion effluents and processes : the basics anaerobic digestion effluents and processes : the basics*. Washington.
- Morales, S., Vivas, N. y Teran, V. (2016). Ganadería eco-eficiente al cambio climático. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(1), 135-144.
- Muzaffar, M., Athar, H. y Chanchal, V. (2016). Design considerations and operational performance of anaerobic digester : a review. *Cogent Engineering*, 3, 1-20. doi: 10.1080/23311916.2016.1181696
- Nave, C. (2017). *Bulk Elastic Properties*. Recuperado de HyperPhysics <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>
- Ocaña, F. (2011). *Biodigestor anaerobio de laboratorio* (Tesis de Pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Olaya, Y. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores* (Tesis de posgrado). Universidad Nacional de Colombia, Palmira.

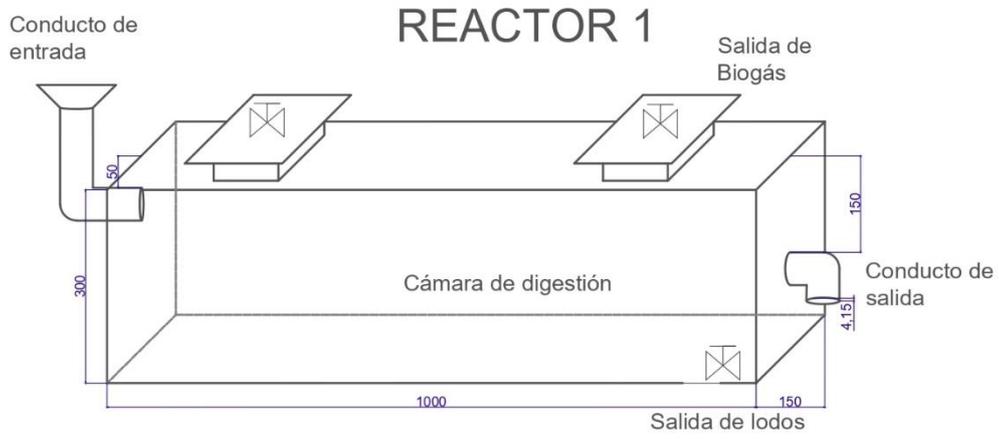
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992). *Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Nueva York, Series Tratados de las Naciones Unidas.
- Osejo, M., Jaramillo, J., Merino, M., Quimis, A. y Alcívar, J. (2018). Producción de biogás con estiércol de cerdo a partir de un biodigestor en la Granja EMAVIMA Jipijapa – Ecuador. *Donimio de las ciencias*, 4(1), 709-733.
- Palau, E. (2016). *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás*. Recuperado de Repositorio institucional de la Universidad Politécnica de Valencia website: <https://riunet.upv.es/handle/10251/68331>
- Pizarro, S. (2005). *Biodigestor* (primera Ed). Buenos Aires, Argentina: Grafica Pinter S,A.
- Reyes, R., Díaz, S., Espinosa, Y., Quiñonez, I. y Borrero, I. (2015). Propuesta de soluciones para incrementar el uso eficiente de los subproductos ganaderos en base a los principios de P+L. *CENIC, Ciencias Biológicas*, 46, 388-395.
- Reglamento de aplicación del código orgánico ambiental. (2019). *Registro oficial*, 507(12 de junio del 2019).
- Romero, J. (2004). *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño*(tercera Ed.)Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sánchez, M., Peón, I., Cardona, T., Ortega, L. y Urriolagotia, G. (2016). Evaluación inicial de parámetros de campo en un biodigestor anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Colombiana Biotecnológica*, 18(1), 173-184.
- Rincón B., Borja R., González J.M., Portillo M.C. y Sáiz C. (2008): Influence of organic loading rate and hydraulic retention time on the performance, stability and microbial communities of one-stage anaerobic digestion of two-phase olive mill solid residue. *Biochemical Engineering Journal*, 40, 253–261.

- SENPLADES. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021- Toda una Vida*. Quito: Senplades.
- Silva, C., Cevallos, R., Sarabia, M. y Boza, J. (2016). Impacto en el medio ambiente de las actividades agropecuarias en el cantón el Empalme, Ecuador. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 1. 38-45
- Solano, O. R., Vargas, M. F. y Watson, R. G. (2011). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología en Marcha*, 23(1), 39.
- Sosnowski, P., Wieczorek, S. y Ledakowicz, S. (2002). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of MSWs. *Advance Environmental Research*, 7, 609–616.
- Stewart, J., Redlin, L. y Watson, S. (2012). *Precálculo* (Sexta ed.). México: Editorial Cengage Learning.
- Vallejos, G., Frías, G., Hurtado, F., Coronado, V. y Méndez, R. (2003). Análisis de la hidrodinámica de un reactor de flujo pistón. *Ingeniería*, 7(3), 7-19.
- Viquez, J. (2017). *Introducción a los Biodigestores*. Paper presentado en el 9no Encuentro de la Red de Biodigestores Para Latino América y el Caribe RedBioLAC, Argentina.
- Xiaojiao, W., Yang, G., Feng, Y., Ren, G. y Han, X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, 120, 78–83.
- Zhang, L., Lee, Y. y Jahng, D. (2011). Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. *Bioresource Technology*, 102, 5048–5059.

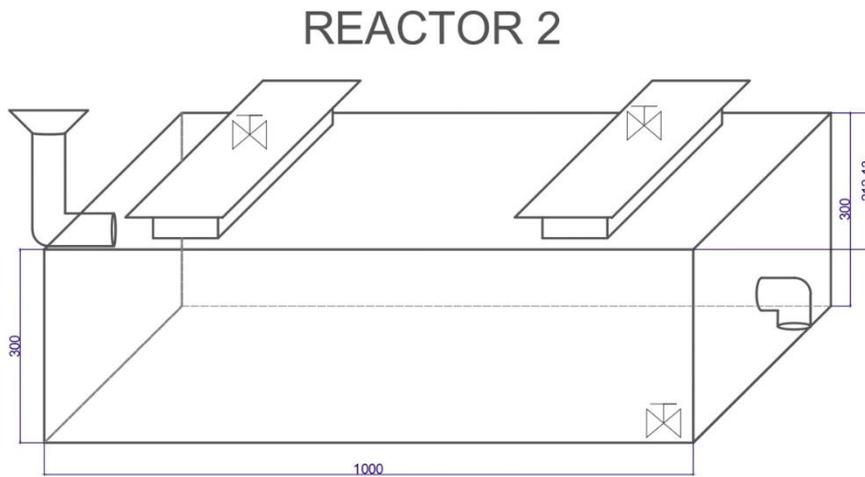
## ANEXOS

### Anexo 1. Planos de los reactores anaeróbicos utilizados en el estudio

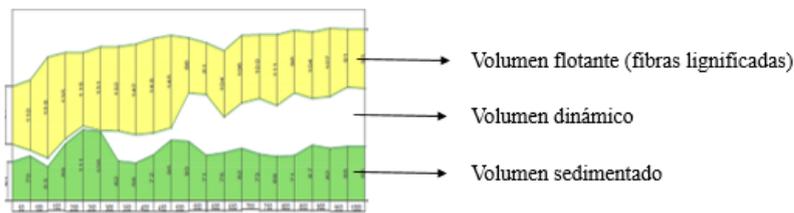
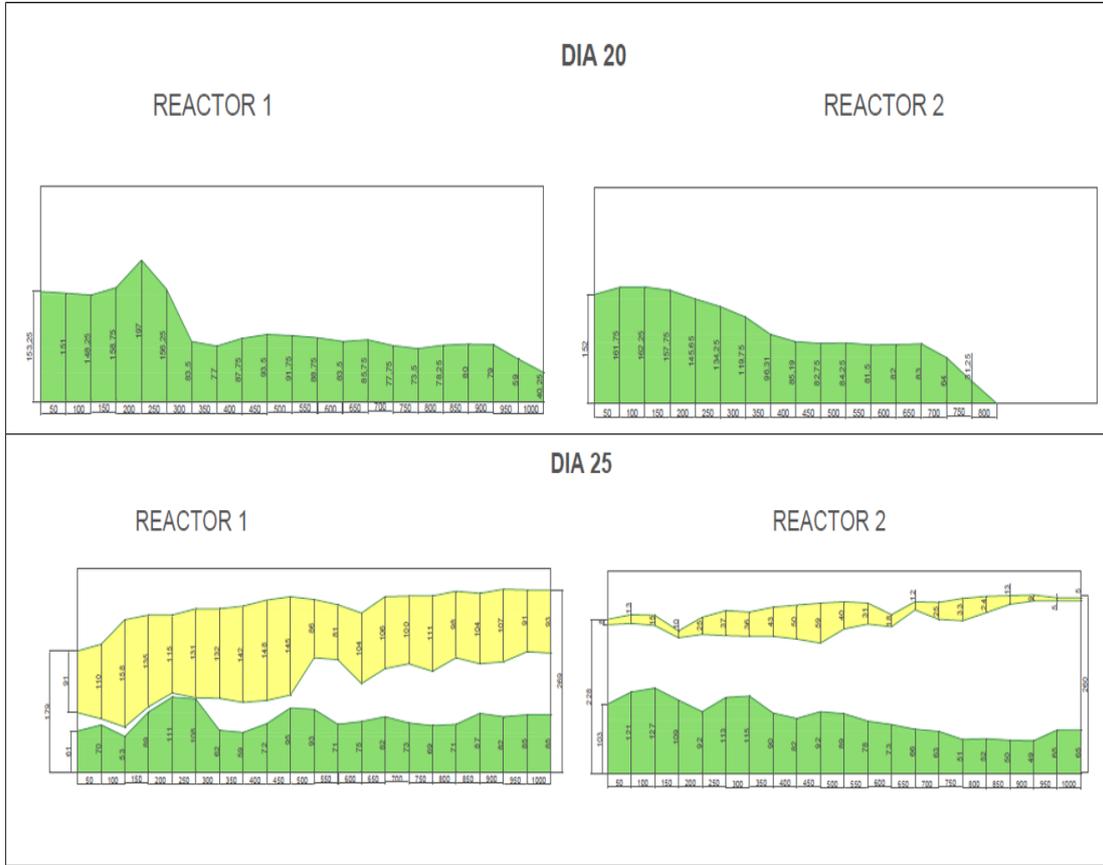
CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK



CREADO CON UNA VERSION PARA ESTUDIANTES DE AUTODESK



**Anexo 2. Desplazamiento de la materia orgánica a los 20 y 25 días de haber alcanzado la distancia máxima.**



**Anexo 3 Tabla de volúmenes en R1 y R2**

DÍAS	R1						R2					
	SEDIMENTO		DINÁMICO		FLOTACIÓN		SEDIMENTO		DINÁMICO		FLOTACIÓN	
	ÁREA (mm <sup>2</sup> )	VOLUMEN (mm <sup>3</sup> )										
1	7262,5	1089375	292737,5	43910625			1958,75	587625	298041,25	89412375		
2	7915	1187250	292085	43812750			1537,5	461250	298462,5	89538750		
3	10735	1610250	289265	43389750			4037,5	1211250	295962,5	88788750		
4	18618,75	2792812,5	281381,25	42207187,5			8612,47	2583741	291387,53	87416259		
5	25643,75	3846562,5	274356,25	41153437,5			11762,46	3528738	288237,54	86471262		
6	30987,5	4648125	269012,5	40351875			12331,21	3699363	287668,79	86300637		
7	38006,25	5700937,5	261993,75	39299062,5			12996,1	3898830	287003,9	86101170		
8	47881,25	7182187,5	252118,75	37817812,5			17850	5355000	282150	84645000		
9	62962,5	9444375	237037,5	35555625			21712,44	6513732	278287,56	83486268		
10	68695,72	10304358	231304,28	34695642			31417,96	9425388	268582,04	80574612		
11	84093,71	12614056,5	215906,29	32385943,5			39855,67	11956701	260144,33	78043299		
12	98468,12	14770218	201531,88	30229782			47503,57	14251071	252496,43	75748929		
13	107402,81	16110421,5	192597,19	28889578,5			53770,44	16131132	246229,56	73868868		
14	112713,59	16907038,5	187286,41	28092961,5			53731,46	16119438	246268,54	73880562		
15	111100	16665000	188900	28335000			57585,18	17275554	242414,82	72724446		
16	81609,37	12241405,5	218390,63	32758594,5			57509,36	17252808	242490,64	72747192		
17	114178,28	17126742	185821,72	27873258			67262,72	20178816	232737,28	69821184		
18	100875,57	15131335,5	199124,43	29868664,5			70872,67	21261801	229127,33	68738199		
19	119562,34	17934351	180437,66	27065649			75191,43	22557429	224808,57	67442571		

<b>20</b>	102351,87	15352780,5	197648,13	29647219,5			82524,42	24757326	217475,58	65242674		
<b>21</b>	102018,75	15302812,5	197981,25	29697187,5			77233,35	23170005	222766,65	66829995		
<b>22</b>	99529,45	14929417,5	200470,55	30070582,5			82969,29	24890787	217030,71	65109213		
<b>23</b>	95226,56	14283984	204773,44	30716016			87891,93	26367579	212108,07	63632421		
<b>24</b>	100147,1	15022065	199852,9	29977935			78862,14	23658642	221137,86	66341358		
<b>25</b>	74787,03	11218054,5	112431,72	16864758	112781,25	16917187,5	75622,76	22686828	196214,31	58864293	28162,93	8448879
<b>26</b>	83075	12461250	115800	17370000	101125	15168750	68475	20542500	193978,76	58193628	37546,24	11263872
<b>27</b>	84182,18	12627327	112545,82	16881873	103272	15490800	70416,09	21124827	192633,91	57790173	36950	11085000
<b>28</b>	95075	14261250	110775	16616250	94150	14122500	74700	22410000	201200	60360000	24100	7230000
<b>29</b>	106600	15990000	115350	17302500	78050	11707500	100550	30165000	180800	54240000	18650	5595000
<b>30</b>	122820,46	18423069	118813	17821950	58366,54	8754981	101825	30547500	177457,75	53237325	20717,25	6215175

#### Anexo 4. Registro fotográfico



Fotografía 1 y 2. Ensamblaje de los reactores



Fotografía 3. Pruebas de agua para la verificación de fugas



Fotografía 4 y 5. Medición de humedad en las muestras de materia orgánica



Fotografía 6. Primera carga de materia orgánica en el reactor uno.



Fotografía 7. Primera carga de materia orgánica en el reactor dos



Fotografía 8. Distribución de sedimentos en el reactor uno (formación de canales)



Fotografía 9 y 10. Sedimentos en el reactor uno (parte inicial y parte final del reactor)



Fotografía 11. Distribución de sedimentos en el reactor dos



Fotografía 12. Sedimentos en el reactor dos

Anexo 5. Análisis de laboratorio (DBO<sub>5</sub> y Nitratos)



**ACU - CHEM**

*Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos de Aguas*

REPORTE DE ANALISIS DE AGUAS			
<b>DATOS DEL SOLICITANTE</b>		<b>DATOS DEL SITIO DE MUESTREO</b>	
Nombre:	Srta. Carolin Mishell Arteaga G.	Profundidad:	No aplica
Ciudad:	Ibarra	Cantón:	No aplica
Teléfono:		Parroquia:	No aplica
Fax:		Sitio:	Reactores anaeróbicos
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA</b>		<b>DATOS DEL LABORATORIO</b>	
Fecha de muestreo:	20 de agosto de 2019	Nro. Reporte:	67 - 2019
Codificación:	RE, R15, R25	Tipo de Análisis:	Parcial
Aspecto:	No aplica	Muestra:	Sus tratos
Color Visual:	No aplica	Fecha de Ingreso:	20 de agosto de 2019
		Fecha de Reporte:	26 de agosto de 2019

Parámetros Químicos	Unidad	Resultado			Método Aplicado
		RE	R15	R25	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/l	770	682	687	APHA 5210 B

*Verónica Espinoza*

**Dra. Verónica Espinoza**  
TECNICO DE LABORATORIO

**ACU - CHEM**  
LABORATORIO DE ANALISIS  
FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS  
DE AGUAS  
IBARRA - ECUADOR

Dra. Verónica Espinoza  
9989753573

email: acu\_chem@hotmail.com  
Carlos Bustos Mesa 1-317 y Eduardo García Fomora  
Ibarra - Ecuador

Misión:  
Brindar servicios de Análisis Físico, Químico y Microbiológico de Aguas, Ofreciendo Tecnología de Punta y Responsabilidad al Servicio del Cliente.

REPORTE DE ANALISIS DE AGUAS													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DATOS DEL SOLICITANTE</th> <th>DATOS DEL SITIO DE MUESTREO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nombre: Srta. Carolin Mitchell Arteaga G.</td> <td>Provincia: No aplica</td> </tr> <tr> <td>Ciudad: Ibarra</td> <td>Cantón: No aplica</td> </tr> <tr> <td>Teléfono:</td> <td>Parroquia: No aplica</td> </tr> <tr> <td>Fax:</td> <td>Sitio: Reactores anaeróbicos</td> </tr> </tbody> </table>		DATOS DEL SOLICITANTE	DATOS DEL SITIO DE MUESTREO	Nombre: Srta. Carolin Mitchell Arteaga G.	Provincia: No aplica	Ciudad: Ibarra	Cantón: No aplica	Teléfono:	Parroquia: No aplica	Fax:	Sitio: Reactores anaeróbicos		
DATOS DEL SOLICITANTE	DATOS DEL SITIO DE MUESTREO												
Nombre: Srta. Carolin Mitchell Arteaga G.	Provincia: No aplica												
Ciudad: Ibarra	Cantón: No aplica												
Teléfono:	Parroquia: No aplica												
Fax:	Sitio: Reactores anaeróbicos												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA</th> <th>DATOS DEL LABORATORIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fecha de muestreo: 05 de septiembre de 2019</td> <td>Nro. Reporte: 71 - 2019</td> </tr> <tr> <td>Codificación: RE, R15, R25</td> <td>Tipo de Análisis: Parcial</td> </tr> <tr> <td>Aspecto: No aplica</td> <td>Muestra: Sustratos</td> </tr> <tr> <td>Color Visual: No aplica</td> <td>Fecha de Ingreso: 05 de septiembre de 2019</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Fecha de Reporte: 10 de septiembre de 2019</td> </tr> </tbody> </table>		CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA	DATOS DEL LABORATORIO	Fecha de muestreo: 05 de septiembre de 2019	Nro. Reporte: 71 - 2019	Codificación: RE, R15, R25	Tipo de Análisis: Parcial	Aspecto: No aplica	Muestra: Sustratos	Color Visual: No aplica	Fecha de Ingreso: 05 de septiembre de 2019		Fecha de Reporte: 10 de septiembre de 2019
CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA	DATOS DEL LABORATORIO												
Fecha de muestreo: 05 de septiembre de 2019	Nro. Reporte: 71 - 2019												
Codificación: RE, R15, R25	Tipo de Análisis: Parcial												
Aspecto: No aplica	Muestra: Sustratos												
Color Visual: No aplica	Fecha de Ingreso: 05 de septiembre de 2019												
	Fecha de Reporte: 10 de septiembre de 2019												

Parámetros Químicos	Unidad	Resultado			Método Aplicado
		RE	R15	R25	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/l	701	585	553	APHA 5210 B
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	6414	5682	5586	APHA 5520 D
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	136	13,7	8,2	HACH 8030

*Verónica Espinoza*

Dra. Verónica Espinoza  
TECNICO DE LABORATORIO

**ACU - CHEM**  
LABORATORIO DE ANALISIS  
FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS  
DE AGUAS  
IBARRA - ECUADOR

Dra. Verónica Espinoza  
989703573

email: acu\_chem@hotmail.com  
Carlos Barcelona Mesa 1-187 y Eduardo García Fonseca  
Ibarra - Ecuador

Misión:  
Brindar asistencia técn. Personalizada, ágil y efectiva en la Demanda Análisis de Aguas, Ofreciendo Tecnología de Punto y Responsabilidad al Servicio al Cliente.

**REPORTE DE ANALISIS DE AGUAS**

DATOS DEL SOLICITANTE		DATOS DEL SITIO DE MUESTREO	
Nombre:	Srta. Carolin Mishell Arteaga G.	Provincia:	No aplica
Ciudad:	Ibarra	Cantón:	No aplica
Teléfono:		Parroquia:	No aplica
Fax:		Sitio:	Reactores anaeróbicos

CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA		DATOS DEL LABORATORIO	
Fecha de muestreo:	11 de septiembre de 2019	Nro. Reporte:	77 - 2019
Codificación:	RE, R15, R25	Tipo de Análisis:	Parcial
Aspecto:	No aplica	Muestra:	Sustratos
Color Visual:	No aplica	Fecha de Ingreso:	11 de septiembre de 2019
		Fecha de Reporte:	17 de septiembre de 2019

Parámetros Químicos	Unidad	Resultado			Método Aplicado
		RE	R15	R25	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/l	690	560	547	APHA 5210 B
Nitratos (NO <sub>3</sub> -N)	mg/l	120	12,7	10	HACH 8039



**Dra. Verónica Espinoza**  
TECNICO DE LABORATORIO

**ACU - CHEM**  
LABORATORIO DE ANALISIS  
FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS  
DE AGUAS  
IBARRA - ECUADOR

Dra. Verónica Espinoza  
0989753573

email: acu\_chem@hotmail.com  
Carlos Barabona Meru 1-107 y Eduardo Garzón Fonseca  
Ibarra - Ecuador

Misión:  
Brindar Asistencia Ágil, Personalizada, Eficaz y Efectiva en la Demanda Analítica de Aguas, Ofreciendo Tecnología de Punta y Responsabilidad al Servicio del Usuario.