

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

OPERACIÓN Y REDISEÑO DE  
UN BIODIGESTOR TUBULAR  
EXPERIMENTAL

OPERATION AND REDESIGN OF AN EXPERIMENTAL TUBULAR BIODIGESTOR

---

Fecha de recepción: 03-06-2022 | Fecha de aceptación: 18-09-2022

**Autora:**

**<sup>1</sup>Elizabeth Ines Miranda Condori**

<sup>1</sup> Investigadora Junior – Departamento de Procesos Industriales, Biotecnológicos y Ambientales – Carrera de Ingeniería Química – Facultad de Ciencias y Tecnología – Universidad Autónoma "Juan Misael Saracho".

Correspondencia del autor(es): [miranda.eimc@hotmail.es](mailto:miranda.eimc@hotmail.es)<sup>1</sup>, Tarija – Bolivia.

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo operar y rediseñar un biodigestor de polietileno tubular experimental escala laboratorio, y realizar el seguimiento respectivo a su funcionamiento, de manera que, se verifique si el producto obtenido cumple con normas medioambientales, y rediseñarlo para obtener un producto con coliformes fecales de 1000 NMP/100ml y demanda bioquímica de oxígeno DBO5 de 80 mg/l, que son los valores límites permisibles para descargas líquidas de acuerdo a la Ley del Medio Ambiente, Ley N° 1333 (edición 2016).

El biodigestor estudiado es un cilindro de polietileno con tuberías de entrada, salida de líquido y conducción de biogás alimentado por una mezcla de agua y estiércol vacuno de un pequeño establo en el Rancho. El mismo se construyó e instaló en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UAJMS con un volumen de 10,535 litros (volumen de líquido 70 % y el 30 % de biogás).

Se realizó la carga diaria al biodigestor y toma de datos durante un tiempo de 115 días, y el biogás producido se ventó hacia afuera del Laboratorio y el biol obtenido tiene una concentración de coliformes fecales de  $2,4E+03$  NMP/100ml y DBO5 de 495 mg/l, en un tiempo igual a 52 días sin contar la etapa de acondicionamiento previa de 28 días.

Con los datos de coliformes fecales y DBO5 de la materia prima y del producto se obtuvo la cinética de variación de CF y de DBO5 con lo cual se rediseñó el biodigestor con un tiempo de retención mayor.

## ABSTRACT

The objective of the present work is to operate and redesign an experimental tubular polyethylene biodigester of laboratory scale, and to monitor its operation, so that, if the product obtained meets environmental standards, and redesign it to obtain a product with fecal coliforms Of 1000 NMP / 100ml and biochemical oxygen demand BOD5 of 80 mg / l, which are the permissible limits for liquid discharges according to the Law of the Environment, Law No. 1333 (edition 2016). The biodigester studied is a polyethylene cylinder with inflow, liquid outlet and biogas pipelines fed by a mixture of water and cattle manure from a small stable in the ranch. It was built and installed in the Unit Operations Laboratory of the UAJMS with a volume of 10,535 liters (liquid volume 70% and 30% of biogas). The daily load was carried out on the biodigester and data was collected during a period of 115 days, and the biogas produced was vented out of the Laboratory and the biol obtained had a concentration of fecal coliforms of  $2.4E + 03$  NMP / 100ml and BOD5 of 495 mg / l, in a time equal to 52 days without counting the pre-conditioning stage of 28 days. With the fecal coliform and BOD5 data of the raw material and the product, the kinetics of CF and BOD5 variation were obtained, which redesigned the biodigester with a longer retention time.

**Palabras Claves:** Biodigestor, coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno, biol, biogás, cinética, anaerobio.

**Keywords:** Biodigestor, fecal coliforms, biochemical oxygen demand, biol, biogas, kinetics, anaerobic.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los biodigestores son reactores de flujo pistón, que son reactores que trabaja en estado estacionario y en donde la composición del fluido varía de un punto a otro a través de la dirección del flujo de dicho fluido. Para ello, se supone un flujo ideal de pistón, de modo, que la conversión sea función de la posición y las reacciones internas se basan en el proceso de digestión anaerobia que es la degradación de la materia orgánica realizada por bacterias anaerobias. Se utiliza con diferentes fines ya sea obtención de combustible (biogás), fertilizante (biol, biosol) o tratamiento de residuos como los domésticos y agrícolas (Quipuzco Ushñahua, Baldeón Quispe, & Tang Cruz, 2011).

A lo largo de la historia los países que más la han desarrollado son Alemania, China e India por ejemplo en India se ha utilizado en el 1900 el biogás en un motor, en el 1923 se ha distribuido biogás por la red pública y entre China e India ya para el 1986 se tenían más de 7,5 millones de biodigestores construidos y operando en el sector campesino (Taylhardat, 1986).

En Bolivia esta tecnología no es muy difundida, pero existen proyectos a cargo de instituciones como la Cooperación Alemana (GIZ, GTZ), Hivos, CIMNE (UMSA) siendo la mayoría de los biodigestores de polietileno tubular por su bajo costo y fácil operación (Martí Herrero, 2008).

La crianza de animales en el departamento como chanchos, vacas y pollos generan focos de contaminación ya que no hay tratamiento para los desechos pues la cantidad de heces vertidas es importante aún y más cuando se trata de gran número de animales.

Por lo que la tecnología de los biodigestores es una alternativa para el tratamiento de estos desechos.

En el 2014 se ha instalado un biodigestor de polietileno tubular (trabajo conjunto RASP, Hivos y UA-JMS), el primero en su tipo la finca Huayrihuana (comunidad Barrientos, provincia José María Avilés del departamento de Tarija); en tal sentido se hace

necesario un estudio propio que respalde esta tecnología de manera que se adecúe a las necesidades y requerimientos de otras fincas para su implementación.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados para la construcción del biodigestor (Figura 2) fueron:

- ⊕ Polietileno transparente de 250 y 200  $\mu\text{m}$ .
- ⊕ Poxipol, sellarrosas de tubería, cinta adhesiva fuerte.
- ⊕ Tubería de PVC de  $\frac{1}{2}$ , 1 y 2 in.
- ⊕ Bridas de  $\frac{3}{4}$  in, de  $\frac{1}{2}$  in y accesorios de tubería como niples, cupla unión universal, T.
- ⊕ 2 Botellas de soda de dos litros.
- ⊕ 5 láminas de Plastroformo.
- ⊕ Válvula metálica de  $\frac{1}{2}$  in, 2 de PVC de  $\frac{1}{2}$  in y 1 de PVC de  $\frac{3}{4}$  in.
- ⊕ Liga de neumático, alambre de amarre.
- ⊕ Virulana, cinta teflón, papel aluminio.
- ⊕ Foco de 100 Watt, dos enchufes, dos sockets, cable.
- ⊕ Trupan, palos de madera.

Para la construcción del biodigestor tubular experimental se siguieron los siguientes pasos:

- ⊕ Se cortó polietileno doble de 120 cm de largo y 57 cm de ancho.
- ⊕ Se puso la brida de  $\frac{1}{2}$  in en el centro a unos 60 cm de un lado y 15 cm del otro
- ⊕ Se formó un cilindro de 120 cm de largo uniendo el polietileno con poxipol aplicado a lo largo en un ancho de 8 cm, sella roscas de tubería en posibles orificios y cinta adhesiva fuerte por dentro y por

fuera, el poxipol.

- ⊕ Se colocaron los aros de aluminio a unos 30 cm de los extremos del cilindro.
- ⊕ Se procedió con las tuberías de entrada y salida colocadas 10 cm por dentro del polietileno asegurando con liga de neumático por encima.
- ⊕ En la salida se colocó una reducción de 1 in a ¾ in para colocar la válvula de salida.
- ⊕ La conducción de biogás para ventearlo hacia afuera del laboratorio se instaló con tubería de ½ in tal como se muestra en la siguiente fotografía (Figura 1).



Figura 1. Conducción de biogás.

Fuente: Elaboración propia.

- ⊕ Se armó una caja de plastroformo del tamaño adecuado al biodigestor con poxipol y cinta adhesiva.
- ⊕ Se colocaron focos por encima del biodigestor y se cubrió todo con polietileno.

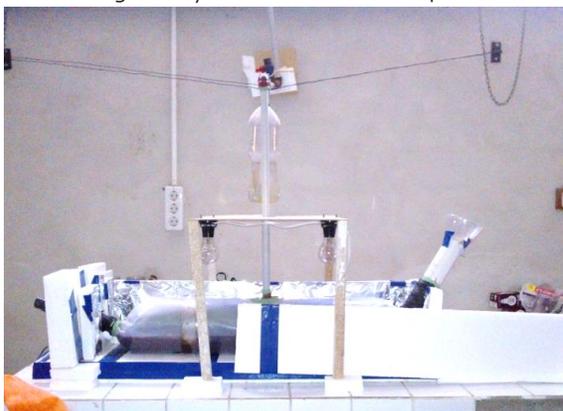


Figura 2. Biodigestor de polietileno tubular experimental.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.1. MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada para el proceso de digestión anaerobia en el biodigestor fue una mezcla de agua y estiércol vacuno en una proporción de 4:1 respectivamente.

## 2.2. CARACTERÍSTICAS DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL

Diseño inicial: se diseñó con las siguientes características:

$$\begin{aligned}
 L &= 78,30 \text{ cm} & E &= 215 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \\
 D &= 15,65 \text{ cm} & E_a &= 172 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \\
 V &= 15,0619 \text{ l} & E_e &= 43 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \\
 V_L &= 10,5433 \text{ l} & \text{Relación agua: estiércol} &= 4:1 \\
 V_G &= 4,5186 \text{ l} & C_2 &= 3,4 \% \\
 t &= 49 \text{ día}
 \end{aligned}$$

A continuación se describe la operación del biodigestor:

**Puesta en marcha:** una vez construido el equipo se hizo prueba hidráulica llenándolo hasta su volumen de operación con agua por tres días para descartar fugas. Se nivelaron tuberías de entrada y salida.

**Recolección de muestra de estiércol:** para la operación del biodigestor se recogió estiércol vacuno de El Rancho una vez a la semana por las mañanas.

**Primera carga:** se prepara la mezcla de alimentación al biodigestor con un volumen de 3,87 l, de manera que las tuberías queden sumergidas (Figura 3).

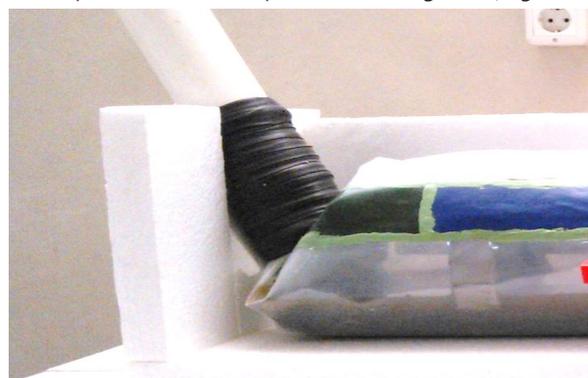


Figura 3. Primera carga al biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.

**Operación diaria:** se preparó los 215 ml de mezcla agitando constantemente, y antes de la carga se midieron los parámetros de control temperatura y pH de la mezcla y del agua (Figura 4).



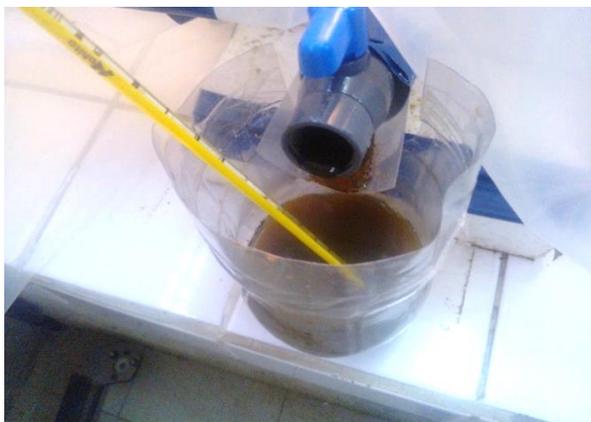
**Figura 4. Carga diaria al biodigestor.**  
Fuente: Elaboración propia.

Se tomaron las muestras respectivas para el análisis de coliformes fecales, DBO5, Sólidos totales, Sólidos volátiles, N, P y K total; estos análisis se realizaron en el CEANID.

Medición de parámetros en el estiércol: se midió la humedad del estiércol en una balanza de humedad y la densidad se midió indirectamente por desplazamiento de volumen, esto se realizó una vez por semana

**Medición de parámetros en el biol:**

Posterior a la carga y desde el día 24 el biodigestor empezó a producir biol (Figura 5), el mismo se recibió, midió volumen y los demás parámetros de control como temperatura, densidad, pH con la respectiva frecuencia.



**Figura 5. Producción del biol.**  
Fuente: Elaboración propia.

Se tomaron las muestras para los respectivos análisis en el CEANID de coliformes fecales, DBO5, Sólidos totales, Sólidos volátiles, N, P y K total.

**Condiciones de operación:** se midió la temperatura ambiente, temperatura en la entrada y en la salida del biodigestor.

La operación del biodigestor y el seguimiento con la medición de parámetros de control y toma de muestras para análisis se realizó en un tiempo total de 115 días. Esto se realizó de lunes a sábado por las mañanas.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones de operación determinadas a través del promedio de todas las mediciones realizadas son: la temperatura ambiente, la temperatura en la entrada del biodigestor, temperatura en la salida y la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del biodigestor. Las mismas se muestran en la Tabla 1.

CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR				
	Tamb (°C)	Tent (°C)	Tsal (°C)	ΔT (°C)
PROMEDIO	21,5	22,7	33,3	10,6
MINIMO	11,8	19,2	25,0	5,8
MÁXIMO	26,0	26,7	36,5	9,8

**Tabla 1. Condiciones de operación del biodigestor de polietileno tubular.**

Fuente: Elaboración propia. 2016

De manera que el biodigestor opera a una temperatura que es el promedio entre la temperatura en la entrada y la temperatura en la salida:

$$T_{BDG} = \frac{22,7 + 33,3}{2} \text{ °C} = 28 \text{ °C}$$

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Las propiedades de las materias primas se han determinado a través del promedio de las mediciones realizadas durante el tiempo de retención estudiado.

En el estiércol las propiedades fisicoquímicas que se han determinado son la humedad y la densidad esto se muestra en la Tabla 2:

PROPIEDADES DEL ESTIÉRCOL VACUNO		
	$P_e$	$Hm_e$
PROMEDIO	0,9728	83,80
MÍNIMO	0,9597	81,38
MÁXIMO	0,9879	85,85

**Tabla 2. Propiedades del estiércol vacuno.**

Fuente: Elaboración propia. 2016

Se determinaron además la temperatura y el pH del agua utilizada para mezclar con el estiércol y preparar la mezcla de entrada al biodigestor. Los resultados se muestran en la Tabla 3:

PROPIEDADES DEL AGUA		
	Ta	pH
PROMEDIO	21,9	7,76
MÍNIMO	15,0	6,75
MÁXIMO	25,0	8,68

**Tabla 3. Propiedades del agua.**

Fuente: Elaboración propia. 2016

El estiércol preparado es un líquido con alto contenido de sólidos que se ven a simple vista en un vaso, pues sedimentan con rapidez, tiene el olor característico del estiércol vacuno. Y color marrón oscuro igual al del estiércol.

Las propiedades determinadas de la mezcla de entrada al biodigestor son la temperatura y el pH justo antes de realizar la carga respectiva. Estos resultados se muestran en las Tabla 4 y Tabla 5 además de los valores mínimo, máximo, la mediana, la moda y la varianza

ESTIÉRCOL PREPARADO						
	T	pH	ST (mg/l)	SV (mg/l)	CF (NM-P/100ml)	DBO5 (mg/l)
PROMEDIO	22,0	7,81	23493,75	8089,85	4,43E+09	5252
MÍNIMO	15,2	6,93	15951	2486	2,10E+06	3525
MÁXIMO	25,2	8,30	30149	14669	1,10E+10	7504
MEDIANA	22,8	7,84	2,39E+04	7,60E+03	3,35E+09	4,99E+03
MODA	21	7,95	-	-	-	-
VARIANZA MUESTRAL	4,2493	0,0585	34976906	33309287	2,23E+19	2979088,7

**Tabla 4. Propiedades del estiércol preparado.**

Fuente: Elaboración propia. 2016.

P (mg/l)	N (mg/l)	K (mg/l)
113	547,8	484,6

Tabla 5. Propiedades del estiércol preparado: N, P y K total.

Fuente: Elaboración propia. 2016

### 3.3. CARACTERIZACIÓN DEL BIOL

El biol tiene baja concentración de sólidos pues a la vista se ve como un líquido homogéneo, su color peculiar puede ser igual o más claro que el estiércol preparado y no tiene el olor característico del estiércol y no es desagradable.

En el biol se han determinado las siguientes propiedades fisicoquímicas: temperatura, pH y densidad; las mismas se muestran en la Tabla 6 y también el volumen promedio de biol producido. Además de los valores mínimo, máximo, la mediana y la varianza de las propiedades fisicoquímicas.

BIOL				
	V (ml)	T (°C)	pH	p(g/ml)
PROMEDIO	100	32,9	6,95	0,9748
MÍNIMO	5	23	6,62	0,9572
MÁXIMO	300	38,5	7,18	0,9867
MEDIANA	100	33,2	6,935	0,9759
VARIANZA MUESTRAL	50	10,8094	0,0150	0,0001

Tabla 6. Propiedades del biol: V, T, pH y p

Fuente: Elaboración propia.

CF (NM-P/100ml)	DBO5 (mg/l)	ST (mg/l)	SV (mg/l)
2,40E+03	472	3520	2630

Tabla 7. Propiedades del biol: CF, DBO5, ST, SV, N, P y K total.

Fuente: Elaboración propia.

CF (NM-P/100ml)	P (mg/l)	N (mg/l)	K (mg/l)
2,40E+03	24,9	187	255

Tabla 8. Propiedades del biol: N, P y K.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, COLIFORMES FECALES, SÓLIDOS TOTALES Y SÓLIDOS VOLÁTILES

Siendo los valores iniciales de estiércol preparado y los valores finales del biol indicados en las tablas "Tabla 9" y "Tabla 10":

MUESTRA	CF (NM-P/100ml)	DBO5 (mg/l)
ESTIÉRCOL PREPARADO	4,43E+09	5252
BIOL	2,10E+05	472

Tabla 9. Coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno del estiércol preparado y del biol

Fuente: Elaboración propia. 2016.

MUESTRA	ST (mg/l)	SV (mg/l)
ESTIÉRCOL PREPARADO	23493,75	8089,85
BIOL	3520	2630

Tabla 10. Sólidos totales y sólidos volátiles del estiércol preparado y del biol

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Para el cálculo de la eficiencia de remoción se utilizó la siguiente fórmula para cada caso:

$$\% \eta = \frac{\text{valor inicial} - \text{valor final}}{\text{valor inicial}} \times 100$$

Obteniéndose así los resultados indicados en la Tabla 11:

	Coliformes Fecales, CF	Demanda bioquímica de oxígeno, DBO5	Sólidos totales, ST	Sólidos volátiles, SV
%n	99,9953	91,0129	85,0173	67,4901

**Tabla 11. Eficiencia de remoción de Coliformes fecales, DBO5, Sólidos totales y Sólidos volátiles.**

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Eficiencia de remoción del contenido de Nitrógeno, Fósforo y Potasio total.

De la misma forma se determinó la eficiencia de remoción del nitrógeno, fósforo y potasio total, los resultados se muestran en la Tabla 12.

	P (mg/l)	N (mg/l)	K (mg/l)
ESTIÉRCOL PREPARADO	113	547,8	484,6
BIOL	24,9	187	255
%	77,9646	65,8635	47,3793

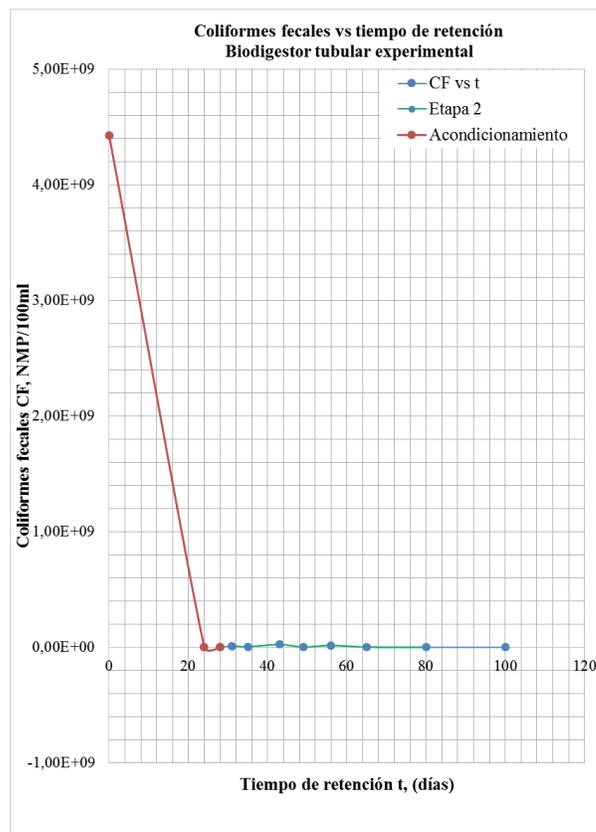
**Tabla 12. Eficiencia de remoción de Nitrógeno, Fósforo y Potasio Total.**

Fuente: Elaboración propia. 2016.

### 3.5. CINÉTICA DE LA VARIACIÓN DE COLIFORMES FECALES.

En la operación del biodigestor experimental se ha visto que la concentración de coliformes fecales del producto líquido tuvo una disminución rápida a un inicio, y luego de volver a subir, disminuyó lentamente (Figura 6).

De manera que se diferencian dos etapas en el proceso para la variación de los coliformes fecales: la primera de disminución rápida, denominada etapa de acondicionamiento, y la segunda etapa con una disminución lenta.



**Figura 6. Gráfica de Coliformes fecales CF en función del tiempo de retención t.**

Fuente: Elaboración propia. 2016.

De manera que, para describir la variación de coliformes fecales durante el proceso de descomposición en el biodigestor experimental, se calcula dos cinéticas: una para la etapa de acondicionamiento y otra para la segunda etapa de disminución lenta.

**Primera etapa: de acondicionamiento**, comprende 28 días se tienen tres datos obtenidos de los análisis que se grafican en la Figura 7:

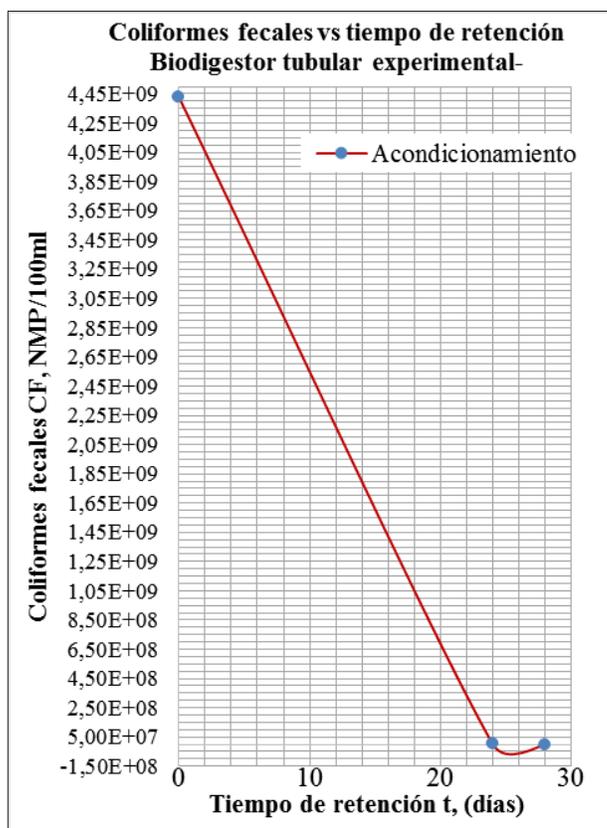


Figura 7. Coliformes fecales CF en función del tiempo de retención t – Primera etapa.

Fuente: Elaboración propia. 2016.

El cálculo de la cinética se realizó mediante el método numérico de los tres punto para lo cual se hace un ajuste gráfico de la curva para leer datos de manera que se tenga intervalos constantes entre cada valor del eje de tiempo de retención.

Se calcularon las pendientes medias en cada punto con el método de los tres puntos, y luego el logaritmo natural de la concentración de coliformes fecales y de la pendiente media. Estos valores se muestran en la Tabla 13:

$\ln(CF)$	$\ln(-d(CF)/dt)$
22,210655	19,421577
21,947041	19,298165
21,639557	19,160638
21,266881	18,993698
20,787804	18,834904
20,009916	18,604737
19,198986	17,930469
7,9373747	17,679138

Tabla 13. Logaritmo natural de CF y la pendiente media- Primera etapa.

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se graficaron estos valores, se hizo una regresión lineal y se obtuvo la ecuación de la recta, que por analogía la siguiente ecuación:

$$\ln\left(-\frac{dCF}{dt}\right) = \ln k + n \ln(CF)$$

Se determinaron las constantes k y n, siendo la ecuación cinética para la variación de los coliformes fecales de la primera etapa:

$$(-r_{CF}) = 751,3164992(CF)^{0,109348}$$

La cual está en función de la concentración de coliformes fecales.

**Segunda etapa:** comprende 49 días se tienen siete datos obtenidos de los análisis ya que el último se desprecia por aumentar nuevamente.

En esta etapa se ha visto que los derrames ocurridos durante la operación del biodigestor afectaron el producto aumentando la concentración de coliformes fecales CF, esto se puede ver en la Figura 8 donde se ven claramente los picos en los días 12 y 25.

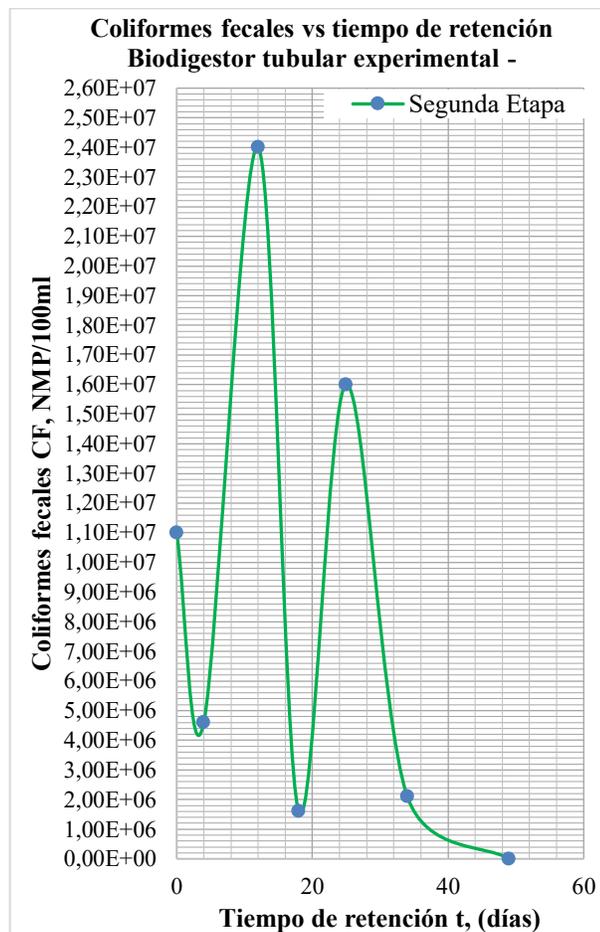


Figura 8. Coliformes fecales vs tiempo de retención - Segunda etapa.

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se calcularon las pendientes medias en cada punto con el método de los tres puntos, y luego el logaritmo natural de la concentración de coliformes fecales y de la pendiente media. Estos valores se muestran en la Tabla 14:

ln(CF)	ln(-d(CF)/dt)
16,213406	14,235747
15,050255	12,993921
14,539429	11,837852
14,087444	11,266065
13,607871	10,934912
13,057825	10,617618
12,206073	10,409498
7,783224	10,049596

Tabla 14. Logaritmo natural de CF y la pendiente media - Segunda etapa.

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se graficaron estos valores, se hizo una regresión lineal y se obtuvo la ecuación de la recta, que por analogía se determinaron las constantes k y n, siendo la ecuación cinética para la variación de los coliformes fecales de la primera etapa:

$$(-r_{CF}) = 291,132357(CF)^{0,440703}$$

La cual está en función de la concentración de coliformes fecales.

### 3.6. Cinética de la variación de la demanda bioquímica de oxígeno.

Los valores obtenidos de DBO5 hasta el día 80 disminuyeron de forma uniforme (Figura 9) y a diferencia de los coliformes fecales no se aprecian dos etapas. Lo cual indica que, si bien los CF y la DBO5 disminuyen, no lo hacen con la misma tendencia ni en la misma proporción.

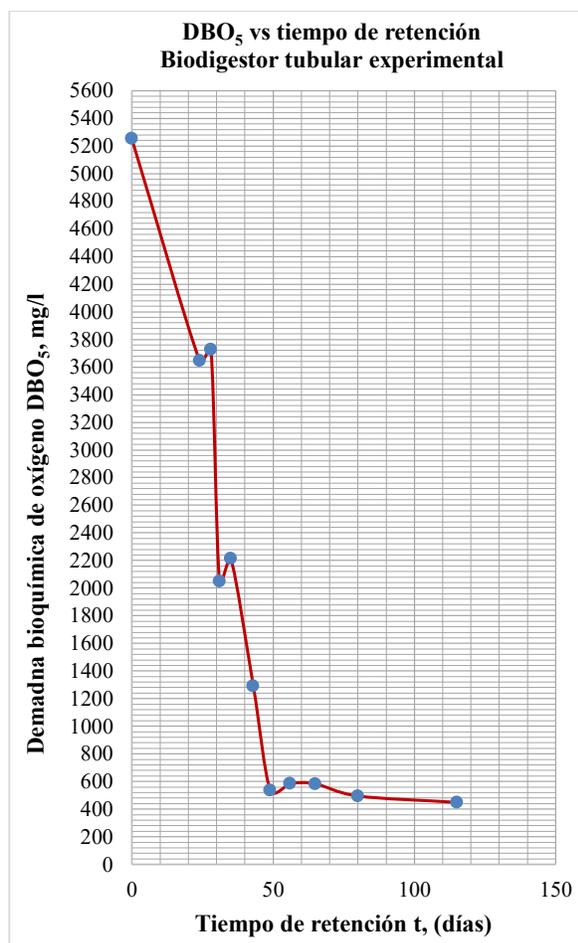


Figura 9. Demanda bioquímica de oxígeno DBO5 en función del tiempo de retención t.

Fuente: Elaboración propia. 2016.

De igual manera se calculó la cinética se realizó mediante el método numérico de los tres puntos para lo cual se hace un ajuste gráfico de la curva anterior para leer datos de manera que se tenga intervalos constantes entre cada valor del eje de tiempo de retención.

Se calcularon las pendientes medias en cada punto con el método de los tres puntos, y luego el ln de la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno y de la pendiente media. Estos valores se muestran en la Tabla 15:

ln(DBO5)	ln(-d(DBO5)/dt)
8,566364	4,973188
8,343541	4,739367
8,121949	4,554661
7,877257	4,475441
7,592870	4,257523
7,313922	4,032190
6,984859	3,744455
6,713984	3,290857
6,442050	2,922869
6,269679	1,992539

Tabla 15. Logaritmo natural de DBO5 y la pendiente media.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Se graficaron estos valores, se hizo una regresión lineal y se obtuvo la ecuación de la recta, que por analogía se determinaron las constantes k y n, siendo la ecuación cinética para la variación de la demanda bioquímica de oxígeno:

La cual está en función de la demanda bioquímica de oxígeno:

$$(-r_{DBO_5}) = 0,014787(DBO_5)^{1,092912}$$

### 3.7. REDISEÑO DEL BIODIGESTOR EXPERIMENTAL

#### 3.7.1. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN

El biodigestor experimental corresponde a un reactor de flujo pistón en fase líquida debido a que la cantidad de coliformes fecales varía a lo largo del biodigestor desde la entrada hasta la salida (Figura 10).

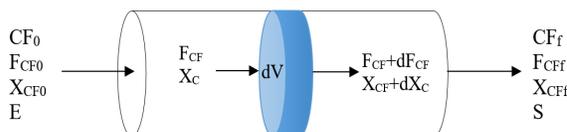


Figura 10. Esquema biodigestor experimental como un reactor de flujo pistón.

Fuente: Elaboración propia. 2016.

Se realiza el balance de materia que resulta en la siguiente ecuación:

$$F_{CF0}dX_{CF} = (-r_{CF})dV$$

Con el balance de materia, la cinética de variación de coliformes fecales (segunda etapa) y tomando como límite el valor permisible de 100 NMP/100ml de CF se calculó el tiempo de retención dando como resultado 53 días. De igual manera se hizo el cálculo en función de la DBO5 dando como resultado 156 días; al ser este último tiempo muy extenso que podría atribuirse a los incidentes suscitados durante la operación del biodigestor se elige el tiempo de retención de 53 días.

El volumen recalculado para un mismo caudal diario de 215 ml es de 16,30 litros.

## 4. DISCUSIÓN

Se logró realizar un seguimiento a la operación del biodigestor en un tiempo total de 115 días.

El biodigestor opera a una temperatura ambiente media de 21,5 °C siendo el promedio entre la temperatura en la entrada y salida del biodigestor de 28 °C la cual es una temperatura termófila.

Se han determinado las propiedades de la materia prima tanto del agua como del estiércol y la mezcla alimentada al biodigestor. La densidad del estiércol es 0,9728 y la humedad de 83,8 %L.

El estiércol preparado tiene 4,43+09 NMP/100ml de CF y 5252 mg/l de DBO5.

Se caracterizó el biol, éste tiene 2,40 E+03 NMP/100ml y 472 de DBO5 y no cumple con la ley del medio ambiente por lo que se tiene que diluir al 15 % para cumplir con la ley del medio ambiente.

Se logró una remoción importante del coliformes fecales, DBO5, ST y SV alcanzándose 99,99 %, 91,01 %, 85,02 % y 67,5 % respectivamente.

Se logró determinar la cinética de variación de los coliformes fecales y de la demanda bioquímica de oxígeno y se rediseñó el biodigestor dando un tiempo de retención de 53 días al que se debe sumar la primera etapa de acondicionamiento hasta que el biodigestor alcance su volumen líquido de operación.

Con este rediseño se obtendría un producto con 100 NMP/100ml de CF y 489,5527 mg/l de DBO5. Debido a que no se pudo cumplir con el límite de DBO5 se recomienda una dilución mínima de 15 %, un tratamiento posterior entre los que podrían ser un biodigestor en serie, calor, procesos foto catalíticos.

Se debe realizar un mantenimiento continuo de manera que se eviten posibles problemas como fugas o derrames.

Es importante tomar medidas de seguridad en cuanto a la operación, guantes, barbijo y la limpieza después de la operación del biodigestor siendo esto importante para evitar posibles enfermedades por contacto con estiércol.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- ◻ Campos, V. M. (2010). Análisis de los resultados de un diseño factorial. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- ◻ Durán, D., & Lara, A. (1994). Convivir en la tierra. Buenos Aires.
- ◻ Ferrero, J. M. (1974). Depuración Biológica del agua.
- ◻ Guevara Vera, A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- ◻ Hilbert, J. A. (2011). Manual para la Producción de Biogás. Argentina.
- ◻ Lara, E., & Hidalgo, M. B. (2011). Diseño de un Biorreactor y Conducción del biogás generado por las excretas de ganado vacuno, estación TUNSHI-ESPOCH. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Facultad de Ciencias.
- ◻ Levenspiel, O. (1987). Ingeniería de las reacciones químicas. México, D. F., México: Ediciones REPLA, S. A.
- ◻ Márquez, K. (2005). Estudio del tratamiento de lodos provenientes de pisciculturas mediante un sistema de digestión anaerobio. Temuco: Universidad Católica de Temuco.
- ◻ Martí Herrero, J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. La Paz.
- ◻ Martí Herrero, J., Acosta Bedoya, F., & Gonzales, L. (2013). Plan Nacional de Biodigestores de Bolivia. La Paz: Hivos. SNV. Soluciones Prácticas. CIMNE.
- ◻ Martí, J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. La Paz.
- ◻ Mejía Sánchez, G. M. (1996). Digestión anaerobia. Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán.
- ◻ Moreno, J. (1988). Diseño y construcción de un almacenador de biogás en concreto armado y formulación del programa de computación para el cálculo geométrico de digestores chinos. Maracay: Tesis de Grado, Facultad de Agronomía U. C. V.
- ◻ Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. (27 de Abril de 2014). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Obtenido de [http://www.rlc.fao.org/fileadmin/content/events/taller\\_tcp-par-3303/Biodigestor.ppt](http://www.rlc.fao.org/fileadmin/content/events/taller_tcp-par-3303/Biodigestor.ppt)
- ◻ Quipuzco Ushñahua, L., Baldeón Quispe, W., & Tang Cruz, O. (2011). Evaluación de la calidad de biogás mezclas de estiércol de vaca en biol de PVC. RIIGEO, 100-104.
- ◻ Roos, K. F., Martin, J. B., & Moser, M. A. (2004). A manual for developing Biogas Systems at Commercial Farms in the United States.
- ◻ Rueda Salgado, P. D. (Mayo de 2013). Estudio de prefactibilidad para el manejo de los desechos orgánicos del Galápagos Science Center. Tesis de grado. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito. Colegio de Ciencias e Ingeniería.

- 🔖 Tayhaldart, L. (1986). El Biogás. Fundamentos e infraestructura rural. Maracay: Instituto de Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía U. C. V.
- 🔖 Viquez Arias, J. A. (2010). Generación eléctrica con biogás. ECAG Informa, 13-19.
- 🔖 ZORG BIOGÁS. (2 de Abril de 2007). ZORG BIOGÁS. Obtenido de <http://www.zorg-biogas.com/biogas-plants/biogas-out?lang=es>
- 🔖 Veen, M., Martí Herrero, J., Acosta Bedoya, F., & Ameller Terrazas, G. (2012). EStudio de factibilidad para un programa nacional de biogás doméstico en Bolivia. La Paz: SNV, Soluciones Prácticas y CIMNE.