

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Optimización en la operación de un biodigestor a escala piloto y  
caracterización de productos y materia prima**

**Gabriel Abelardo Proaño Herrera**

Tesis de grado presentada como requisito para  
la obtención del título de Ingeniero Químico

Quito

Enero 2011

**Universidad San Francisco de Quito**  
**Colegio de Ciencias e Ingeniería, El Politécnico**  
**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

Optimización en la operación de un biodigestor a escala piloto y caracterización de  
productos y materia prima

**Gabriel Abelardo Proaño Herrera**

Daniela Gertrud Almeida Streitwieser, Dr.-Ing.

Directora de Tesis

---

Diego Gangotena Gonzáles, M.Sc.

Miembro del Comité de Tesis

---

Ing. Gustavo Muñoz Rivadeneira, Ph.D.

Miembro del Comité de Tesis

---

Fernando Romo M.Sc.

Decano de El Politécnico

---

Quito, enero 2011

© Derechos de Autor  
Gabriel Abelardo Proaño Herrera  
2011

### **Agradecimientos**

Al Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas (LaDEA) del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad San Francisco de Quito, el cual cuenta con un gran número de personas que en su afán de innovar, desarrollar y difundir formas de energía tecnológica y socialmente adecuadas, han brindado sus conocimientos y mano de obra para la realización y funcionamiento de las mismas.

A la Dr.- Ing. Daniela Almeida, directora y pilar fundamental de LaDEA, que con su conocimiento y emprendimiento permitió que la realización de este proyecto se haga posible, además de la continua ayuda y dirección a lo largo del proyecto, deseo manifestar mi más sincero agradecimiento.

A Carlos Fabara, M.Sc., Director del Departamento de Química e Ingeniería Química, por la guía y los conocimientos impartidos a lo largo de toda la carrera.

A los miembros del Comité de Tesis: Diego Gangotena Gonzáles M.Sc., e Ing. Gustavo Muñoz Rivadeneira, Ph.D.; y a todos los profesores en general, ya que gracias a su tiempo, esfuerzo y dedicación podemos alcanzar metas y desarrollarnos en el ámbito académico.

Un agradecimiento muy especial al Sr. Sixto Guandinango, por su paciencia y predisposición en la solución de problemas en planta.

A todos mis amigos y compañeros que me apoyaron y me brindaron su amistad a lo largo de todo este tiempo.

Finalmente un gran agradecimiento a mi familia por el apoyo, la comprensión, el cariño y el amor que me han brindado; por los valores y por los conocimientos impartidos los cuales me permiten crecer cada día como persona.

## Resumen

En este proyecto de tesis se estudian las condiciones de operación bajo las cuales un proceso de digestión anaeróbica de desechos orgánicos animales y vegetales, en rango mesofílico, presentan la máxima productividad y calidad en cuanto a la obtención de biogás y fertilizante orgánico (biol). Inicialmente se tiene ya un proceso de operación, en el cual variables como temperatura, proporciones de mezcla entre materia orgánica animal y vegetal, agitación y pH se encuentran establecidos y deben mantenerse dentro de rangos específicos y lo más constantes posibles, por lo que se tiene principal interés en la carga orgánica que se realiza al proceso, ya que gracias a la misma se podrá incrementar tanto la producción de biogás como de fertilizante orgánico (biol) y reducir los tiempos de residencia. El incremento en la carga orgánica o volúmenes de alimentación realizados hacia el biodigestor van acompañados de un estricto y constante monitoreo de todas y cada una de las variables del proceso. Pruebas como la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (TS), sólidos totales orgánicos (oTS), alcalinidad, ácidos grasos volátiles, producción y composición de biogás, pH, microbiología, entre otras, permiten conocer el estado en el que se encuentra el proceso y la calidad de los productos obtenidos del mismo.

Al operar y controlar de manera rigurosa todas y cada una de las etapas del proceso, se puede observar tendencias y comportamientos que indican los rangos de operación más adecuados, bajo los cuales el proceso de biodigestión anaeróbica de la planta piloto presentará un máximo de beneficios en cuanto a productos y el estado de los mismos.

Finalmente, en el proceso de biodigestión anaeróbica llevado a cabo en la planta piloto de LaDEA se llegó a una producción máxima de 971 litros de biogás por día con 400 litros de volumen de reactor y una carga orgánica de  $1.80 \text{ kgDQO}_{\text{Alim.}} / \text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ d}$ . El volumen de alimentación de materia orgánica óptimo es de 27 L/d con tiempos de residencia de 15 días.

### Abstract

This thesis project studies the operation conditions under which an anaerobic digestion process of organic animal and vegetable wastes in mesophilic range, represent the maximum production and quality of biogas and organic fertilizer. Initially, we already have an operating process in which variables like temperature, mixing proportions between animal and vegetable organic matter, agitation and pH are already established and have to be maintained under specific ranges and at constant values. For these reasons, the main interest lies in the organic charge fed to the process, being this variable the one that determines the best production of biogas and organic fertilizer, and also the reduction of residence times. The increasing organic load or feed volumes introduced to the biodigester are monitored along with every one of the process variables. Analytical tests like chemical oxygen demand (DQO), total solids (TS), organic total solids (oTS), alkalinity, volatile acids, gas tests, pH, microbiology, among others, provide the necessary information to know the conditions of the process and the quality of the products.

Thus, by controlling and operating rigorously each and every one of the process stages the trends and behavior that establishes the optimal operating conditions under which the anaerobic biodigestion process of the pilot plant work, can be obtained.

The anaerobic biodigestion process taken place in the LaDEA pilot plant shows a maximum biogas production of 971 liters of biogas per day for a 400 liters reactor volume, and an organic charge of  $1.80 \text{ kgDQO}_{\text{Feed}} / \text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ d}$ . The optimal feed volume of organic matter is 27 L/d at a residence time of 15 days.

## Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Antecedentes .....	1
1.2.	Justificación del Proyecto .....	2
1.3.	Objetivos .....	3
1.3.1.	Objetivos Principales .....	3
1.3.2.	Objetivos Específicos .....	3
2.	Fundamentos Teóricos.....	4
2.1.	Optimización de Procesos .....	4
2.2.	Digestión Anaerobia .....	5
2.3.	Biodigestores de Filtro Anaeróbico .....	7
2.4.	Parámetros de Control en un Biodigestor .....	8
2.4.1.	Temperatura.....	8
2.4.2.	pH .....	9
2.4.3.	Tiempo de Retención Hidráulico.....	10
2.4.4.	Producción de Biogás .....	11
2.4.5.	Agitación y Mezcla.....	11
2.5.	Biogás .....	12
2.5.1.	Características del Biogás.....	12
2.5.2.	Adaptabilidad del Biogás en la Generación de Energía Eléctrica.....	14
2.6.	Fertilizante Orgánico o Bioabono (Biol) .....	15
2.6.1.	Características del Fertilizante Orgánico (Biol) .....	16
2.6.2.	Usos y Aplicación del Fertilizante Orgánico (Biol) .....	17
2.6.3.	Ventajas en el uso de Fertilizante Orgánico o Bioabono (Biol) .....	18
2.7.	Caracterización de la Materia Prima y Productos.....	19
2.7.1.	Sólidos Totales (TS) .....	19
2.7.2.	Sólidos Volátiles (oTS) .....	19
2.7.3.	Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	20
2.7.4.	Carga Orgánica Volumétrica (COV).....	21
2.7.5.	Nutrientes para el Crecimiento Bacteriano.....	21
2.7.6.	Alcalinidad .....	23
2.7.7.	Ácidos Grasos Volátiles (AGV) .....	24
3.	Métodos Experimentales .....	26

3.1.	Descripción de la Planta Piloto de Digestión Anaeróbica .....	26
3.2.	Descripción de la Operación del Biodigestor de Filtro Anaerobio.....	27
3.2.1.	Caracterización y Obtención de la Materia Prima.....	27
3.2.2.	Operación y Monitoreo de la Planta Piloto .....	28
3.2.3.	Procesamiento del Biogás.....	31
3.2.4.	Procesamiento del Fertilizante Orgánico.....	32
3.3.	Equipos y Maquinaria .....	34
3.3.1.	Pre tratamiento y Alimentación.....	34
3.3.2.	Reactor.....	37
3.3.3.	Tratamiento del Biogás.....	39
3.3.4.	Tratamiento del Fertilizante Orgánico (biol).....	41
3.3.5.	Equipos de Control .....	44
3.4.	Análisis Físico – Químicos .....	48
3.4.1.	Medición de pH .....	48
3.4.2.	Sólidos Totales .....	48
3.4.3.	Sólidos Totales Orgánicos .....	49
3.4.4.	Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	50
3.4.5.	Nitrógeno .....	50
3.4.6.	Alcalinidad .....	51
3.4.7.	Ácidos Grasos Volátiles (AGV) .....	51
3.4.8.	Coliformes Totales y Echerichia Coli (E. Coli) .....	52
3.4.9.	Propiedades Antimicóticas .....	53
3.4.10.	Prueba de Gas .....	54
4.	Resultados y Discusión.....	56
4.1.	Resultados obtenidos en la Optimización de la Planta Piloto.....	56
4.2.	Resultados de la Caracterización de la Mezcla Reactiva.....	69
4.3.	Interpretación y Evaluación de Resultados.....	74
4.4.	Caracterización y Mejoramiento del Fertilizante Orgánico (Biol) .....	80
4.5.	Caracterización del Biogás .....	89
4.6.	Balance de Masa de la Planta Piloto .....	92
5.	Conclusiones y Recomendaciones .....	94
6.	Bibliografía.....	97
7.	Anexos .....	100

## Índice de Figuras

Figura 2-1: Etapas de la fermentación bacteriana .....	6
Figura 2-2: Filtro anaeróbico de flujo ascendente .....	8
Figura 3-1: Diagrama de bloques del proceso de digestión anaeróbica .....	30
Figura 3-2: Tamiz para filtración.....	34
Figura 3-3: Trituradora de cuchillas .....	35
Figura 3-4: Tanque de mezcla y alimentación.....	36
Figura 3-5: Bomba de alimentación y recirculación .....	37
Figura 3-6: Reactor.....	38
Figura 3-7: Intercambiador de calor .....	39
Figura 3-8: Proceso de tratamiento de biogás .....	41
Figura 3-9: Estufa .....	42
Figura 3-10: Tanques de almacenamiento para biol.....	43
Figura 3-11: Bomba manual .....	44
Figura 3-12: Medidor de caudal .....	45
Figura 3-13: Intercambiador de calor. ....	46
Figura 4-1: Volumen de alimentación con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	57
Figura 4-2: Tiempo de residencia hidráulico con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	59
Figura 4-3: Carga orgánica diaria con respecto al tiempo de operación .....	60
Figura 4-4: Temperatura con respecto al tiempo de operación del biodigestor .....	61
Figura 4-5: Valores de pH con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	62
Figuras 4-6: Aditivo agregado al proceso con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	64
Figura 4-7: Producción diaria promedio de biogás .....	66
Figura 4-8: Sólidos totales de la mezcla reactiva con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	69
Figura 4-9: Sólidos orgánicos totales de la mezcla reactiva con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	70
Figura 4-10: DQO de la mezcla reactiva con respecto al tiempo de operación del biodigestor.....	72
Figura 4-11: Relación de oTS <sub>descargado</sub> con respecto a oTS <sub>alimentado</sub> .....	75

Figura 4-12: Relación entre producción de biogás y degradación con respecto al volumen de alimentación.....	76
Figura 4-13: Relación entre producción de biogás y pH con respecto al volumen de alimentación ingresado al proceso.....	77
Figura 4-14: Relación entre producción específica de biogás y $m^3$ biogás/ $m^3$ reactor con respecto al volumen de alimentación ingresado al proceso.....	78
Figura 4-15: Relación entre producción específica de biogás y $m^3$ biogás/ $m^3$ reactor con respecto a la carga orgánica del proceso.....	79
Figura 4-16: Resultados obtenidos con hongo de chirimoya: a) muestra original, b) medio de cultivo, c) medio de cultivo + biol diluido, d) medio de cultivo + biol concentrado.....	84
Figura 4-17: Resultados obtenidos con hongo de aguacate: a) muestra original, b) medio de cultivo, c) medio de cultivo + biol diluido, d) medio de cultivo + biol concentrado.....	85
Figura 4-18: Resultados obtenidos con hongo de maíz: a) muestra original, b) medio de cultivo, c) medio de cultivo + biol diluido, d) medio de cultivo + biol concentrado.....	86
Figura 4-19: Resultados obtenidos con hongo de frejol: a) muestra original, b) medio de cultivo, c) medio de cultivo + biol diluido, d) medio de cultivo + biol concentrado.....	87
Figura 4-20: Resultados obtenidos con hongo de papa: a) muestra original, b) medio de cultivo, c) medio de cultivo + biol diluido, d) medio de cultivo + biol concentrado.....	88
Figura 4-21: Prueba cualitativa para la determinación del estado del biogás .....	91

## Índice de Tablas

Tabla 2-1: Composición promedio del biogás.....	13
Tabla 2-2: Composición del biogás derivado de diversas fuentes.....	13
Tabla 2-3: Propiedades del biogás.....	14
Tabla 2-4: Implementación de 1m <sup>3</sup> de biogás y su duración.....	15
Tabla 2-5: Análisis químico del biol .....	17
Tabla 2-6: Relación carbono a nitrógeno de las materias primas empleadas comúnmente.....	23
Tabla 4-1: Resultados obtenidos en análisis de alcalinidad y ácidos grasos volátiles .....	73
Tabla 4-2. Análisis físico-químico del biol .....	80
Tabla 4-3: Caracterización microbiológica del biol (Coliformes Totales).....	81
Tabla 4-4: Caracterización microbiológica del biol (Echerichia Coli).....	81
Tabla 4-5: Efecto de la concentración de los cationes sobre la digestión anaeróbica .....	82
Tabla 4-6: Comparación de los diferentes agentes de absorción.....	89
Tabla 4-7: Composición del biogás obtenido en el proceso de biodigestión .....	90
Tabla 4-8: Balance de masa.....	93

## Nomenclatura

$AGV$	Ácidos grasos volátiles	[mg AGV/L]
$COV$	Carga orgánica volumétrica	[kg DQO/m <sup>3</sup> <sub>reactor</sub> día]
$\dot{V}$	Caudal volumétrico diario de alimentación	[m <sup>3</sup> / d]
$DQO$	Demanda química de oxígeno	[mg/L]
$\rho$	Densidad de la muestra	[g/L]
$m_2$	Masa de la muestra calcinada	[g]
$m_0$	Masa de la muestra inicial	[g]
$m_1$	Masa de la muestra seca	[g]
$N$	Normalidad de hidróxido de sodio	[eq. <sub>soluto</sub> / L <sub>solución</sub> ]
$TS$	Sólidos totales	[g/L]
$oTS$	Sólidos totales orgánicos	[g/L]
$\tau$	Tiempo de retención hidráulico	[días]
$V_{NaOH}$	Volumen de hidróxido de sodio	[mL]
$V_{muestra}$	Volumen de muestra	[mL]
$V$	Volumen del digestor	[m <sup>3</sup> ]

## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

El agotamiento de reservas naturales, realizado a lo largo de muchos años por el hombre, enfrenta a la humanidad a una serie de desafíos que aumentan a ritmo creciente y que requieren de soluciones prácticas, innovadoras e inmediatas. El petróleo, claro ejemplo de la excesiva explotación de un recurso natural, el cual representa la principal fuente de energía en la actualidad, así como también uno de los principales contaminantes ambientales; desaparecerá casi en su totalidad en los próximos 100 años [1].

Estas razones obligan a las personas y a las industrias, en general, a encontrar nuevas tecnologías las cuales no solamente cubran los requerimientos energéticos a futuro, sino que también sean tecnologías socialmente, económicamente y ambientalmente adecuadas. Es decir, tecnologías ecológicamente amigables, que satisfagan necesidades y contribuyan al mejoramiento de las condiciones de vida sin degradar el ambiente; económicamente viables y con costos de instalación accesibles, que rindan ganancias durante un largo tiempo y sean socialmente equitativas [2].

Esta necesidad de encontrar fuentes de energía alternativas, ha llevado a la investigación, el desarrollo y la implementación de un sin número de proyectos los cuales tienen como principal finalidad encontrar un proceso que permita obtener energía a partir de recursos renovables. La digestión anaeróbica al ser un proceso de carácter netamente orgánico da una alternativa a la generación de energía sin causar daño al medio ambiente y evitando la contaminación ocasionada por los desechos agroindustriales. Es por esto que el desarrollo constante de este tipo de procesos es de suma importancia, ya que con los mismos no solo se evita la dependencia de las industrias, y de la sociedad en general, hacia las energías no renovables (petróleo), sino que también se reducen factores de contaminación, en especial desperdicios industriales orgánicos.

## Introducción

---

### **1.2. Justificación del Proyecto**

LaDEA es el Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas de la Universidad San Francisco de Quito, el cual tiene como principal finalidad el desarrollo y la investigación de procesos y tecnologías que permitan encontrar fuentes alternativas de energía renovables y socialmente adecuadas. En LaDEA se busca la innovación y el desarrollo de tecnologías nuevas o existentes para de esta manera aportar significativamente a los problemas energéticos que se avecinan en tiempos futuros.

Son estas las razones por las cuales se han puesto en marcha algunos proyectos los cuales han tenido el aporte de estudiantes, profesores e industrias, las cuales ven un enorme y potencial beneficio en este tipo de tecnologías.

Es así como se decide poner en marcha algunos proyectos, entre los cuales se encuentra la operación de un biodigestor a escala piloto, el cual tiene como finalidad el reducir la contaminación generada por desechos orgánicos, como estiércol de animales, restos de cosechas y de procesos agroindustriales, transformándolos a través del proceso de digestión anaerobia en energía eléctrica y fertilizante orgánico de muy buena calidad.

Esta tesis trata principalmente la optimización del proceso de biodigestión anaerobia de la planta piloto, la cual ya ha atravesado las etapas de diseño, construcción y puesta en marcha.

En este estudio se desea investigar la operación de la planta piloto y obtener la productividad máxima del sistema, conociendo sus límites de operación y bajo los cuales no se tendrán pérdidas de ningún tipo.

Al optimizar el funcionamiento del biodigestor a escala piloto y del proceso en general, podemos conocer los límites bajo los cuales el proceso de digestión anaerobia se encontrará operando de forma eficiente y productiva, evitando así una sobrecarga en el proceso, una operación ineficiente o costos innecesarios.

En definitiva lo que se busca en este estudio es incrementar la alimentación diaria de los desechos agroindustriales, en un proceso que transformará estos agentes contaminantes en energía y en un fertilizante orgánico de excelentes propiedades. Todo esto monitoreando y controlando los parámetros de control para conocer los límites bajo los cuales puede operar dicho proceso.

La optimización en la operación del biodigestor a escala piloto de LaDEA complementa los estudios previos realizados, con lo cual se están acumulando los conocimientos neces-

## Introducción

---

rios para implementar a nivel rural, agrícola, semi-industrial o industrial nuevas tecnologías para la generación de energía eléctrica, la cual no solamente satisface la demanda de un servicio básico, sino que también permite eliminar o reducir de manera drástica la contaminación generada por los desechos orgánicos.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivos Principales**

El objetivo principal de esta tesis es optimizar la operación de un biodigestor a escala piloto, con el fin de maximizar la producción de biogás y minimizar el tiempo de residencia de la materia orgánica que se encuentra en el mismo. Se desea encontrar el punto máximo de operación del biodigestor, sin que los productos obtenidos del mismo, como son biogás y el fertilizante orgánico (biol), se vean afectados de ninguna manera.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos de este proyecto son:

- Incrementar metódicamente la carga orgánica diaria alimentada.
- Llevar seguimiento de los parámetros de operación: pH, temperatura, sólidos totales, sólidos orgánicos totales, DQO, contenido de nitrógeno, etc.
- Llevar un control de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de la solución de salida del biodigestor.
- Controlar la calidad y observar la producción diaria de biogás.

## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1. Optimización de Procesos

La palabra optimizar u optimización se refiere a la búsqueda y el hecho de mejorar el rendimiento de un sistema operativo. En la optimización de un proceso se busca determinar la región de los factores importantes que produzca la mejor respuesta posible, o en otras palabras, encontrar el conjunto de condiciones de operación que produzcan el mejor desempeño del proceso. Por ejemplo, si la respuesta que representa mayor importancia en un proceso es el rendimiento, se buscará la región del rendimiento máximo, mientras que si la respuesta es la variabilidad de una dimensión crítica del producto, se buscará la región de variabilidad mínima [3].

Existen sistemas en los cuales la optimización se basa únicamente en la respuesta de una sola variable, como puede ser el rendimiento o la variabilidad de una dimensión crítica del producto, como mencionamos anteriormente. Además existen sistemas sumamente dinámicos en los cuales se debe tener en cuenta un conjunto de variables, las cuales controladas de manera adecuada y sin sobrepasar sus rangos o límites de operación, darán como resultado un incremento en el rendimiento, y a la vez, una variabilidad mínima en el producto obtenido. Es decir, la optimización del sistema o proceso no se verá supeditada solamente a la respuesta de una sola variable. En este caso es importante monitorear, analizar y controlar de manera individual a todas las variables en las diferentes etapas de un proceso, al igual que los productos obtenidos del mismo.

La optimización no solo se centra en el resultado que se desea obtener de determinado proceso, y que se considerará la mejor condición para el mismo; la optimización va desde la caracterización y conocimiento de materia prima y equipos que se emplearán en el proceso, hasta el análisis y control individual de todas las etapas y sus respectivas variables. Es decir, se requiere un conocimiento absoluto del proceso desde el principio hasta el final. Con esto no solo se logrará mantener un seguimiento efectivo y eficaz de todo el sistema operativo, sino que también la optimización se logrará en menor tiempo y de mejor manera.

## 2.2. Digestión Anaerobia

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el cual diferentes grupos bacterianos interactúan en ausencia de oxígeno, degradando la materia orgánica para transformarla en un gas rico en metano denominado biogás y un efluente rico en nitrógeno, denominado bioabono o biol. Este proceso biológico se lo puede dividir en tres etapas importantes que son: hidrólisis y acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [2].

Es importante recordar que al iniciar el funcionamiento, o al poner en marcha un biodigestor, encontramos el desarrollo y formación de dos tipos de bacterias: las desnitrificantes las cuales son aerobias y cumplen la función de remover el oxígeno disuelto, permitiendo crear las condiciones anaeróbicas necesarias para la existencia de las bacterias productoras de biogás; y las sulfato- reductasas las cuales siempre están presentes y producen ácido sulfhídrico [2].

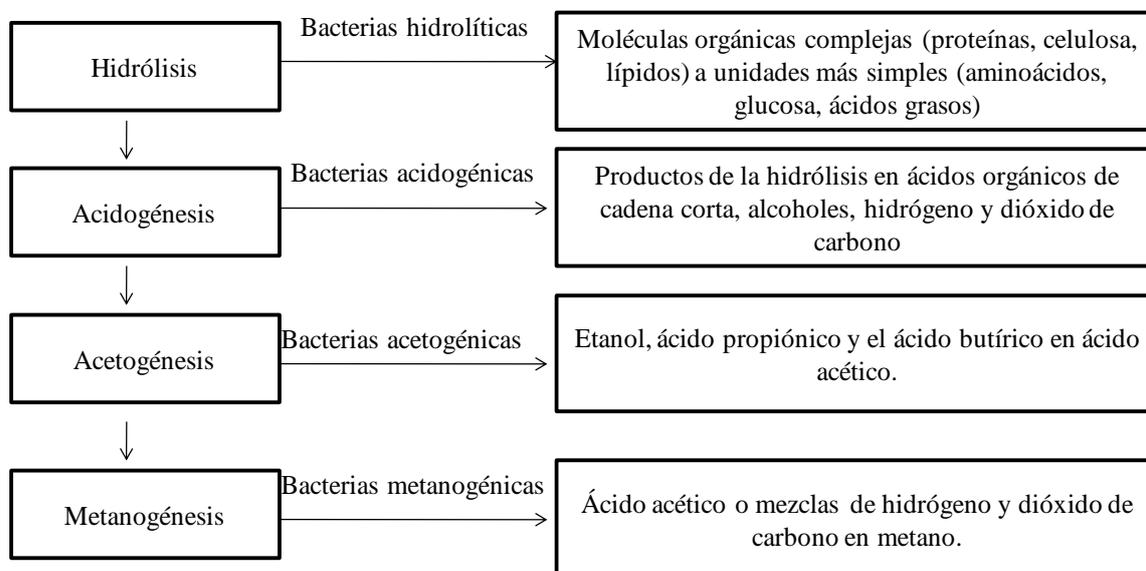
En la primera etapa de hidrólisis y acidogénesis un grupo de bacterias fermentativas, principalmente bacterias proteolíticas y celulolíticas, actúan sobre la materia orgánica (polisacáridos, lípidos y proteínas) mediante una reacción de hidrólisis enzimática transformando los polímeros a monómeros individuales. Posteriormente, bacterias acidogénicas realizan la conversión de estos monómeros a productos como ácidos orgánicos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno molecular ( $H_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ) [5]. Estos productos son el sustrato de otro tipo de bacterias denominadas acetogénicas (acetogénesis), las cuales producen acetato,  $H_2$  y  $CO_2$ . Simultáneamente, un grupo de bacterias homoacetogénicas, degradan los ácidos de cadena larga a acetato,  $H_2$  y  $CO_2$  [4].

El ácido acético constituye el principal sustrato para las bacterias metanogénicas (metanogénesis), las cuales transforman el mismo a metano. Las bacterias formadoras de ácido generan mayoritariamente ácido acético y en menores cantidades ácido propiónico y butírico. El 72% de metano producido proviene del ácido acético ( $CH_3COOH$ ) y el 13% proviene del ácido propiónico ( $CH_3CH_2COOH$ ) o butírico ( $C_3H_7COOH$ ). El 15% restante se forma a partir de hidrógeno molecular y dióxido de carbono, reducción de metanol, y degradación de otros compuestos intermedios [5].

Las bacterias metanogénicas que transforman el ácido acético y los ácidos propiónico y butírico en metano se denominan bacterias metanogénicas acetoclásticas, mientras que las bacterias metanogénicas que transforman el hidrógeno molecular junto con dióxido de carbono en metano se denominan bacterias metanogénicas hidrogenoclasticas [6].

## Fundamentos Teóricos

Al interactuar y desarrollarse de forma balanceada y equilibrada las tres etapas antes mencionadas, se puede asegurar un funcionamiento estable y eficiente de un biodigestor. A continuación se presenta un esquema de la digestión anaeróbica [7].



**Figura 2-1:** Etapas de la fermentación bacteriana

---

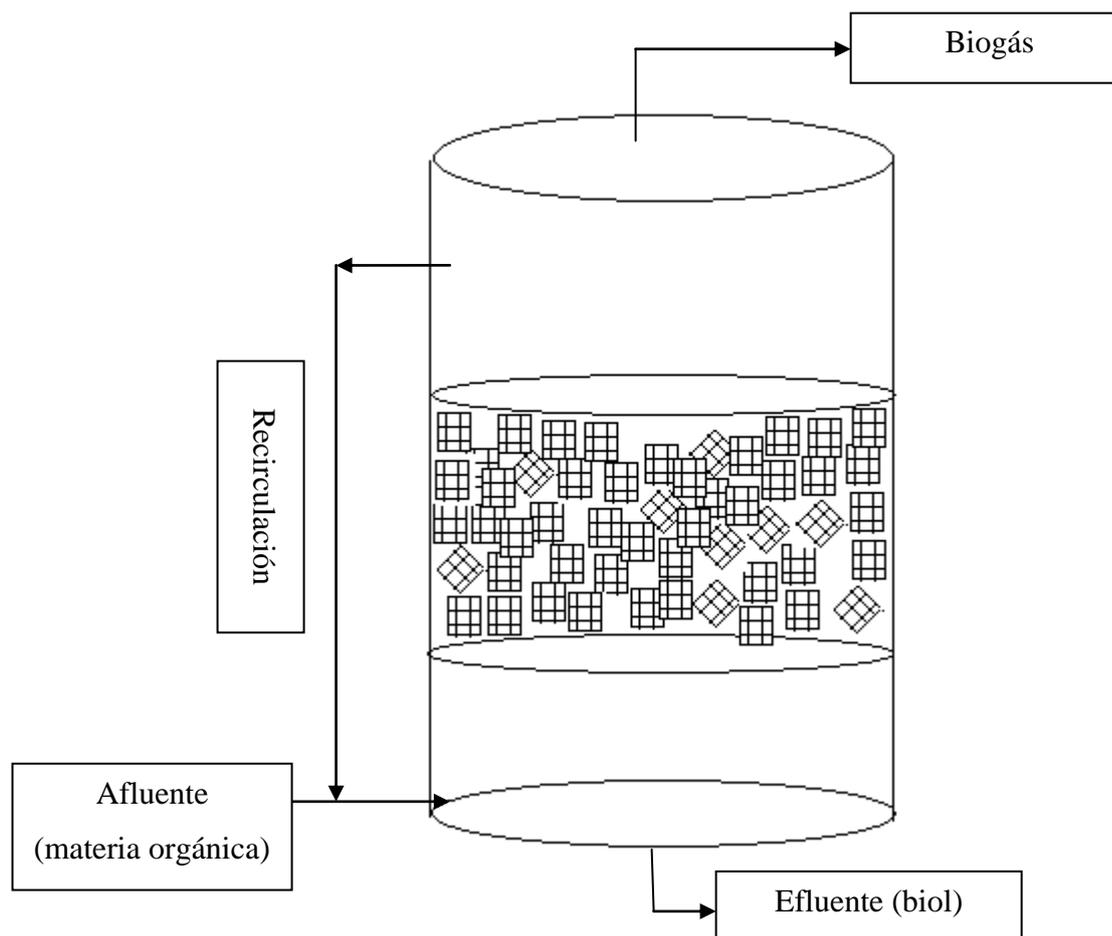
### 2.3. Biodigestores de Filtro Anaeróbico

Los biodigestores de filtro anaeróbico son sistemas que han obtenido éxito en el medio rural, estos reactores poseen en su interior un medio fijo, el cual puede estar constituido por diversos materiales, tales como ripio, piedra pómez, bolas o tubos de porcelana porosa, material corrugado, o materiales plásticos, como anillos de PVC o de poliuretano, entre otros. A través de esta cama de soporte de material poroso inerte, se hace circular el material que va a ser objeto de la digestión. Los microorganismos se adhieren a la superficie del relleno y crecen entre los orificios formando biopelículas, por lo cual se mantiene una gran cantidad de microorganismos en el reactor. Esto es importante porque las bacterias metanógenas tienen un largo ciclo de multiplicación y son muy sensibles al ambiente [12].

El material de empaque debe tener idealmente alta porosidad, de tal forma que se aumente la superficie específica de contacto entre el sustrato orgánico a estabilizar y el material filtrante. También se debe incorporar un tratamiento primario que elimine material suspendido del agua, con miras a evitar tempranas obstrucciones del filtro [8].

El filtro anaeróbico tiene la característica de aumentar el tiempo de residencia de los microorganismos en su interior, por estar formado por una matriz que posee una mayor superficie de contacto, donde se fijan las bacterias metanogénicas [4]. Existen dos variantes: de flujo ascendente y de flujo descendente. Los tanques cuyo caudal afluyente ingresa por su sección inferior son los denominados de flujo ascendente, mientras que si el caudal afluyente ingresa por su sección superior son de flujo descendente [8].

El reactor con el que se va a trabajar en esta tesis es de filtro anaeróbico de flujo ascendente, el cual se recircula constantemente. Un diagrama del tipo de biodigestor utilizado se muestra en la Figura 2-2.



**Figura 2-2:** Filtro anaeróbico de flujo ascendente

## 2.4. Parámetros de Control en un Biodigestor

### 2.4.1. Temperatura

Dentro de la operación de un biodigestor, la temperatura es quizá el parámetro más importante a controlar. Esta variable es la reguladora de la velocidad de crecimiento bacteriano, la cual influye de forma directa en la degradación de la materia orgánica y la producción de gas en un biodigestor. Aunque el rango de temperaturas bajo las cuales se puede operar un biodigestor es muy amplio, desde 10 °C hasta 60 °C, es importante mantener la temperatura lo más constante posible, ya que cambios bruscos y prolongados pueden ocasionar un desbalance en la proporción de microorganismos existentes dentro del mismo. Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a cambios de temperatura y la velocidad de crecimiento que presentan las mismas es mucho menor que la de otros microorganismos que se

## Fundamentos Teóricos

---

pueden encontrar dentro de un biodigestor. Por esto, si se tienen cambios de temperatura bruscos y prolongados dentro del reactor, el tiempo de reposición que presentarán las bacterias metanogénicas será menor que el de los otros microorganismos, por lo que se pueden sufrir descensos en el pH y reducción en la producción de biogás, generando de esta manera el malfuncionamiento del biodigestor [9].

Existen tres regímenes de temperatura bajo los cuales puede operar un biodigestor: sicrófilico, mesófilico y termófilico.

En el régimen sicrófilico la digestión se da a temperaturas realmente bajas entre 10 y 25 °C y la producción de metano es considerablemente baja por lo que la operación a estas temperaturas no es recomendable.

El régimen mesófilico entre 25 y 45 °C, es el más recomendado para utilizar en el medio rural e industrial, ya que el mismo presenta mayor estabilidad y producción de biogás. Además requiere de menor energía para alcanzar las temperaturas deseadas.

En el régimen termófilico entre 45 y 60 °C se aprecia un ritmo de producción de biogás de aproximadamente el doble al de la digestión mesofílica. Sin embargo, los altos requerimientos energéticos para mantener esta temperatura de operación representan una gran desventaja en biodigestores de uso rural [9].

Es importante remarcar que, sin importar el régimen bajo el cual se desee operar un biodigestor, lo primordial es mantener constante cualquier temperatura, y en caso de realizar un cambio en la misma hacerlo de manera lenta y pausada.

Las temperaturas de operación consideradas óptimas para la operación de un biodigestor son de 36 °C en el rango mesofílico y 55 °C en el rango termófilico.

### 2.4.2. pH

El rango óptimo de pH bajo el cual un biodigestor opera de manera eficiente y presenta buena producción de biogás se encuentra entre valores que van desde 6,5 hasta 7,5, es decir, un medio neutro. Al operar un biodigestor es muy importante mantener el valor de pH dentro de este rango, ya que si no se alcanzan o se exceden dichos valores la velocidad de degradación bacteriana disminuye o se detiene, disminuyendo o suspendiendo la producción de biogás. Algunas de las razones por las cuales el pH en un biodigestor se puede tornar ácido son [10]:

## Fundamentos Teóricos

---

- Sobrecarga de materia orgánica
- Cambios bruscos y prolongados en la temperatura

Si se tiene una acidificación de la mezcla reactiva del biodigestor las medidas correctivas que se pueden tomar son:

Detener la carga o alimentación del reactor por varios días hasta que el pH alcance valores normales. Esto se logra ya que al detener la carga o alimentación al reactor la actividad bacteriana se hace más lenta, en especial la de las bacterias acetogénicas, las que producen ácidos, y a la vez permite que las bacterias metanogénicas, las cuales producen metano, reduzcan la concentración de ácidos a través de la metanogénesis, elevando los valores de pH. Otra forma de elevar el pH en un digestor es adicionando sustancias tampones o buffer como son: cal viva (CaO), cal apagada (Ca(OH)<sub>2</sub>), carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>) e hidróxido de sodio (NaOH) [6], y manteniendo el ritmo de carga del biodigestor [9].

Principalmente, los problemas que se tendrán durante la operación de un biodigestor, serán por valores de pH ácidos, y muy difícilmente se tendrán valores de pH por sobre 8 durante la operación del mismo; motivo por el cual, solo se tratan medidas correctivas para descensos en el pH.

### 2.4.3. Tiempo de Retención Hidráulico

El tiempo de retención hidráulico, es el tiempo que la materia orgánica o biomasa permanece dentro del digestor. Esto es desde el momento que entra, hasta su descarga o degradación. El tiempo de retención hidráulico se calcula dividiendo el volumen útil del biodigestor para el caudal volumétrico diario de alimentación, obteniéndose el resultado en días [2].

$$\tau = \frac{V}{\dot{V}} \quad \text{Ec. 2-1}$$

donde,

$\tau$  = tiempo de retención hidráulico [d]

$V$  = volumen del digestor [m<sup>3</sup>]

$\dot{V}$  = caudal volumétrico diario [m<sup>3</sup>/d]  
de alimentación

El tiempo de retención hidráulico debe ser seleccionado de tal manera que no haya acumulación de material orgánico en el biodigestor. Por esta razón el tiempo de retención hidráulico se encuentra directamente relacionado con la temperatura a la cual opera el reactor, ya que si el digestor trabaja a elevadas temperaturas el proceso será más acelerado, adoptando tiempos de retención cortos. Mientras que si la temperatura de operación es baja los tiempos de retención serán mayores.

El tipo de sustrato que se utiliza en la digestión es otro factor que influye de manera directa en el tiempo de retención hidráulico, ya que dependiendo de la degradabilidad del mismo se tendrá mayores o menores tiempos de retención.

#### 2.4.4. Producción de Biogás

La producción de biogás durante la operación de un biodigestor es un indicador directo del estado en el que se encuentra el mismo. Una alta producción de biogás refleja una alta actividad bacteriana y una buena degradación de la materia orgánica. Sin embargo, es importante notar que el tener una elevada productividad de gas en un digestor no es el único parámetro relevante, dado que la generación de biogás podría ser alta, pero la calidad del mismo no podría ser la esperada. Por esta razón al operar y controlar un biodigestor, además de llevar el seguimiento de la cantidad de gas que se produce, se debe analizar la calidad del biogás obtenido, ya que si se tiene una composición de gas con porcentajes de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) mayores a los de metano ( $\text{CH}_4$ ) el biogás no será adecuado para la generación de energía eléctrica, además de indicarnos que la operación y estado del reactor no es el apropiado.

#### 2.4.5. Agitación y Mezcla

La producción de biogás que presenta un biodigestor se ve altamente beneficiada cuando existe la presencia de cualquier tipo o método de agitación en el mismo. La agitación dentro del digestor permite que el contacto existente entre bacterias, materia prima en degradación y compuestos intermedios, producto de las diferentes etapas del proceso digestivo, sea mayor, teniendo como resultado la homogeneización de la materia orgánica, preservación de las condiciones de temperatura e incremento en la producción de biogás [2].

## Fundamentos Teóricos

---

Al mantener la mezcla reactiva al interior del biodigestor, en constante agitación, se optimizan las condiciones para la generación de metano, además de evitar la formación de espumas, la sedimentación de la materia que se encuentra dentro del reactor, y la formación de zonas muertas por no estar en contacto la materia orgánica y los microorganismos.

### 2.5. Biogás

El biogás es una mezcla de gases, producto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, realizada por la acción bacteriana. Las bacterias consumen la materia orgánica compuesta principalmente por carbono y nitrógeno y como resultado se produce una combinación de gases, conformados mayoritariamente por metano ( $\text{CH}_4$ ), el cuál brinda las características combustibles al biogás, y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) [11].

El biogás puede generarse de forma “espontánea” en la naturaleza, ya que todo desecho o residuo orgánico tiene la capacidad de producir biogás. Un claro ejemplo de esto es el gas natural que no es más que un tipo de biogás.

La producción y las características del biogás, son variables y se ven directamente relacionadas con el tipo de desecho o residuo del cual provienen. Dependiendo de la composición fisicoquímica y la cantidad de carbono degradable que contenga la materia orgánica se tendrá mayor o menor producción de biogás. El volumen de biogás producido generalmente se expresa en  $\text{m}^3_{\text{biogás}} / \text{m}^3_{\text{digestor}}$  o  $\text{m}^3_{\text{biogás}} / \text{kg}_{\text{DQO}}$  y difieren según el tipo de residuo, la concentración de sólidos volátiles (SV), la relación de carga, el tiempo de retención y el diseño del digestor. Generalmente la producción de biogás oscila entre  $1 - 5 \text{ m}^3_{\text{biogás}} / \text{m}^3_{\text{digestor}}$  [12].

#### 2.5.1. Características del Biogás

La composición de biogás varía de acuerdo al tipo de desecho, o biomasa, utilizado y las condiciones en que se procesa [4]. Generalmente el biogás se encuentra conformado por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y otros gases en menor proporción. En la Tabla 2-1 se muestra su composición aproximada [1]:

**Tabla 2-1:** Composición promedio del biogás

<b>Compuesto</b>		<b>Volumen [%]</b>
Metano	CH <sub>4</sub>	55 – 70
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	35 – 40
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.5 – 5
Sulfuro de Hidrógeno	H <sub>2</sub> S	0.1
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	1 – 3
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	Trazas

Como se mencionó anteriormente, la producción y la composición de biogás dependerá de manera directa del tipo de biomasa que se utilice. A continuación se presenta la composición de biogás promedio, en función del tipo de fuente de la cuál proviene [12]:

**Tabla 2-2:** Composición del biogás derivado de diversas fuentes

<b>Composición</b>		<b>Tipo de Desecho</b>		
		<b>Desechos Agrícolas</b>	<b>Lodos Cloacales</b>	<b>Desechos Industriales</b>
Metano	CH <sub>4</sub>	50 – 80 %	50 – 80 %	50 – 70 %
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	30 – 50 %	20 – 50 %	30 – 50 %
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0 – 1 %	0 – 3 %	0 – 1 %
Sulfuro de Hidrógeno	H <sub>2</sub> S	0 - 0.1 %	0 – 1 %	0 – 8 %
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0 – 2 %	0 – 5 %	0 – 2 %
Monóxido de Carbono	CO	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 1 %
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 1 %
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	trazas	trazas	trazas
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	saturación	saturación	saturación
Orgánicos		trazas	trazas	trazas

Como podemos observar el metano es el componente mayoritario en esta mezcla de gases. Por lo tanto, el metano será el que determine el valor energético del biogás, dependiendo de su concentración. Por lo general el valor calorífico del biogás varía de 20 – 25 MJ / m<sup>3</sup> o 4500 – 5600 kcal / m<sup>3</sup>. Algunas de las propiedades típicas del biogás se presentan a continuación:

**Tabla 2-3:** Propiedades del biogás

Propiedades	Unidades	Valor
Biogás	% vol.	60 <sub>(CH<sub>4</sub>)</sub> / 40 <sub>(CO<sub>2</sub>)</sub>
Temperatura de ignición	°C	650 - 750
Presión crítica	MPa	7.5 – 8.9
Densidad nominal	kg/m <sup>3</sup>	1.2
Densidad relativa		0.83
Contenido de oxígeno para la explosión	% vol.	6 – 12

Como podemos observar el biogás es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura de ignición de 650 – 750 °C, su llama alcanza una temperatura de 870 °C. Se debe tener mucho cuidado al manipular el biogás a altas presiones, controlando la presencia del oxígeno [13].

#### 2.5.2. Adaptabilidad del Biogás en la Generación de Energía Eléctrica

El valor calorífico del biogás es en promedio 6 kWh / m<sup>3</sup>. Es decir que 1 m<sup>3</sup> de biogás es energéticamente equivalente a cerca de medio litro de combustible diesel. El biogás puede ser utilizado directamente como cualquier otro gas combustible, aunque en algunos casos se requieren procesos previos de purificación del gas, dependiendo del uso que se le va a dar. El biogás a nivel industrial puede ser utilizado para: la generación de calor o electricidad en calderas, secadores, hornos, en motores o turbinas para generar electricidad, en pilas de combustible (previa purificación), o como material base para la síntesis de productos de elevado valor agregado, como combustible de automoción. A nivel rural el biogás puede ser utilizado como combustible en quemadores para la calefacción de animales, para la iluminación mediante lámparas incandescentes, que no requieren del gas a presión, como combustible único para refrigeradores, calentadores de agua, en estufas simples para la cocción de alimentos, secadores, motores con adecuaciones, etc [10].

A continuación se muestra el rendimiento de 1 m<sup>3</sup> de biogás para diferentes aplicaciones [14]:

**Tabla 2-4:** Implementación de 1m<sup>3</sup> de biogás y su duración

Uso	Duración [h]
Termotanque de 110 L	3
Heladera de 14 ft <sup>3</sup>	10
Lámpara a mantilla	12
Motor de 1 HP	2
Pantalla infrarroja (3000 calorías)	3
Generación de electricidad	2.2 kWh

El biogás en mezcla con el aire, en una relación 1:20, forma un gas detonante altamente explosivo, su poder calorífico es inferior al de gas natural o propano. Sin embargo, el biogás puede ser considerado una fuente de energía renovable y alternativa. Además es una solución inmediata a los problemas de contaminación por parte de los residuos orgánicos, los cuales producen gases de efecto invernadero al ser depositados en vertederos, y que representan la principal materia prima para la generación o producción de biogás a través del proceso de biodigestión anaerobia.

## 2.6. Fertilizante Orgánico o Bioabono (Biol)

El biol es un abono orgánico líquido producto de los procesos de digestión anaerobia. El biol contiene nutrientes que son fácilmente asimilados por las plantas haciéndolas más vigorosas y resistentes, y convirtiendo a este residuo orgánico en un excelente fertilizante. Se encuentra constituido principalmente por la fracción orgánica que no es degradable anaeróbicamente. Su constitución puede variar mucho, dependiendo de las variaciones en el contenido de la materia orgánica utilizada para alimentar el biodigestor y del tiempo de residencia de dicho material [1].

El biol es considerado un excelente fertilizante debido a que la digestión anaeróbica, a diferencia de la descomposición de materia orgánica al aire libre, no permite que existan grandes pérdidas de los nutrientes originales contenidos en la materia prima como: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio; y en menor proporción cobre, manganeso, hierro, entre otros. Por ejemplo, en el proceso de digestión anaerobia el nitrógeno reduce sus pérdidas de un 18% a un 1%. Mientras que el carbono de un 33% a un 7%. Es decir, se conservan en el efluente los nutrientes, que son esenciales para las plantas. Además, el nitrógeno que se

## Fundamentos Teóricos

---

encuentra en la materia orgánica esta un 75% en forma de macromoléculas orgánicas y un 25% en forma mineral. En la digestión anaeróbica sufre una transformación reduciendo a un 50% el nitrógeno orgánico y aumentando a un 50% el nitrógeno en forma mineral, el cual es directamente asimilable por las plantas [14]. El tratamiento y el uso posterior que se le da al efluente (biol) es importante, ya que una vez que ha sido descargado del biodigestor, con el pasar de los días el nitrógeno mineral se va perdiendo paulatinamente y el biol pierde sus características.

### 2.6.1. Características del Fertilizante Orgánico (Biol)

El biol se encuentra compuesto por diversos productos orgánicos e inorgánicos, los cuales pueden ser utilizados tanto para la fertilización de suelos, así como también para la alimentación de animales [1].

En el proceso de digestión anaeróbica se conservan en el efluente todos los nutrientes originales (N, P, K, Ca, Mg) de la materia prima, los cuales son esenciales para las plantas, mientras que se remueven solamente los gases generados ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) que comprenden del 5% al 10% del volumen total del material de carga. Son estos los motivos por los cuales el biol posee características fertilizantes capaces de influenciar sobre plantas y cultivos, elevando su productividad. En la Tabla 2-5 se muestra de manera general la composición que posee el biol. Esta puede variar de manera significativa con respecto a sus componentes, dependiendo del material de carga alimentado al biodigestor y de otros factores relacionados al mismo [15].

**Tabla 2-5:** Análisis químico del biol

<b>Composición</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Nitrógeno	0.092	%
Fósforo	112.80	mg/L
Potasio	860.40	mg/L
Calcio	112.10	mg/L
Magnesio	54.77	mg/L
Cobre	0.036	mg/L
Manganeso	0.075	mg/L
Hierro	0.820	mg/L
Cobalto	0.024	mg/L
Boro	0.440	mg/L
Selenio	0.019	mg/L

Los aspectos cualitativos que podemos señalar del biol son:

- No posee mal olor
- No atrae moscas
- Libre de patógenos
- Viscosidad reducida
- Mayor mineralización y disponibilidad de los nutrientes para los cultivos
- Fácil aplicación y manipulación

### 2.6.2. Usos y Aplicación del Fertilizante Orgánico (Biol)

El fertilizante orgánico o biol puede ser empleado en cualquier tipo de plantas o cultivos sin importar su ciclo o tipo. El biol es un abono foliar orgánico, es decir, se aportan nutrientes a la planta a través de las hojas. Esto como complemento a la fertilización realizada al suelo, la cual se puede realizar a través de la aplicación de biol o biosol. El biosol se obtiene como producto de la limpieza del biodigestor, es decir, la parte sólida resultado de la digestión anaerobia, mientras que la parte líquida es el biol. El biol también puede ser aplicado a la tierra al ser mezclado con material orgánico animal para mejorar la fertilidad natural.

Las formas en las cuales puede ser aplicado el residual o producto obtenido del proceso de biodigestión anaerobia dependen de su estado y del uso que se le va a dar. Las formas de aplicación son las siguientes:

## Fundamentos Teóricos

---

### **Efluente líquido:**

Presenta ventajas como la alta disponibilidad de nutrientes y la buena absorción por parte de las plantas, puede aplicarse inmediatamente después de haber sido descargado del biodigestor, o almacenarse en tanques tapados por un periodo no mayor a 4 semanas, para evitar grandes pérdidas de nitrógeno [1].

### **Efluente compostado:**

Otra manera de manejar el efluente es agregándole material verde (desechos de forraje de establo) y compostándolo, este método produce pérdidas de nitrógeno del 30% al 70% , pero tiene la ventaja de que el producto final es compacto, en forma de tierra negra, lo que facilita el transporte y aplicación [1].

### **Efluente seco:**

El resultado del secado es una pérdida casi total del nitrógeno orgánico, aproximadamente el 90%, lo que equivale al 5% del nitrógeno total. Las producciones observadas en cultivos al utilizar el efluente seco son las mismas que al usar estiércol seco o estiércol almacenado, este procedimiento se recomienda cuando se vayan a fertilizar grandes áreas, o la distancia a cultivos sea grande y de difícil acceso [1].

### **2.6.3. Ventajas en el uso de Fertilizante Orgánico o Bioabono (Biol)**

El empleo de fertilizante orgánico o biabono (biol) sobre los cultivos, o la tierra misma, presenta una gran cantidad de ventajas, entre las que podemos destacar:

- Los ácidos húmicos presentes en este material contribuyen a mejorar la estructura del suelo y su porosidad, aumentando al mismo tiempo la capacidad de intercambio [14].
- Estabiliza la aglomeración de partículas del suelo, logrando que resistan a la acción disgregadora del agua; absorbiendo las lluvias más rápidamente, evitando la erosión y, conservando la humedad por más tiempo. La estructura porosa permite mayor aireación de la zona de raíces facilitando su respiración y crecimiento [2].
- Actúa como corrector de acidez, debido a su pH neutro (7.5). Con valores de pH altos se dificulta el desarrollo de hongos patógenos [2].
- Apoya la actividad microbiológica de los suelos.
- Incrementa la vigorosidad de los cultivos, permitiéndoles soportar de mejor manera los ataques de plagas, enfermedades y los efectos adversos del clima.

- En los cultivos se observa incrementos en la producción y rendimiento.
- Liberación paulatina de los nutrientes disponibles, generando una nutrición lenta pero continua.

## **2.7. Caracterización de la Materia Prima y Productos**

### **2.7.1. Sólidos Totales (TS)**

La materia orgánica que ingresa, o se alimenta, a un biodigestor se encuentra constituida por una importante cantidad de agua y una fracción sólida caracterizada por la concentración de sólidos totales [2]. Los sólidos totales o TS, por sus siglas en inglés, se refieren al peso del material seco remanente, después de un proceso de secado a 105 °C hasta que no se nota pérdida de peso [16]. El porcentaje de sólidos óptimo para digestores continuos oscila entre el 8% y el 12%, ya que si se aumenta el contenido de sólidos la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se verá limitada. Afectando de manera directa la eficiencia y producción de gas. El porcentaje de sólidos óptimo también dependerá del diseño del digestor.

En el caso del estiércol bovino, el porcentaje de sólidos totales que posee, varía de 17% a 20% por lo que es necesario agregar un volumen de agua para diluir la materia prima y de esta manera reducir el porcentaje de sólidos totales de la misma. Las diluciones se realizarán en función del residuo con el que se va a trabajar y del contenido de sólidos que posee el mismo.

### **2.7.2. Sólidos Volátiles (oTS)**

Los sólidos volátiles o sólidos totales orgánicos se refieren a la parte de los sólidos totales, que se volatilizan durante la calcinación a temperaturas superiores a los 550 °C. En teoría, los sólidos volátiles contienen todos los compuestos orgánicos que pueden convertirse en metano en el proceso de digestión anaeróbica. En otras palabras, los sólidos volátiles son la parte orgánica de los sólidos totales [17].

El rendimiento de un biodigestor se verá influenciado en gran parte por el contenido en materia orgánica del material de carga (% oTS), ya que si se tiene material de carga con un elevado porcentaje de materia orgánica degradable, esta se transformará, gracias a los procesos de digestión anaeróbica, en biogás. En este caso el proceso tendrá una elevada pro-

## Fundamentos Teóricos

---

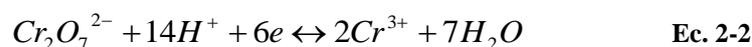
ducción de biogás traduciéndose en un buen rendimiento del proceso. Obviamente para que la producción de biogás sea la adecuada y la esperada, se debe controlar todos los parámetros de operación del proceso y asegurar que dichos parámetros no sobrepasen sus límites u óptimos de operación.

### 2.7.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es un parámetro aproximado, que mide el contenido total de materia orgánica presente en una muestra líquida. La DQO cuantifica la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica degradable, y se expresa en mg de oxígeno consumido para la oxidación de las sustancias reductoras presentes en un litro de muestra, (mg O<sub>2</sub>/ L) [18].

La DQO se obtiene al digerir por 120 min a 150 °C un volumen conocido de muestra a analizar, con dicromato de potasio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), o agentes fuertemente oxidantes, en un medio ácido. Permitiendo que la materia orgánica presente en la muestra se oxide, consumiendo el dicromato de potasio, cuyo valor de absorbancia es conocido, y generando el ión crómico, el cual posee una absorbancia diferente, y por lo tanto permitirá realizar la medición posterior por determinación colorimétrica [16]. El método se indica en el Anexo2.

La reacción se muestra a continuación:



El cambio de valores de la DQO antes y después del proceso de digestión anaerobia puede indicar la eficiencia del proceso [9]. La DQO al ser un parámetro conservativo, es decir al mantenerse la suma de las DQO de entrada igual a la suma de las DQO de salida [19], permite conocer de manera indirecta la cantidad de materia orgánica degradada y transformada en metano, esto en caso de que exista una buena degradación sin acumulación en el reactor o producción de otros gases, en otras palabras la DQO permite establecer si el proceso de digestión anaerobia es eficiente.

#### 2.7.4. Carga Orgánica Volumétrica (COV)

La carga orgánica volumétrica se refiere a la cantidad de materia orgánica introducida diariamente por metro cúbico de volumen de biodigestor ( $\text{kg oTS/ m}^3_{\text{reactor}} \text{ día}$  o  $\text{kg DQO}_{\text{feed}}/ \text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ día}$ ) [19].

El control de la carga orgánica que se alimenta diariamente al biodigestor es fundamental cuando se desea mantener condiciones estables en la digestión. Si la COV es excesiva se crea inestabilidad en el proceso de digestión anaerobia debido a la acumulación de sólidos volátiles o demanda química de oxígeno. El rango de valores, entre los que generalmente se encuentra la COV es de  $2 - 3 \text{ kg oTS/ m}^3_{\text{reactor}} \text{ día}$  o  $3 - 8 \text{ kg DQO/ m}^3_{\text{reactor}} \text{ día}$  [20].

Si se tienen bajas concentraciones en el afluente o tiempos de retención elevados, los valores de COV serán bajos. En este caso las bacterias tendrán el tiempo y la capacidad suficiente para degradar toda la materia orgánica. Mientras que si se tiene un incremento en la COV, la producción de gas aumentará, los tiempos de retención disminuyen y las bacterias tendrán menor tiempo para degradar la materia orgánica, la cual será descargada del digestor a través del efluente sin ser degradada completamente. Esto se puede dar con cargas de COV mayores a  $3 \text{ kg oTS/ m}^3_{\text{reactor}} \text{ día}$  [19].

#### 2.7.5. Nutrientes para el Crecimiento Bacteriano

La materia orgánica que se utiliza como material de carga (residuos de cultivos y agroindustriales, y estiércol animal) pueden dividirse en dos grupos, las materias primas ricas en nitrógeno y las materias primas ricas en carbono [4]. Para su crecimiento las bacterias requieren, junto con una fuente de energía en forma de carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales, las cuales también se encuentran presentes en cantidades suficientes en la materia orgánica [1]. Estos nutrientes benefician a la actividad y crecimiento bacteriano, y su disponibilidad debe ser superior al valor óptimo, sobre todo la concentración requerida para las bacterias metanogénicas, ya que las mismas limitan el proceso en general y son susceptibles a una severa inhibición en el caso que exista una ligera deficiencia de nutrientes [9].

## Fundamentos Teóricos

---

### **Relación Carbono – Nitrógeno (C/N)**

Un parámetro muy importante para el crecimiento bacteriano y para la capacidad fertilizante del biol es la relación carbono – nitrógeno.

Las bacterias necesitan carbono y nitrógeno para vivir. Al momento de introducir el material de carga a un biodigestor, generalmente materia orgánica, estamos facilitando la obtención de estos elementos a la flora microbiana, ya que los mismos se encuentran presentes en la materia orgánica en forma de carbohidratos y proteínas. Estos carbohidratos y proteínas serán indispensables para el crecimiento, desarrollo y actividad de las bacterias anaeróbicas [10].

La relación C/N que se debe mantener en un biodigestor para que la digestión ocurra de manera óptima es de 30:1, ya que el carbono es usado por las bacterias de 30 a 35 veces más rápido que el nitrógeno. Si la relación C/N es muy estrecha en el rango de 10:1 hay pérdidas de nitrógeno asimilable, lo cual reduce la calidad del material digerido. Por otro lado, si la relación es muy amplia, alrededor de 40:1 se inhibe el crecimiento debido a falta de nitrógeno [18]. Entonces, es importante combinar los diferentes materiales con baja y alta relación de C/N, con el fin de balancear su contenido de nutrientes y así alcanzar la relación óptima y un crecimiento bacteriano elevado.

En general las materias primas ricas en carbono producen mayor cantidad de gas que las ricas en nitrógeno. Mientras que las materias primas nitrogenadas (excretas) tienen una producción de gas más rápida, pero inferior en cantidad, que con materias ricas en carbono (paja y tallos) [4].

En la Tabla 2-6 se muestra algunas de las materias primas o sustratos, empleados en biodigestores anaeróbicos, con sus respectivas relaciones C/N [4].

**Tabla 2-6:** Relación carbono a nitrógeno de las materias primas empleadas comúnmente

<b>Materia Prima</b>	<b>Relación (C/N)</b>
Paja seca de trigo	87:1
Paja seca de arroz	67:1
Residuos de frutos	40:1
Estiércol fresco de oveja	29:1
Estiércol fresco de vaca	25:1
Estiércol fresco de caballo	24:1
Estiércol fresco de cerdo	13:1
Excretas frescas humanas	2.9:1
Caña de maíz	150:1

Además de estos elementos, es importante también, que se encuentre presente una cantidad de fósforo en una proporción de N/P de 5:1, para el correcto desempeño del biodigestor.

#### 2.7.6. Alcalinidad

La basicidad o alcalinidad es la capacidad ácido neutralizante de una sustancia química en solución acuosa. En nuestro caso es una expresión de la concentración de sales en unidades de concentración de carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ . La alcalinidad es la medida de la capacidad tampón y sirve como un amortiguador que evita cambios rápidos en el pH, contribuyendo a que el medio líquido mantenga constante el valor del pH [21].

En los biodigestores, la alcalinidad es una medida directa e inmediata, la cual nos indica el estado del biorreactor, generalmente esta es utilizada para monitorear la estabilidad del proceso. En la digestión anaerobia es claro que si la operación y el funcionamiento del biodigestor no son los adecuados, el mismo presentará características que permitirán al operador darse cuenta de su mal funcionamiento. Un claro ejemplo de esto es el exceso de carga orgánica al biodigestor. Cuando se tiene exceso de carga en un biodigestor existe una generación excesiva de  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) en el biogás resultante y un descenso en los valores pH, producto de la destrucción de la capacidad buffer del bicarbonato y la excesiva generación de ácidos volátiles [22]. Estos cambios, lamentablemente, se detectan una vez que el proceso ya ha sido afectado de forma severa. Como consecuencia el proceso requerirá de tiempos prolongados para su recuperación, estabilización y operación normal.

## Fundamentos Teóricos

---

Entonces, el control de la alcalinidad en un biodigestor es un parámetro muy importante para ser tomado en cuenta, ya que el mismo nos permite conocer de forma inmediata si el proceso se encuentra dentro de los rangos de operación considerados estables y en caso de no cumplir los estándares realizar una corrección inmediata del problema, evitando que el proceso se vea afectado de forma severa.

Para mantener un sistema de tratamiento anaerobio, que establezca un desecho orgánico de forma eficiente, el valor de alcalinidad total debe encontrarse en el rango de 1000 a 5000 mg/L. Una disminución de este valor puede generar problemas en el sistema [23], mientras que muchos biodigestores operan por sobre los 5000 mg/L.

El método se describe en el capítulo 3.4.6.

### 2.7.7. Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

Los ácidos grasos de bajo peso molecular son denominados ácidos grasos volátiles. Estos ácidos, producto de la acidogénesis y acetogénesis, tienen una gran importancia en el proceso de la digestión. Los ácidos grasos volátiles son los precursores principales para la producción de metano y en la anaerobiosis son los responsables de la existencia o no de acidificación en el sistema, la cual puede provocar el mal funcionamiento del biodigestor [21].

Los ácidos grasos volátiles son un parámetro importante dentro de la operación de un biodigestor, ya que los mismos son utilizados para conocer la relación ácidos volátiles/ alcalinidad, la cual es clave para el funcionamiento óptimo del biodigestor. La interacción de la alcalinidad con los ácidos grasos volátiles durante la digestión anaerobia se fundamenta en la capacidad de la alcalinidad del sistema de neutralizar los ácidos grasos volátiles formados en el proceso y también mantener el pH neutro dada una eventual acumulación de los AGV [21].

Los valores óptimos en la concentración de ácidos volátiles, se deben encontrar en rangos de entre 500 a 1000 mg/L para sistemas mesofílicos y de 1000 a 2000 mg/L para sistemas termofílicos [5]. El método se describe en el capítulo 3.4.7.

En cuanto a la relación ácidos volátiles/alcalinidad, se desea que la misma sea baja ya que esto indica un óptimo funcionamiento del biodigestor, es decir, la cantidad de ácidos volátiles permanece baja y la alcalinidad alta. Si la relación entre ácidos volátiles/alcalinidad alcanzan valores próximos a 0.5 – 1, se debe a serios descensos en la alcalinidad. La con-

## Fundamentos Teóricos

---

centración de anhídrido carbónico en el biogás empieza a aumentar en estos valores. Cuando la relación llega a 0.8 o más, el pH del contenido del digestor comienza a descender [21].

### **3. Métodos Experimentales**

En el presente proyecto se trabajó con un biodigestor a escala piloto, el cual opera en régimen continuo, es decir, que diariamente una cantidad específica de materia prima ingresa al biodigestor, y esa misma cantidad es removida del mismo, manteniendo el volumen del digestor constante. Durante la experimentación se mantiene un riguroso control en todas las etapas del proceso de digestión anaerobia, empezando por la recolección de la materia prima, el control de los parámetros de operación, y terminando con la obtención de los productos biogás y biofertilizante. Todo esto con la finalidad de optimizar y estandarizar el proceso de biodigestión anaerobia el cual debe brindar el máximo beneficio, en cuanto a productividad y calidad de los productos obtenidos, y el mínimo en cuanto a costos de producción.

A continuación se mencionan de manera sistemática y detallada todos los procedimientos y equipos que se emplearon en la optimización y el control del proceso de digestión anaerobia.

#### **3.1. Descripción de la Planta Piloto de Digestión Anaeróbica**

La operación de la planta piloto inicia una vez que se tienen los insumos necesarios para el proceso de digestión anaeróbica. Estos insumos, o materia prima, son los desechos orgánicos vegetales y los desechos orgánicos animales.

La materia prima debe ser previamente preparada para que presente las características necesarias al momento de ingresar al proceso de biodigestión.

La materia orgánica vegetal pasa por una trituradora de cuchillas marca Yard Machine, en la cual se reduce el tamaño del desecho orgánico vegetal recibido.

Por otro lado, la materia orgánica animal es diluida en agua y posteriormente filtrada para separar todos los sólidos contenidos en la misma.

Una vez triturada la materia orgánica vegetal, y diluida y filtrada la materia orgánica animal, se procede a realizar la mezcla de estos dos insumos en el tanque de alimentación. La mezcla se hace de manera manual y se detiene cuando se observa que el material de alimentación está homogéneo. Adicionalmente durante la agitación del material orgánico de alimentación se puede agregar aditivos para regular el pH, en caso de ser necesario.

## Métodos Experimentales

---

Al tener una mezcla homogénea y poco viscosa en el tanque de alimentación, se procede a ingresar el material orgánico hacia el biodigestor a través del uso de una bomba centrífuga marca WEG, modelo Caracol Super 1 ½”NPT. Previo a la alimentación de material orgánico, se debe realizar la descarga del fertilizante orgánico (biol). La cantidad de fertilizante orgánico (biol) descargada del biodigestor tendrá que ser igual a la cantidad alimentada de material orgánico. Y el material descargado tendrá que ser sometido posteriormente a los tratamientos necesarios.

Finalmente, luego de haber ingresado todo el material orgánico de alimentación se mantiene una constante agitación por recirculación, permitiendo de esta manera el contacto entre el sustrato fresco y los microorganismos al interior del reactor, beneficiando de esta manera el proceso de digestión anaerobia y la producción de biogás.

Durante el proceso de alimentación al biodigestor se debe tener un permanente monitoreo sobre la temperatura de operación, ya que la misma sufrirá pequeñas variaciones durante este período, restableciéndose después de unos minutos. Caso contrario, se detiene la recirculación, se determina la razón de la variación en la temperatura y se corrige el desperfecto.

El diagrama de flujo del proceso se muestra en el Anexo 1.

### **3.2. Descripción de la Operación del Biodigestor de Filtro Anaerobio**

#### **3.2.1. Caracterización y Obtención de la Materia Prima**

La materia prima utilizada en este proceso es estiércol bovino y residuos agroindustriales. La recolección del estiércol bovino se realiza en un establo cercano a la planta piloto. Al momento de escoger el estiércol se observa que el mismo se encuentre lo más fresco posible y además se debe tener en cuenta que el ganado del cual se obtiene el estiércol no tenga ningún tipo de tratamiento antibiótico, ya que esto puede afectar al proceso de biodigestión. Una vez recolectado el estiércol se procede a realizar el pesado, la dilución y el filtrado del mismo.

Se pesa la cantidad de estiércol recolectado para saber la cantidad de agua que se debe agregar al mismo, con la finalidad de disminuir el porcentaje de sólidos totales. En este caso se realiza una dilución estiércol/agua de 1:3. Una vez realizada la dilución de estiércol

## Métodos Experimentales

---

bovino en agua, se procede a realizar el filtrado de la mezcla haciéndola pasar por un tamiz con malla de 4mm. Con esto se logra separar todos los sólidos que se encuentran en el estiércol como piedras, hojas, ramas, etc, lo que podría afectar de forma directa a la operación de la bomba centrífuga.

Por otro lado, a los residuos agroindustriales se los somete a reducción de tamaño en una trituradora de cuchillas de uso agrícola, hasta alcanzar un diámetro de partícula de aproximadamente 0.5 – 1mm.

Finalmente cuando se tiene el estiércol bovino filtrado y el residuo vegetal triturado, dependiendo de la cantidad que se desea alimentar al biodigestor, se pesa la cantidad de las dos materias primas, de manera que estas se encuentren en una proporción del 50% en peso del total de alimentación para cada una y se los ingresa en el tanque de alimentación. Como último paso se agita la mezcla hasta homogeneizarla.

### 3.2.2. Operación y Monitoreo de la Planta Piloto

La operación de la planta piloto inicia desde el mismo momento que se realiza la recolección de la materia prima, una vez que la materia orgánica animal como la vegetal han atravesado los procesos de pre-tratamiento, se procede a realizar la mezcla de las materias primas en el tanque de alimentación, en el cual se controlan el pH y homogeneidad de la mezcla resultante. Una vez que se tienen estos datos, tanto cualitativos como cuantitativos, se realiza la descarga del fertilizante orgánico (biol) del biodigestor, y la posterior alimentación de material orgánico al reactor por medio de una bomba centrífuga, en la cual se controlan los parámetros de nivel, temperatura y caudal de entrada. La cantidad de material orgánico alimentado tendrá que ser igual a la cantidad de fertilizante orgánico (biol) descargado del biodigestor para mantener el nivel constante.

Una vez realizada la alimentación de la materia prima al biodigestor, se realiza el control de la temperatura, presión y nivel del líquido a través de un sistema de control automático y un manómetro. Se permite una constante agitación por recirculación, permitiendo de esta manera el contacto entre el sustrato fresco y microorganismos al interior del reactor, beneficiando de esta manera el proceso de digestión anaerobia y la producción de biogás.

El biogás resultante atraviesa por un proceso de purificación, el cual se detalla más adelante, y se contabiliza la cantidad de gas producido por medio de un contador.

## Métodos Experimentales

---

Por otro lado el fertilizante orgánico o biol, es sometido a un tratamiento térmico después de extraerse del biodigestor, con el fin de estabilizarlo y eliminar la presencia de microorganismos patógenos.

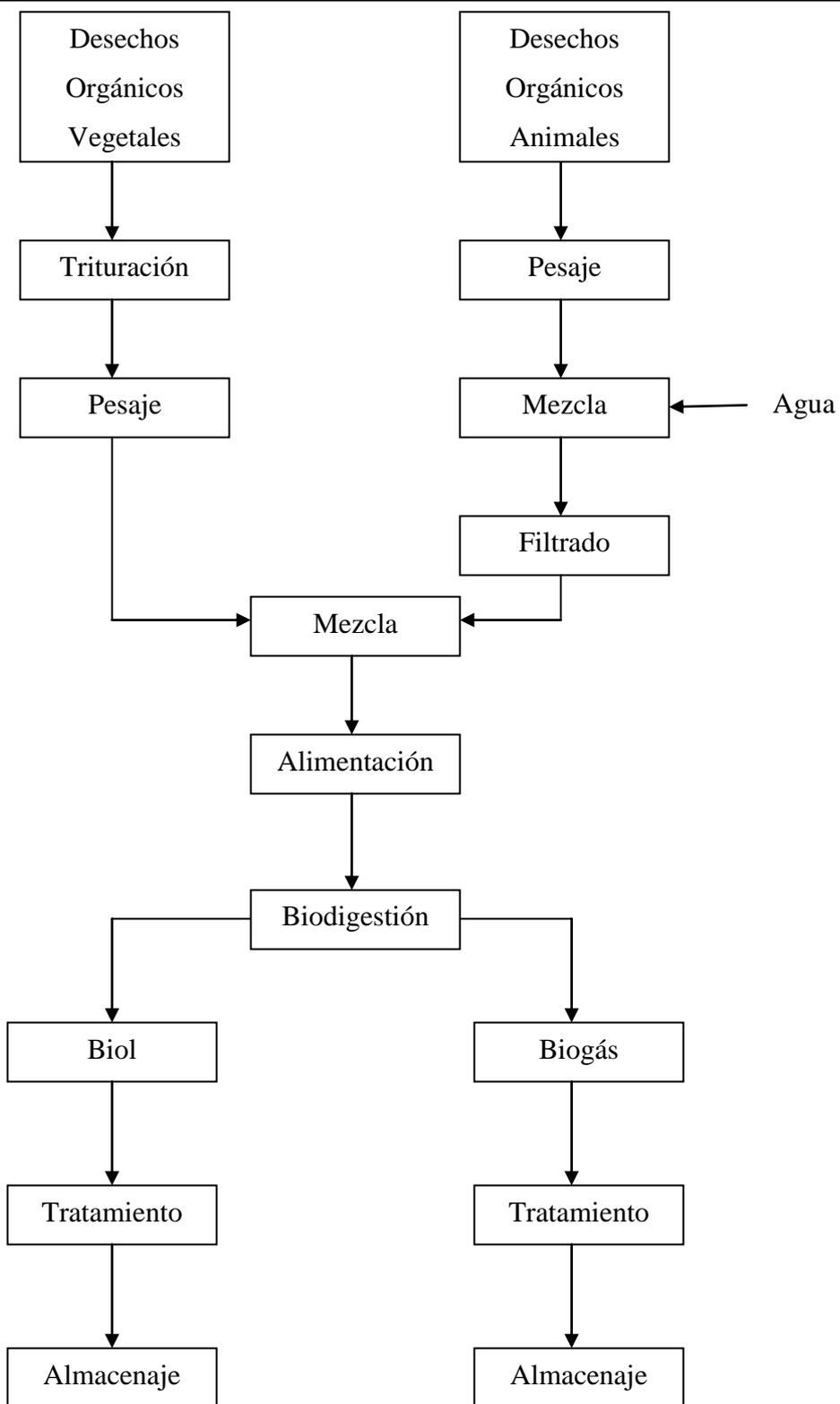
Antes de realizar la alimentación al biodigestor es necesario tomar una pequeña muestra de la mezcla reactiva, para realizar los análisis pertinentes como: sólidos totales, sólidos totales orgánicos, demanda química de oxígeno (DQO) y contenido de nitrógeno.

El gas obtenido del proceso también es analizado cada cierto tiempo para observar la calidad del mismo. Estos controles se realizan a través de la prueba de llama (cualitativa) y burbujeo del gas a través de hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) o hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) (cuantitativa). Con estas pruebas podemos conocer el porcentaje de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que posee nuestro biogás en el caso del control cuantitativo, o simplemente observar de forma directa si el biogás obtenido del proceso es de buena calidad para su combustión en el control cualitativo.

Finalmente, al fertilizante orgánico (biol) se le realizan análisis como: sólidos totales, sólidos totales orgánicos, demanda química de oxígeno (DQO) y contenido de nitrógeno antes y después del tratamiento térmico. Y solamente al fertilizante orgánico pre tratamiento térmico se le realizara análisis de alcalinidad y ácidos grasos volátiles.

A continuación se presenta un diagrama de bloques del proceso de digestión anaeróbica.

## Métodos Experimentales



**Figura 3-1:** Diagrama de bloques del proceso de digestión anaeróbica

## Métodos Experimentales

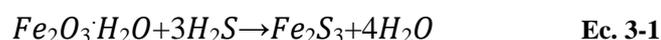
### 3.2.3. Procesamiento del Biogás

El biogás se encuentra compuesto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), pero también por pequeñas cantidades de otros gases como son el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y vapor de agua, los cuales disminuyen o perjudican las características combustibles del biogás, evitando que el mismo pueda ser utilizado directamente en equipos o maquinaria. Es por esta razón que al biogás se lo debe someter a un tratamiento previo de purificación, con la finalidad de mejorar sus características y composición, y de esta manera asegurar un permanente y buen funcionamiento de los equipos que se alimentan de él [14].

Al proceso de purificación se lo puede dividir en tres etapas que son: eliminación de H<sub>2</sub>S, secado, eliminación de CO<sub>2</sub>.

#### Eliminación de H<sub>2</sub>S

La eliminación del sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) se hace principalmente para prevenir la corrosión en equipos por los residuos de la combustión [12]. El ácido sulfhídrico es altamente venenoso, causante de malos olores y altamente corrosivo. En la planta piloto se elimina o disminuye la presencia del mismo a través de un proceso de adsorción en limaduras de hierro. Este proceso es fácil de implementar y tiene un bajo costo. Las esponjillas o limaduras de hierro son sometidas a un proceso de oxidación. Las reacciones que se dan durante el proceso de oxidación se muestran a continuación:



En el proceso también se emplea un filtro de carbón activado, el cual permite que moléculas restantes de H<sub>2</sub>S se adhieran a la superficie del carbón. Si se emplea de forma individual este filtro las cantidades eliminadas de H<sub>2</sub>S serán muy pequeñas.

#### Secado

## Métodos Experimentales

---

El biogás que sale del digestor se encuentra saturado de vapor de agua, a medida que se enfría el vapor se condensa en las cañerías y si no se lo evacua adecuadamente pueden bloquearse los conductos con agua.

Por esta razón las cañerías de distribución deben estar instaladas con una pendiente mínima del 1% hacia un recipiente denominado trampa de agua donde ésta se almacena y se extrae [14]. Adicionalmente el filtro de carbón activado reduce la humedad y los olores que puedan existir en el biogás resultante. Además, el vapor de agua se adhiere a la superficie del carbón y se condensa para después bajar a la trampa de agua.

### **Eliminación del CO<sub>2</sub>**

La eliminación del CO<sub>2</sub> es un proceso que se debe dar solamente si se desea obtener un biogás con características combustibles y caloríficas elevadas, o si el biogás obtenido va a ser almacenado a altas presiones, ya que sería inútil gastar energía de compresión y volumen de almacenaje de alto costo en un gas que no aporta como combustible. Sin embargo, si el biogás se va a emplear en la generación de energía eléctrica o térmica directamente, no es necesario que el mismo atraviese por un proceso de eliminación de CO<sub>2</sub> ya que el dióxido de carbono al no poseer ningún poder calorífico puede ser calentado o incluido en la combustión sin afectar la generación energética.

Si se considera necesaria la eliminación del CO<sub>2</sub> se pueden utilizar varios métodos entre los cuales los más difundidos son: remoción del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por absorción en una solución alcalina, por ejemplo de cal (Ca(OH)<sub>2</sub>), disolución en agua a presión, entre otros [14]. En la planta piloto, debido al uso posterior que se le da al biogás, este proceso no es requerido.

#### **3.2.4. Procesamiento del Fertilizante Orgánico**

El tratamiento o procesamiento que se da al fertilizante orgánico, una vez que ha sido extraído del biodigestor es con la finalidad de estabilizar el producto y disminuir o eliminar la presencia de microorganismos patógenos como coliformes y E. Coli, y de esta manera tener un producto listo para la aplicación en el campo o para su almacenamiento.

La United States Environmental Protection Agency (US EPA) estipula que la cantidad de coliformes fecales presentes en lodos, producto de un proceso de biodigestión (en este caso el biol), no deben superar las 1000 UFC (unidades formadoras de colonias)/g, si su aplica-

## Métodos Experimentales

---

ción es destinada a jardines o pastos; siendo estos requerimientos los denominados Clase A. Mientras que, si el uso que se va a dar al producto es destinado a tierras de cultivo, bosques o ambientes similares la cantidad de UFC/g deben ser menores a  $2 \times 10^6$ ; siendo estos los requerimientos Clase B [24].

El tipo de tratamiento que se emplea en este proceso es térmico, el cual consiste en subir la temperatura del fertilizante orgánico (biol) hasta  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante un periodo de 40 minutos. Con esto se logra disminuir de manera considerable la población bacteriana patógena, la cual es sensible a cambios muy grandes en la temperatura.

La contaminación del fertilizante orgánico (biol), post tratamiento térmico, con microorganismos patógenos, se puede dar de manera sencilla si no se tiene la suficiente precaución al momento de trabajar o manipular el mismo, lo que ocasionaría que el tratamiento previo con temperatura sea obsoleto. Es por esto, que al momento de almacenar el fertilizante orgánico debe destinarse un área solamente para este fin, así como también una exclusividad en los equipos y recipientes que se encontrarán en contacto con el mismo. Se debe evitar de manera primordial que exista contaminación cruzada con todos aquellos equipos y recipientes que entran en contacto con el estiércol y con el fertilizante orgánico previo al tratamiento térmico, como pueden ser guantes, baldes, paletas de agitación, entre otros. El tiempo de almacenamiento del fertilizante orgánico no debe ser prolongado, ya que además de iniciar una pérdida en sus características fertilizantes, es más propenso a la contaminación.

También se debe mantener un constante aseo de todos aquellos equipos y materiales que se utilicen en la planta piloto, ya que además de disminuir los malos olores, se disminuye en gran medida la posibilidad de contaminación del producto.

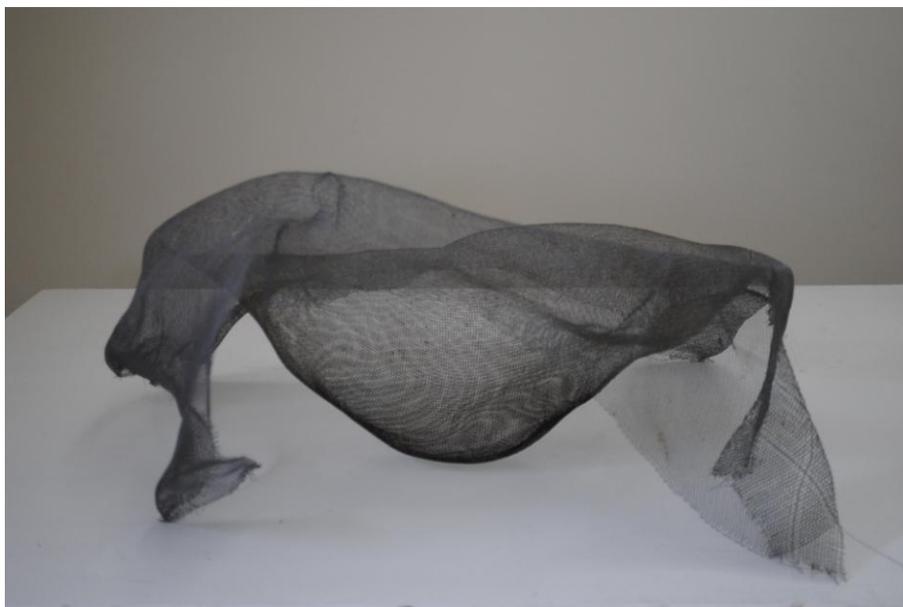
### 3.3. Equipos y Maquinaria

Los equipos y maquinarias empleados en la planta piloto se detallan a continuación con sus respectivas características y modo de uso dentro del proceso de digestión anaerobia.

#### 3.3.1. Pre tratamiento y Alimentación

##### Tamiz para filtración

El filtrado de la materia orgánica animal, previamente diluida, se realiza a través de una malla de tamiz de 4mm de diámetro. Con el filtrado se retienen los sólidos provenientes de la recolección del estiércol animal como piedras, hierbas, granos, hojas o residuos del terreno, en el cual se encontraba el estiércol animal. La filtración se la realiza de manera manual.



**Figura 3-2:** Tamiz para filtración

##### Trituradora

La trituración de la materia orgánica vegetal se la realiza a través de una trituradora de cuchillas, marca Yard Machine con una potencia de 5.5 HP. El proceso de trituración permite reducir el diámetro de partícula de la materia orgánica vegetal hasta aproximadamente 0.5 – 1 mm, lo que facilita la posterior alimentación de la mezcla reactiva al biodigestor.



**Figura 3-3:** Trituradora de cuchillas

### **Tanque de mezcla y alimentación**

El tanque de mezcla y alimentación es el dispositivo en el cual se homogeneiza la mezcla de la materia orgánica vegetal triturada y el estiércol diluido y filtrado. En caso de ser necesario se incluyen aditivos que requiera la mezcla reactiva en esta etapa del proceso. El tanque permite contener la mezcla de alimentación y observar si las características de la misma como pH, diámetros de partícula y homogeneidad de la mezcla son las apropiadas para realizar la posterior alimentación al biodigestor.

El tanque de mezcla y alimentación es de plástico de polipropileno y tiene una capacidad de 130 litros en volumen.



**Figura 3-4:** Tanque de mezcla y alimentación

### **Bomba de alimentación y recirculación**

La bomba de alimentación y recirculación es una bomba centrífuga la cual se encuentra conectada a la entrada del biodigestor y tiene dos posibles fuentes de succión: el tanque de alimentación o la recirculación del mismo biodigestor.

La bomba centrífuga de impulsor abierto es de marca WEG con una potencia de  $\frac{3}{4}$  HP y rendimiento del 65.10%. Las conexiones de entrada y de salida son de 1  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{3}{4}$ ", respectivamente.



**Figura 3-5:** Bomba de alimentación y recirculación

### 3.3.2. Reactor

El reactor es el equipo más importante dentro del proceso de digestión anaerobia, ya que en el mismo se dan las condiciones necesarias para que la digestión se pueda llevar a cabo. El reactor utilizado en este proyecto es de acero y posee un volumen de  $0.6 \text{ m}^3$ , el mismo se encuentra recubierto con fibra de vidrio con la finalidad de aislar el interior del reactor y mantener la temperatura interior lo más constante posible. El reactor cuenta con conexiones para afluente, efluente, recirculación de la mezcla reactiva, salida de gas, salida de lodos; conexiones para los equipos de control como son sensores de nivel y temperatura, manómetros para el control de la presión al interior del mismo, y válvula de seguridad.



**Figura 3-6:** Reactor

### **Intercambiador de calor**

El intercambiador de calor utilizado en la planta piloto de digestión anaerobia, es un intercambiador de tubo y carcasa. Este intercambiador de calor permite mantener la temperatura de operación del biodigestor en un valor constante, aspecto fundamental para el desarrollo, crecimiento y actividad de las bacterias al interior del mismo.

El intercambiador de calor de tubo y carcasa utilizado en la planta piloto de digestión anaeróbica se encuentra conformado por un tanque de agua y tubería de cobre en su interior, en forma de serpentín, adicionalmente, se tiene una resistencia eléctrica para el calentamiento del agua. La resistencia eléctrica presenta conexiones con el sistema de control de temperatura, de modo que si se produce un descenso en la temperatura al interior del biodi-

## Métodos Experimentales

---

gestor, este inmediatamente se activará incrementando la temperatura de operación y viceversa.



**Figura 3-7:** Intercambiador de calor

### 3.3.3. Tratamiento del Biogás

#### **Filtro para eliminación de H<sub>2</sub>S**

El filtro para eliminación de H<sub>2</sub>S, es uno de los componentes del proceso de purificación del biogás, el cual tiene como función principal eliminar o reducir las trazas de H<sub>2</sub>S presentes en el biogás obtenido. Este filtro se encuentra constituido por un cilindro de PVC, de 41cm de longitud y 11cm de diámetro, en su interior contiene limaduras o esponjas de hierro y se encuentra sellado por dos tapones en cada uno de sus extremos.

El biogás pasa a través del filtro en forma descendente.

#### **Filtro de carbón activado**

El filtro de carbón activado permite remover pequeñas cantidades de H<sub>2</sub>S remanentes en el biogás, y a la vez permite reducir la humedad y los olores que posee el mismo. Este se encuentra constituido por un cilindro de PVC, de 41cm de longitud y 11cm de diámetro, en

## Métodos Experimentales

---

su interior contiene carbón activado granular (CAG) y se encuentra sellado por dos tapones en cada uno de sus extremos.

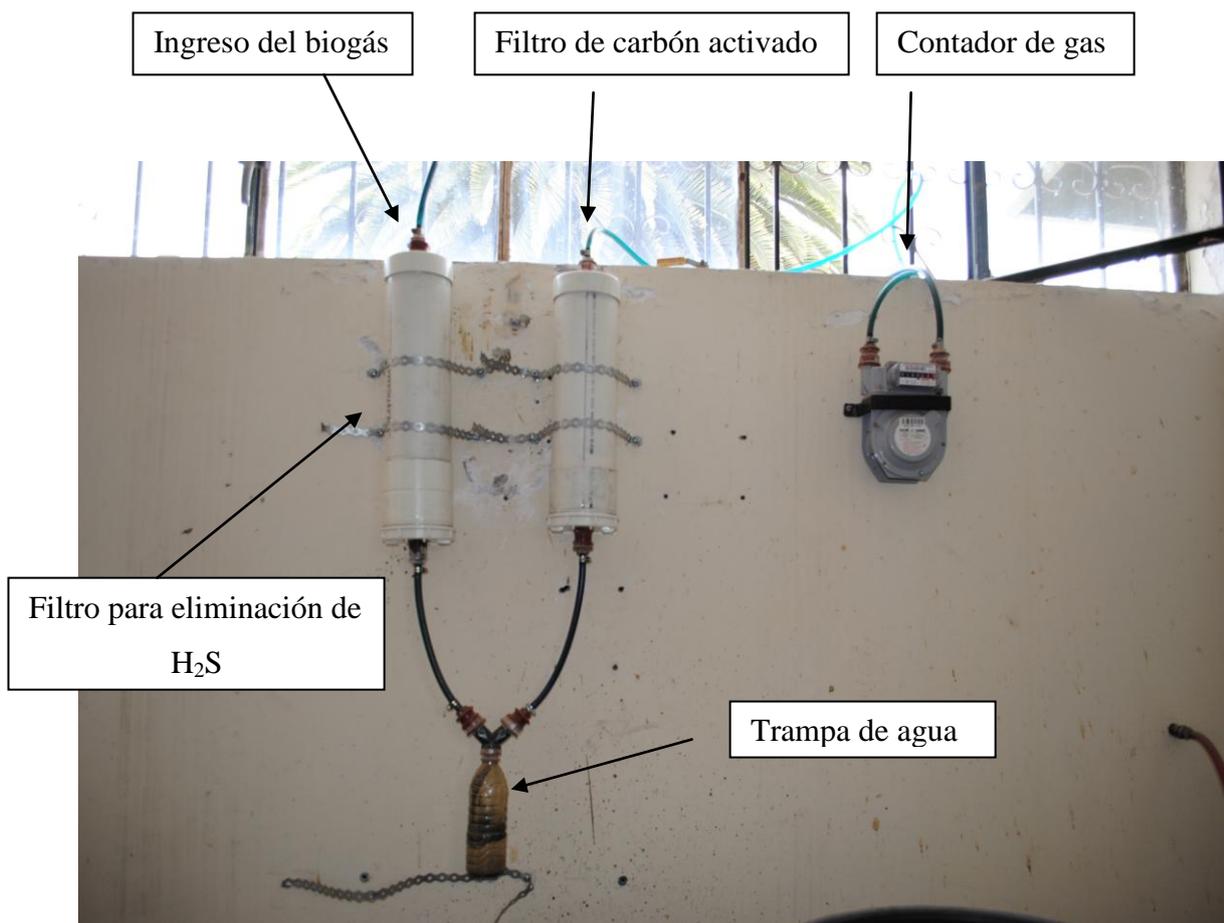
### **Trampa de agua**

La trampa de agua tiene como función principal retener los condensados, principalmente agua, provenientes del filtro de limaduras de hierro y del filtro de carbón activado. Esta se encuentra constituida por una T y por una botella plástica.

### **Contador de gas**

El contador de gas permite llevar un seguimiento continuo de la cantidad de biogás producido diariamente en litros. La marca del mismo es KEUK DONG, modelo G1.6 de tipo Diafragma.

En la Figura 3-8 se presenta una foto del sistema de tratamiento de biogás.



**Figura 3-8:** Proceso de tratamiento de biogás

#### 3.3.4. Tratamiento del Fertilizante Orgánico (biol)

##### **Estufa**

Para estabilizar el fertilizante orgánico (biol) obtenido del proceso de digestión anaeróbica, se realiza un proceso térmico en el cual se garantiza que el biol fresco y almacenado por un período determinado de tiempo sea libre de microorganismos patógenos. Para la realización de este tratamiento térmico se utiliza una estufa de secado y esterilización, marca FANEM, modelo 315 SE. El voltaje a la cual puede operar la estufa es de 110V y permite alcanzar las temperaturas deseadas, en este caso 70 °C, durante un período de 40 minutos.



**Figura 3-9:** Estufa

### **Tanques de almacenamiento para biol**

El almacenamiento del fertilizante orgánico (biol) se lo hace en tanques de plástico de polipropileno, de 55 galones y 35 galones de volumen. Los tanques se deben encontrar cerrados en todo momento, y solo deben ser abiertos para la introducción de más fertilizante orgánico, o para su envasado en galoneras o canecas.



**Figura 3-10:** Tanques de almacenamiento para biol

### **Bomba manual**

La bomba manual tiene como función principal transvasar el fertilizante orgánico (biol), desde sus recipientes de almacenamiento hacia las canecas en las cuales se hará la entrega posterior del mismo.



**Figura 3-11:** Bomba manual

### 3.3.5. Equipos de Control

Los diferentes equipos que se emplearon para el control y monitoreo continuo de la planta piloto durante su funcionamiento se mencionan a continuación. Estos sistemas permiten conocer y controlar de manera precisa parámetros de operación fundamentales para el correcto desempeño de todo el sistema.

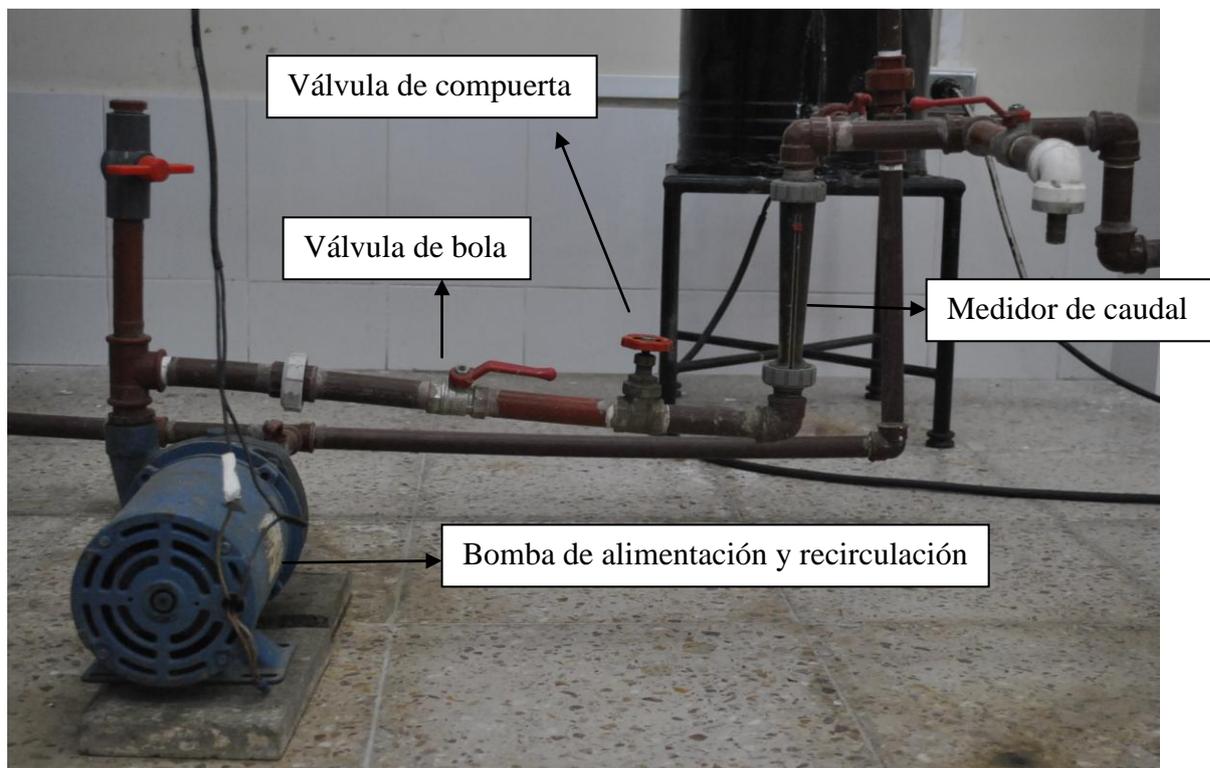
#### **Sistema de alimentación y recirculación**

El medidor de caudal nos permite conocer la cantidad de fluido que pasa a través de la tubería de entrada al digestor por unidad de tiempo, permitiéndonos tener un control continuo sobre el caudal de recirculación o alimentación. A través del mismo se puede regular el

## Métodos Experimentales

caudal que se desea alimentar o recircular con la ayuda de una válvula de globo ubicada a la salida de la bomba.

El medidor de caudal es de marca Blue – White de  $\frac{3}{4}$ "", de modelo F45750LHN-12, con una capacidad de medición de caudal de entre 1-10 GPM (galones por minuto) o 0.4-40 LPM (litros por minuto). El material del cual se encuentra compuesto el medidor de caudal es poly-sulfone.



**Figura 3-12:** Medidor de caudal

### Control de temperatura

La temperatura en el interior del biodigestor se la monitorea a través de un sistema de control automático, el cual tiene como función principal indicarnos constantemente la temperatura interna del reactor y en caso de sobrepasar los límites inferiores o superiores, hacer los cambios correctivos. El sistema de control permite mantener la temperatura interna del biodigestor lo más constante posible. Si se registra un decrecimiento en la temperatura de

## Métodos Experimentales

---

operación, el sistema de control inmediatamente enciende la resistencia del intercambiador de calor, apagándose solamente cuando se ha alcanzado la temperatura deseada.

El controlador automático de temperatura instalado es de marca Full Gauge, modelo MT-543Ri. El voltaje al cual puede operar es de 115 o 230 V, puede monitorear temperaturas desde los -99 a 300°C y posee una alarma para alertar cualquier error en el sistema. El controlador es del tipo PID y su interface es del tipo PLC. Tiene un sensor de temperatura tipo RTD (Resistive temperature device) de modelo PT100, 6" de largo y ¼" de diámetro, el cual está construido en acero inoxidable. El sensor se encuentra ubicado en la parte media del reactor.



**Figura 3-13:** Intercambiador de calor.

### **Control de nivel**

Lo que se busca con el control de nivel es mantener el líquido en el interior del biodigestor dentro de un rango de máximos y mínimos que en caso de no cumplirse generaran el apagado inmediato de la bomba, para evitar daños en la misma. Un exceso de fluido dentro del biodigestor podría generar una fuga de líquido por la tubería destinada al biogás, además de la reducción de área para el gas generado. Mientras que una deficiencia de

## Métodos Experimentales

---

líquido dentro del biodigestor puede generar la succión de aire y gas hacia la bomba y dañar el equipo.

El control de nivel es un sistema de marca Warrick, serie 16M, el cual funciona con tres varillas de acero con una conductividad de 10 Kilo-Ohms, V120 AVC. Junto con electrodos de marca Warrick, cuerpo en SS316, toma roscada de 3/8" NPT y presión 400 psi. Estos electrodos están conectados a las varillas de diferentes alturas en el biodigestor y marcan el nivel mínimo y máximo contenido en el interior del reactor por medio de la conductividad.

### 3.4. Análisis Físico – Químicos

Los análisis físico - químicos que se realizan a lo largo de la operación de la planta piloto, permiten conocer y evaluar de manera inmediata el estado en el cual se encuentra el proceso de digestión anaerobia y la calidad de los productos obtenidos.

#### 3.4.1. Medición de pH

El pH es un parámetro muy importante en el proceso de digestión anaerobia, ya que brinda una idea de la interacción de los microorganismos en el proceso. Si se tienen valores de pH ácidos quiere decir que la actividad de las bacterias generadoras de ácidos (acidogénicas y acetogénicas) principalmente, es mayor a la actividad de las bacterias generadoras de metano (metanogénicas), producto ya sea de una sobrecarga en la alimentación de materia orgánica hacia el biodigestor o cambios bruscos y prolongados en la temperatura. No se debe olvidar que la velocidad de crecimiento y la resistencia a cambios de las bacterias metanogénicas es menor al de los demás microorganismos al interior del biodigestor.

Para asegurar un adecuado funcionamiento del proceso de digestión anaerobia es importante mantener la mezcla reactiva, en un rango de pH de 6.5 – 7.5.

En la operación de la planta piloto se presta principal atención al pH de la mezcla de alimentación al biodigestor y a la mezcla reactiva dentro del biodigestor. Con estas mediciones lo que se busca es mantener el pH de la mezcla reactiva en un rango muy estrecho y cercano al pH neutro. Para lo cual no se ingresa una alimentación con valores de pH muy ácidos, ya que esto podría afectar la estabilidad del sistema; simultáneamente, se controla el pH de la mezcla reactiva para conocer el estado en el que se encuentra el biodigestor y evitar la producción excesiva de ácidos, si es el caso.

El equipo utilizado para la medición de pH es un medidor marca OAKTON pH/mV/C Meter pH 100 series.

#### 3.4.2. Sólidos Totales

Los sólidos totales o (TS), por sus siglas en inglés, se refieren al peso del material seco remanente, después de un proceso de secado a 105 °C por 24 horas o hasta que no se encuentra pérdida de peso [16]. Este valor es importante, ya que con el mismo podemos conocer y generar las mezclas necesarias, para alimentar al biodigestor. Este dato se obtiene a través del método 2540B del Standard Methods [16].

Los sólidos totales se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

## Métodos Experimentales

---

$$TS_{\%} = \frac{m_1}{m_0} * 100 \quad [\%] \quad \text{Ec. 3-3}$$

$$TS_{g/L} = \frac{m_1}{m_0} \cdot \rho \quad [\text{g/L}] \quad \text{Ec. 3-4}$$

donde:

$m_0$ : masa de la muestra inicial	[g]
$m_1$ : masa de la muestra seca	[g]
$\rho$ : densidad de la muestra	[g/L]

### 3.4.3. Sólidos Totales Orgánicos

Los sólidos volátiles o sólidos totales orgánicos se refieren a la parte de los sólidos totales, que se volatilizan durante la calcinación a una temperatura de 550 °C. En teoría, los sólidos volátiles contienen todos los compuestos orgánicos que pueden oxidarse. Los sólidos totales orgánicos se obtienen mediante la calcinación de la muestra seca, a partir de la cual se ha obtenido el dato de sólidos totales. A dicha muestra se la lleva a una temperatura de 550°C durante 6 horas. Posteriormente se deja enfriar la muestra calcinada hasta que alcance temperatura ambiente y se la pesa nuevamente. El método es el 2540 E. del Standard Methods [16].

Los sólidos totales orgánicos (oTS) se obtienen a partir del siguiente cálculo:

$$oTS_{\%} = \frac{m_1 - m_2}{m_0} * 100 \quad [\%] \quad \text{Ec. 3-5}$$

$$oTS_{g/L} = \frac{m_1 - m_2}{m_0} * \rho \quad [\text{g/L}] \quad \text{Ec. 3-6}$$

donde:

$m_0$ : masa de la muestra inicial	[g]
$m_1$ : masa de la muestra seca	[g]
$m_2$ : masa de la muestra calcinada	[g]
$\rho$ : densidad de la muestra	[g/L]

#### 3.4.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es un parámetro conservativo, el cual nos indica de manera indirecta la cantidad de materia orgánica degradable en una muestra. Este parámetro puede ser empleado para conocer la efectividad que tiene el proceso en la degradación de la materia orgánica y en su conversión a biogás. Si se tiene un valor determinado de DQO a la entrada del biodigestor y otro a la salida del mismo, podremos conocer qué cantidad de materia orgánica se degradó y se convirtió en biogás. Es por esta razón que los análisis se realizan con muestras provenientes de la alimentación y de la mezcla reactiva del biodigestor.

El método empleado para la determinación de la demanda química de oxígeno DQO es el método de prueba de tubo con el colorímetro marca Hach modelo DR/890; método Oxygen Demand Chemical, method 8000, del manual de Hach. Todos los pasos del método se encuentran detallados en el Anexo 2 [25].

Las muestras utilizadas para este análisis, se someten a dilución en un factor de 1:5.

#### 3.4.5. Nitrógeno

El nitrógeno al ser uno de los elementos esenciales para las plantas, así como también, elemento indispensable para el crecimiento, desarrollo y actividad de las bacterias anaeróbicas, necesita ser cuantificado, para de esta manera conocer el estado en el que se encuentran las bacterias anaeróbicas y a la vez determinar la calidad del producto obtenido, en nuestro caso fertilizante orgánico. Adicionalmente, es importante mantener un nivel óptimo en la concentración de nitrógeno. Un contenido alto de nitrógeno causa una toxicidad por una indebida generación de amoníaco [9].

Para la cuantificación de nitrógeno total ( $N_{total}$ ) se emplea el método de la prueba de tubo, con el colorímetro marca Hach modelo DR/890; método Nitrogen Total (10 a 150 mg/L N), method 10072 del manual Hach [25]. Las muestras a analizar se tomaron de la descarga del biodigestor, es decir, la mezcla reactiva del mismo. Dichas muestras se someten a dilución en un factor de (1:200). Los pasos del método se encuentran detallados en el Anexo 3.

## Métodos Experimentales

---

### 3.4.6. Alcalinidad

La alcalinidad es un parámetro con el cual se puede conocer la estabilidad del proceso, ya que dependiendo de los valores que se obtengan de esta medición se puede saber si el biodigestor se encuentra operando de manera óptima o si presenta problemas en su operación. La alcalinidad brinda la oportunidad de emplear medidas correctivas al proceso, antes de que se perciban variaciones significativas en otros parámetros del mismo como son pH y producción de biogás.

La alcalinidad del biodigestor se mide a través del método  $Alk_{5,75}$  [26].

Los análisis se realizaron con muestras de la mezcla reactiva, obtenida directamente del biodigestor, sin tratamiento térmico. Previo análisis, la muestra debe ser sometida a centrifugación. A continuación se describe el método utilizado:

Análisis de alcalinidad:

1. Tomar 50mL de muestra centrifugada.
2. Titular la muestra con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 0.1N hasta alcanzar un pH de 5,75 (con agitación).
3. Tomar nota del volumen de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) empleado en la titulación.
4. Proceder con el cálculo

Para el cálculo de alcalinidad se emplea la fórmula del método 2320 B. del Standard Methods [16].

$$C_{CaCO_3} = \frac{A * N * 50000}{mL_{muestra}} \quad [mg \text{ CaCO}_3/L] \quad \text{Ec. 3-7}$$

donde:

A: ácido estándar utilizado [mL]

N: normalidad del ácido estándar

### 3.4.7. Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

Los ácidos grasos volátiles son los precursores principales para la formación de metano y los que determinan la existencia o no de acidificación en el proceso. Llevar un seguimiento y control de la relación existente entre ácidos volátiles/alcalinidad permite conocer si la

## Métodos Experimentales

operación del biodigestor se encuentra dentro de los parámetros requeridos y si su funcionamiento es óptimo.

Los ácidos grasos volátiles (AGV), se determinaron a través del método 5560 C. del Standard Methods [16]. El cálculo de la concentración de los ácidos grasos volátiles en términos de ácido acético se efectúa con la siguiente fórmula:

$$C_{AGV,ac.acetico} = \frac{V_{NaOH} * N * 60000}{V_{muestra} * f} \quad [\text{mg AGV/ L}] \quad \text{Ec. 3-8}$$

donde:

$V_{NaOH}$ :	Volumen de hidróxido de sodio	[mL]
$V_{muestra}$ :	Volumen de muestra	[mL]
N:	normalidad de hidróxido de sodio	[eq·soluto/ Lsolución]
f:	factor de recuperación	[-]

Para la obtención del factor de recuperación se procede con el método 5560 C. del Standard Methods [16].

### 3.4.8. Coliformes Totales y Echerichia Coli (E. Coli)

La cuantificación de microorganismos patógenos, coliformes totales y Echerichia Coli, se realiza con la finalidad de conocer las características patogénicas del fertilizante orgánico (biol) obtenido en el proceso y asegurar que el mismo cumpla las normas establecidas para su posterior uso y aplicación. De acuerdo a la United States Environmental Protection Agency (US EPA) la cantidad de UFC/g debe ser menor a  $2 \times 10^6$ , cuando el uso del producto fuese destinado a tierras de cultivo, bosques o ambientes similares [24].

La determinación de bacterias coliformes totales y Echerichia Coli se realiza en un medio de cultivo Chromocult Agar para coliformes marca Merck. La preparación del medio de cultivo se la realiza de la siguiente manera:

La cantidad de polvo de Chromocult, según las instrucciones, es de 26,5 g en 1 L de agua desmineralizada. Entonces, se toma la cantidad de agua requerida para el experimento, teniendo en cuenta que el volumen de una caja petri, en la cual se va a hacer el medio de

## Métodos Experimentales

---

cultivo, es de aproximadamente 25 mL. Una vez tomada la cantidad de agua desmineralizada requerida se envía a autoclave, posteriormente se enfría durante unos pocos minutos y se agrega la cantidad de polvo de Chromocult de acuerdo al volumen de agua que se tiene. Se debe mantener constante agitación para beneficiar la disolución. Finalmente se vierte la mezcla en cajas petri, antes de que la mezcla llegue a temperatura ambiente y se vuelva una solución cristalina amarillenta. Se deja enfriar durante 5 horas para su posterior almacenamiento en refrigeración.

Los análisis realizados fueron del fertilizante orgánico (biol) post tratamiento térmico. Las muestras fueron diluidas en agua peptonada, en un factor de ( $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ).

Una vez que se tiene el medio de cultivo y la muestra a analizar se procede de la siguiente manera:

### **Método:**

1. Tomar 0.1 mL de muestra e inocular en caja petri preparada con Agar Chromocult (cada muestra se realiza por duplicado).
2. Rastrillar la muestra inoculada con espátula de Drigalsky.
3. Incubar la muestra a 35 – 37 °C durante 24h.
4. Contabilizar las colonias obtenidas de coliformes totales y Echerichia Coli (E. Coli)
5. Calcular el número promedio de unidades formadoras de colonia por gramo (UFC/g), mediante el siguiente cálculo:

$$UFC = \text{Número de colonias promedio en placas} * \text{Dilución} \quad [\text{UFC/g}] \quad \text{Ec. 3-9}$$

### 3.4.9. Propiedades Antimicóticas

El fertilizante orgánico, además de presentar características y cualidades fertilizantes de excelentes resultados en la aplicación agrícola, permite reducir o eliminar el desarrollo de hongos patógenos debido a la elevación de pH [2]. Con la finalidad de cuantificar la capacidad antifúngica del fertilizante orgánico (biol) se realizaron análisis en diferentes plantas para observar si se detecta un decrecimiento o eliminación del crecimiento de hongos, al aplicar el fertilizante orgánico en las mismas. Las plantas utilizadas para estos análisis fueron de cultivos de chirimoya, aguacate, maíz, frejol y papa. Todas las plantas empleadas en este experimento mostraban síntomas de la presencia de algún tipo de hongo.

## Métodos Experimentales

---

El medio de cultivo en el cual se inoculó los diferentes tipos de hongo fue Sabouraud Dextrose Agar marca Difco. La preparación del medio de cultivo se realiza de la siguiente manera:

De acuerdo a las instrucciones de Sabouraud Dextrose Agar marca Difco, se deben emplear 65 g del polvo en 1L de agua desmineralizada. Dependiendo del volumen de agua con el que se desea trabajar, se agrega la cantidad de polvo necesaria y se agita. Posteriormente la mezcla se envía a autoclave y una vez terminado el proceso se enfría la solución para agregar antibiótico, en este caso Gentamicina marca MK, para evitar el crecimiento de bacterias.

Luego se vierte la solución en cajas petri.

Una vez preparados los medios de cultivo se procede con los análisis requeridos para el estudio, las diferentes pruebas y los métodos empleados para determinar la capacidad anti fúngica del fertilizante orgánico (biol) se detallan en el Anexo 4.

### 3.4.10. Prueba de Gas

El proceso de digestión anaeróbica, al ser considerado un medio para la obtención de una energía renovable y alternativa a los hidrocarburos, presenta como principal actor y producto del proceso al biogás. Es por esto, que mantener un riguroso control y monitoreo sobre el mismo es más que necesario, ya que además de ser el producto principal de este proceso es un indicador del estado en el que se encuentra operando el biodigestor.

La prueba de gas permite conocer la calidad del biogás, y si este es apto para ser empleado en equipos de generación de energía eléctrica.

Existen dos tipos de pruebas a las que fue sometido el biogás para conocer la calidad del mismo: una prueba cualitativa y otra cuantitativa. La prueba cualitativa es la combustión del biogás en una llama. En esta prueba se procede a encender el biogás resultante del proceso de biodigestión y observando características como el color de la llama y capacidad para mantenerse encendida, se puede deducir el estado del biogás resultante y del biodigestor.

Por otro lado, la prueba cuantitativa es la absorción del CO<sub>2</sub>. En esta prueba se procede a hacer burbujear una cantidad conocida de biogás a través de una solución de hidróxido de sodio, NaOH al 4%, contenida en un volumen también conocido. El metano al ser insolu-

## Métodos Experimentales

---

ble en la solución desplaza al líquido mientras el  $\text{CO}_2$  se absorbe en la misma y se obtiene el volumen de metano con el cual se puede conocer el porcentaje del mismo en el biogás.

#### **4. Resultados y Discusión**

Los resultados obtenidos durante la optimización del biodigestor a escala piloto, en un periodo de operación de 272 días se detallan a continuación.

Después de haber atravesado las etapas de puesta en marcha y la operación misma del biodigestor, junto con el correcto funcionamiento de todos los equipos, se procede a realizar el incremento paulatino del flujo volumétrico que ingresa al biodigestor y de esta manera reducir los tiempos de residencia al interior del mismo. Todos estos cambios van acompañados de un ascenso en los valores de producción de biogás, así como también de la producción de fertilizante orgánico.

Manteniendo un control estricto sobre ciertos parámetros como pH, alcalinidad, ácidos grasos volátiles y producción de biogás, se puede descifrar el estado del biodigestor. Mientras que, por otro lado, monitoreando y dosificando parámetros como volumen de alimentación, recirculación, tiempo de retención y aditivos, podemos asegurar el buen funcionamiento del biodigestor. Combinando y equilibrando todos los parámetros antes mencionados se logra la optimización del sistema.

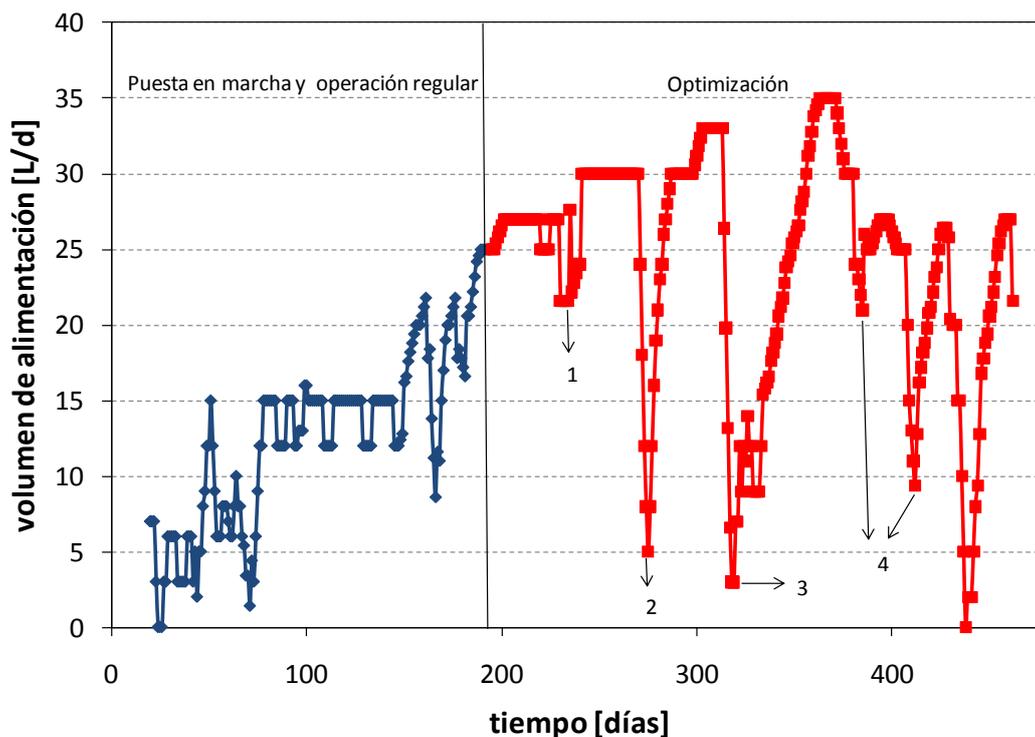
Obviamente todos estos controles se ven sujetos a los contratiempos y eventualidades que pueden surgir durante la operación de una planta piloto por lo que no siempre se tendrá una operación perfecta ni tablas con resultados ideales, existirán fluctuaciones marcadas en algunos de los resultados que indiquen la existencia de dichos contratiempos.

##### **4.1. Resultados obtenidos en la Optimización de la Planta Piloto**

La optimización del biodigestor a escala piloto, se logra manteniendo constante algunos de los parámetros de operación y variando otros.

Al recibir un proceso el cual se encontraba operando de manera adecuada, parámetros como temperatura, pH y recirculación se mantenían dentro de un rango específico, el objetivo de esta tesis es encontrar las condiciones óptimas de operación dentro de los rangos establecidos para estos parámetros.

## Resultados y Discusión



**Figura 4-1:** Volumen de alimentación con respecto al tiempo de operación del biodigestor

En la Figura 4-1 se observa el ritmo con el que se alimentó el biodigestor a escala piloto durante todo su periodo de operación, desde la puesta en marcha hasta su optimización. Se puede observar que existen grandes oscilaciones en la alimentación a lo largo del tiempo, generadas principalmente por contratiempos existentes durante la operación de la planta piloto o simplemente por medidas correctivas tomadas para la estabilización del proceso. La etapa de optimización inicia en el día 195 y finaliza en el día 467. Este estudio se focaliza en la operación efectuada durante la etapa de optimización.

El primer periodo (1) en el cual se observa un ligero descenso en la cantidad de materia orgánica alimentada al biodigestor, se da entre los días de operación 230-240, este cambio en la alimentación al biodigestor se debe a la existencia de problemas operativos con la bomba centrífuga, por lo que se decide reducir la alimentación al biodigestor y reparar el daño existente en el equipo antes mencionado. La bomba centrífuga es empleada en el biodigestor para la alimentación de materia orgánica y la recirculación de la misma al interior del reactor.

## Resultados y Discusión

---

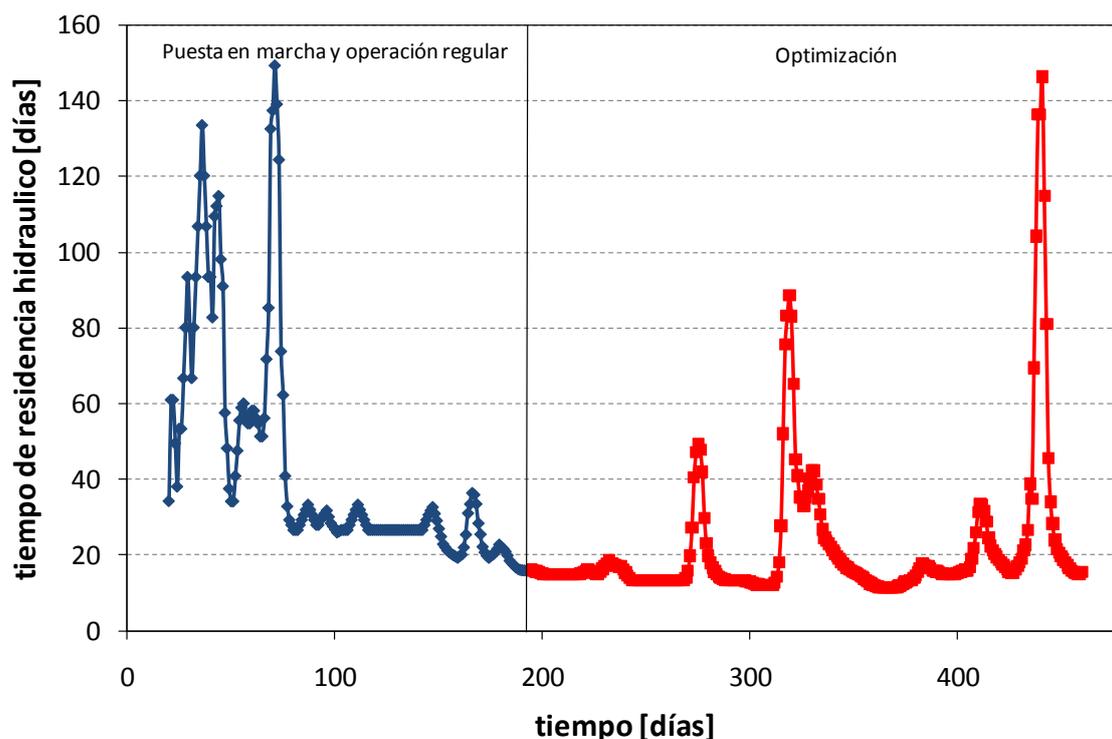
Entre los días de operación 270-287 período (2), se puede observar otro descenso en la cantidad de materia orgánica alimentada hasta 5 L/d y un ascenso posterior paulatino hasta alcanzar nuevamente valores de 30 L/d de alimentación. Durante este período de operación se detiene la alimentación al biodigestor, ya que la mezcla reactiva presenta un descenso significativo en los valores de pH como se muestra en la Figura 4-5 y un exceso de carga de aditivo al mismo.

En los días 313-360 (3) se observa un descenso más pronunciado que en los períodos anteriores, esto se debe a que se realizaron reparaciones en los filtros de gas por lo que se decide detener la carga al biodigestor y, posteriormente, se tuvieron cortes de energía eléctrica, externas al proceso de digestión anaeróbica por lo que nuevamente se detiene la alimentación al biodigestor. Una vez que se logra alcanzar nuevamente la operación normal de la planta piloto se puede observar que se alcanzan valores máximos en el ritmo de alimentación de materia orgánica alcanzándose un valor máximo de 35 L/d de alimentación entre los días 363-371.

Entre los días 380-425 (4) se observan dos descensos en los valores de volumen de alimentación al biodigestor. Estos descensos se dieron principalmente por el desabastecimiento de materia orgánica que se tuvo en esos días. El proveedor de materia prima vegetal no llevó a cabo la entrega del producto. Por lo que se procedió a detener la alimentación al biodigestor. Nuevamente esta detención en la carga de alimentación al biodigestor se da por motivos ajenos al proceso de digestión anaeróbica.

Finalmente, en los días de operación 425-467 se observa el descenso más grande de todos en la cantidad alimentada al biodigestor. Este descenso tan significativo se da nuevamente debido a los bajos valores de pH que presenta el sistema, por lo que se detiene por completo la carga al biodigestor durante varios días. De esta manera se permite que el proceso de digestión anaerobia se estabilice nuevamente.

## Resultados y Discusión



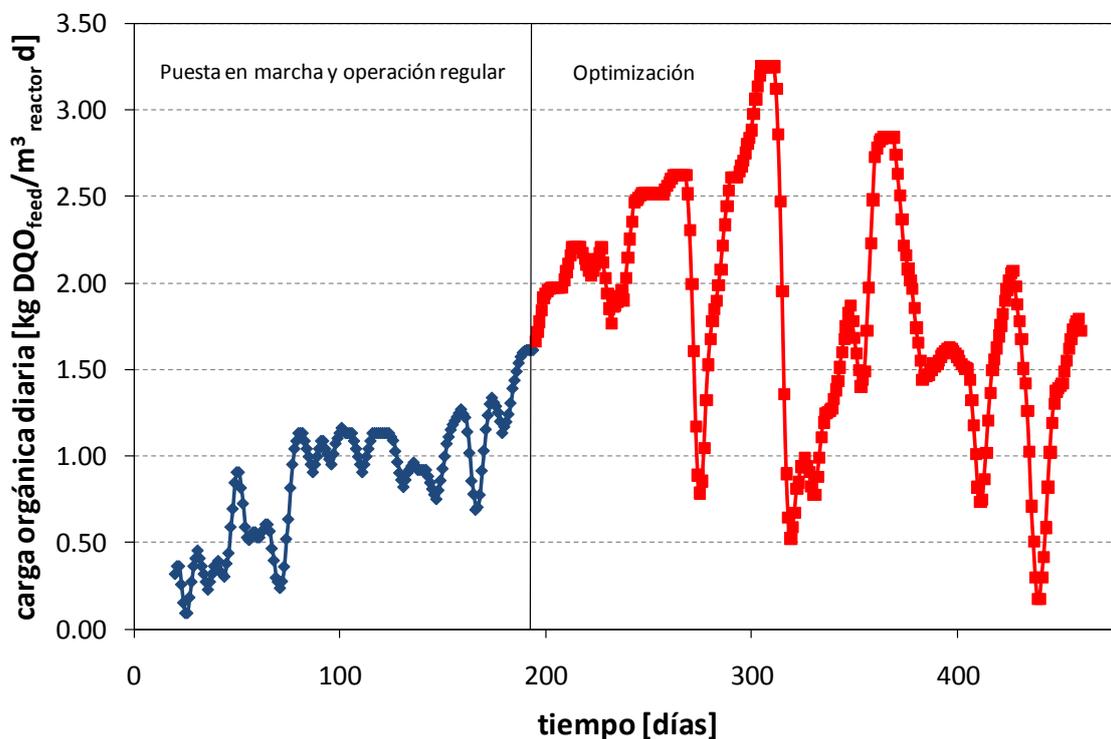
**Figura 4-2:** Tiempo de residencia hidráulico con respecto al tiempo de operación del biodigestor

En la Figura 4-2 se puede observar el tiempo de residencia hidráulico de la mezcla reactiva durante los 502 días de funcionamiento del biodigestor, de los cuales 272 se destinaron a la optimización del mismo. Como se puede observar se intentó reducir el tiempo de residencia, pero no se logró alcanzar una tendencia marcada. Se tienen grandes oscilaciones las cuales indican la poca, o en algunos casos, la inexistente alimentación al biodigestor. Estas detenciones de alimentación o carga de materia orgánica al biodigestor fueron ocasionadas en algunos casos por problemas externos como fallas eléctricas o mecánicas de alguno de los equipos o el desabastecimiento de materia orgánica para la alimentación, o en otros casos por problemas internos del proceso, teniendo la ausencia de alimentación de materia orgánica como medida correctiva para incrementar los valores de pH y de esta manera estabilizar el sistema.

En esta figura se puede observar que el tiempo de residencia mínimo alcanzado durante la operación del biodigestor es de 11.5 días.

## Resultados y Discusión

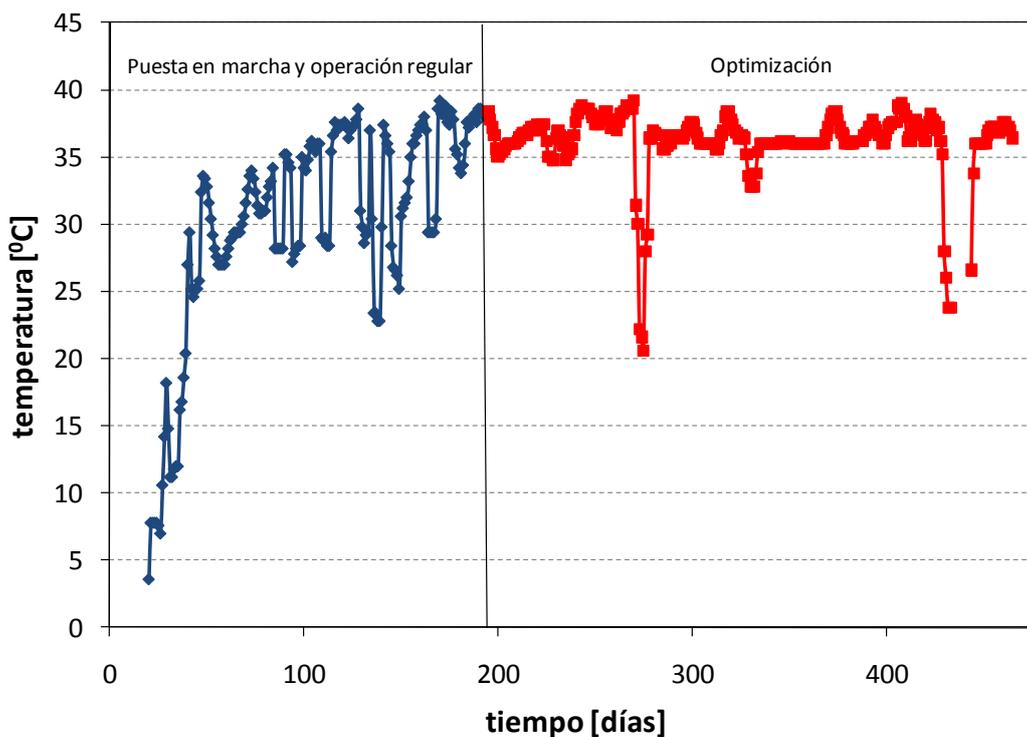
Un tiempo de residencia menor a 20 días representa un proceso de digestión anaeróbica eficiente, y como se puede observar en la Figura 4-2 el mayor tiempo de operación se mantuvo por debajo de este rango.



**Figura 4-3:** Carga orgánica diaria con respecto al tiempo de operación

En la Figura 4-3 se puede observar la carga orgánica diaria, la cual presenta un comportamiento muy similar al de volumen de alimentación. Estos dos parámetros se encuentran estrechamente relacionados y las diferentes variaciones que se observan en la figura pueden ser explicadas con aquellas que se dan en el caso del volumen de alimentación, junto con sus causas. La carga orgánica alcanzada es de 3.25 kgDQO<sub>feed</sub> / m<sup>3</sup> reactor d, pero no se pudo mantener esta carga constante.

## Resultados y Discusión



**Figura 4-4:** Temperatura con respecto al tiempo de operación del biodigestor

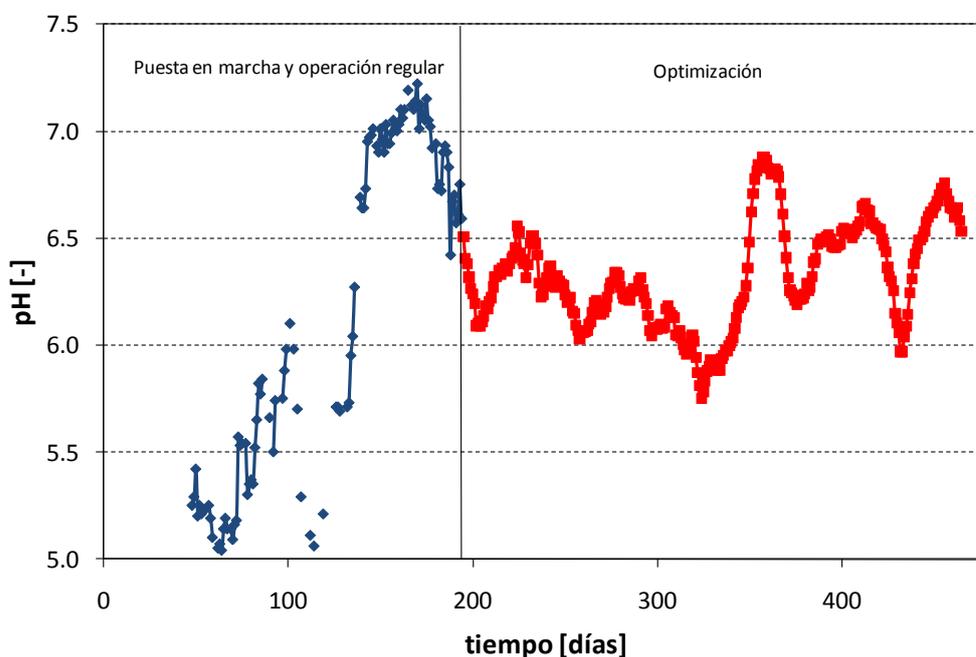
La temperatura, al ser uno de los parámetros de operación más importantes dentro del proceso de digestión anaerobia fue controlada diariamente de manera automática para mantenerla lo más constante posible. Se evitó tener cambios bruscos y prolongados de temperatura, ya que los mismos pueden ocasionar un desbalance en el sistema y por ende su mal funcionamiento. Durante los 272 días de optimización se procuró mantener la temperatura de operación del biodigestor en un promedio de  $36\text{ °C} \pm 2$ . Al contar con un medio aislante y con un intercambiador de calor de tubos y carcasa en forma de serpentín conectado a un circuito de control automático, la temperatura se logró mantener casi constante durante gran parte de la operación. Las diferentes oscilaciones que se pueden observar a lo largo del período de operación se deben, en el caso de los incrementos de temperatura, principalmente a taponamientos en la bomba centrífuga, la cual aporta calor al sistema. Los puntos mínimos se deben a interrupciones en la operación del sistema, ya sea por cortes eléctricos o fallas electro mecánicas, lo que origina que las temperaturas desciendan considerablemente. Además, mientras se detiene la operación de la planta piloto no se puede tener un registro de la temperatura debido a que el sistema se encuentra apagado y no se obtienen datos del controlador, sino hasta que se reinicia nuevamente la operación del biodigestor.

## Resultados y Discusión

En la Figura 4-4 podemos observar que la temperatura máxima que se alcanza durante los 272 días de optimización es de 39 °C y el mínimo es de 21 °C. Siendo los descensos de temperatura los más riesgosos dentro de la operación, los cuales se dan de manera más abrupta y pronunciada que los ascensos.

La agitación o recirculación del material orgánico que se encuentra en el interior del biodigestor se realiza con la finalidad de permitir un mayor contacto entre el sustrato orgánico y los microorganismos contenidos en el interior del reactor, beneficiando de esta manera a la generación de biogás, preservación de la temperatura y homogeneización de la materia orgánica.

La agitación o recirculación que se dio al proceso fue a través de un flujo ascendente en el biodigestor, el cual se mantuvo en un valor de 8 L/min y una velocidad ascendente en el reactor de 1 m/h.



**Figura 4-5:** Valores de pH con respecto al tiempo de operación del biodigestor

En la Figura 4-5 se presentan los valores de pH de la mezcla reactiva. Desde el día 195 hasta el 350 se puede observar que el pH al cual se encuentra el reactor es menor a 6.5, lo cual no es óptimo al momento de operar un biodigestor. Esta baja en el pH se da debido a la sobrecarga de material orgánico al biodigestor. Los pocos picos que se pueden observar

## Resultados y Discusión

---

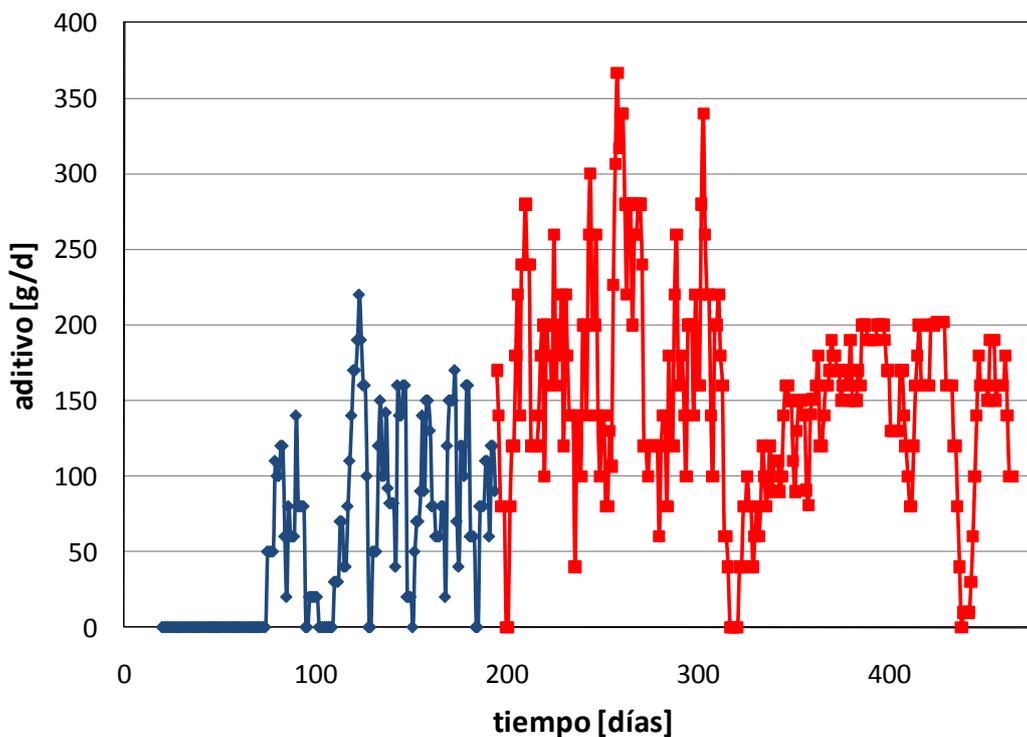
en este periodo de tiempo, los cuales sobrepasan un valor de pH de 6.5, se deben principalmente a la adición de cal de manera más continua y en mayor cantidad.

El punto más bajo dentro de este periodo se da en el día de operación 323. Este descenso se debe al repentino incremento de alimentación al biodigestor, después de haber permanecido sin alimentación de materia orgánica y sin aditivo los cinco días previos. Esta detención de cinco días en la alimentación de materia orgánica se la realiza al observar que se tienen volúmenes de alimentación muy altos, 33L/d, y valores de pH muy bajos. Posteriormente se puede ver un incremento en los valores de pH al reducir la cantidad de materia orgánica alimentada, la cual se incrementa de manera lenta y pausada, junto con la adición diaria de cal lo que beneficia de manera directa al incremento del pH. Este incremento presenta un máximo en el día 359 con un pH de 6.96 y vuelve a descender paulatinamente hasta un pH de 6.1, este descenso se debe al exceso de carga existente en el biodigestor con volúmenes de 30 a 35 L/d. Este periodo de fluctuación en el pH se da entre los días de operación 350-377.

Después del día 377 se observa nuevamente un ascenso en los valores de pH, resultado de la reducción de carga de material orgánico hacia el biodigestor. Desde el día de operación 377- 434 se observa el mismo comportamiento que en la etapa anterior: incremento de pH al reducir la carga orgánica al biodigestor y descenso de pH al incrementar la carga. Los mínimos y máximos que se alcanzan en esta etapa son pH de 5.81 y 6.76, respectivamente. El incremento en el volumen de alimentación en este descenso de pH es de 25 a 30 L/d. Este descenso tan abrupto en los valores de pH se debe principalmente a que los días previos a esta etapa se tienen volúmenes de alimentación muy altos entre 30 y 35 L/d y en ningún momento se detiene o reduce considerablemente la cantidad de materia orgánica alimentada al biodigestor, lo que no permitió al proceso estabilizarse o recuperarse por completo y de esta manera alcanzar valores de pH neutros.

Después del día de operación 434 se detiene nuevamente por completo la alimentación al biodigestor y se realiza un incremento sistemático y paulatino de la carga al mismo, por lo que se tiene nuevamente un incremento en los valores de pH. En el día de operación 458 se alcanza un pH máximo de 6.88 y desde el día 444 hasta el día 467 se mantienen los valores por encima de 6.5 con un volumen máximo de alimentación de 27L/d.

## Resultados y Discusión



**Figura 4-6:** Aditivo agregado al proceso con respecto al tiempo de operación del biodigestor

Durante la operación de la planta piloto se empleó como aditivo cal apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), con la finalidad de incrementar los valores de pH del sistema. Este aditivo fue empleado en esta investigación, ya que después de haber realizado varias pruebas a escala de laboratorio y en la planta piloto, se observó de manera irrefutable que la cal era la más adecuada para emplear en el proceso de digestión anaerobia, considerando que presenta las mejores características en cuanto a cantidad, efectividad y costo [27].

La cantidad de aditivo empleado en el proceso se encuentra directamente relacionado con el pH de la carga orgánica alimentada y con el pH de la mezcla reactiva en el biorreactor. En muchas ocasiones el material a ser alimentado presenta valores de pH muy bajos, así como también en otras ocasiones el pH del sistema es el que presenta valores bajos, por lo que se procede a ingresar la alimentación con aditivo. Generalmente, si se tienen valores de pH, en la alimentación, menores a 6 se agrega aditivo hasta alcanzar valores de pH superiores a 7. De igual manera si la mezcla reactiva presenta valores de pH inferiores a 6.5 se añade más aditivo a la alimentación. Obviamente, al momento de agregar aditivo a la ali-

## Resultados y Discusión

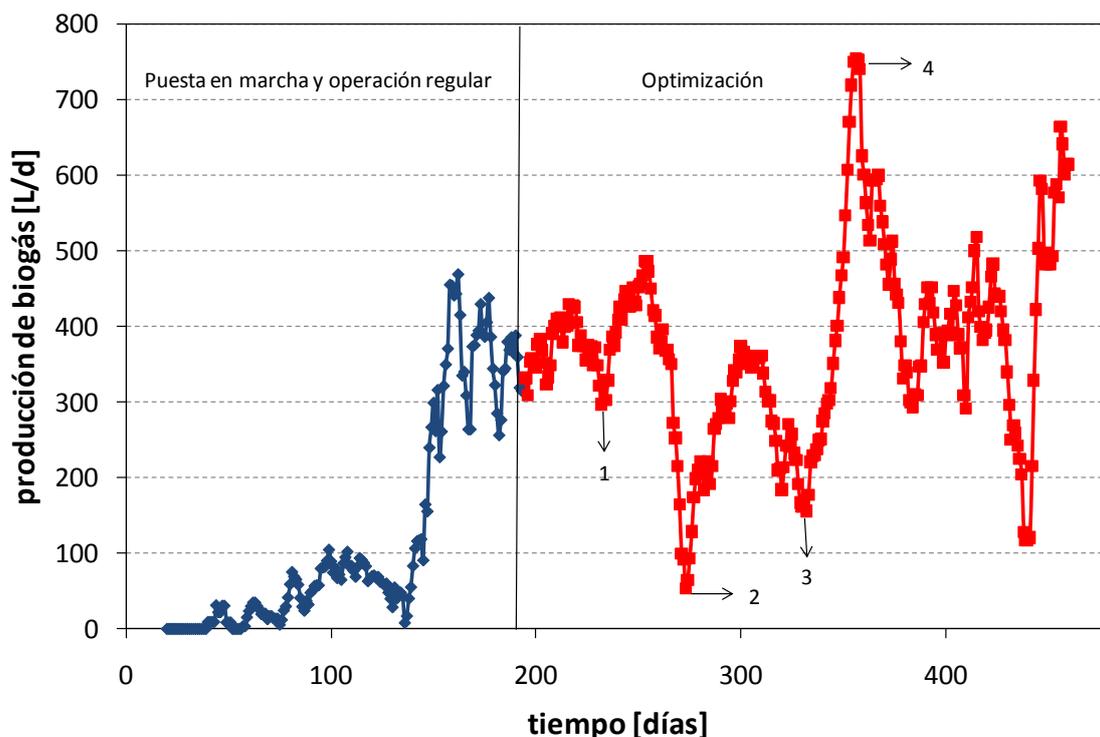
---

mentación se debe observar de manera conjunta los valores de pH tanto de la alimentación como de la mezcla reactiva, ya que existirán ocasiones en las cuales el pH de la alimentación se encuentre ligeramente por debajo del límite y el pH del proceso se encuentre en valores razonables ( $> 6.5$ ), situación en la cual no será necesaria la adición de cal al proceso. Otra situación en la cual se debe detener la adición de cal al proceso es cuando aun después de haber agregado aditivo al mismo, los valores de pH de la mezcla reactiva no sufren ninguna variación. Generalmente, si se agrega aditivo al proceso y no se observa un cambio significativo en los valores de pH de la mezcla reactiva de un día a otro, la tendencia es ingresar mayor cantidad del mismo sin tomar en cuenta que el aditivo agregado comienza a ser más perjudicial que beneficioso para el sistema y se puede crear un medio tóxico e inhibitorio al interior del biodigestor al sobrepasar concentraciones de ciertos elementos, como por ejemplo calcio (Ca). Otro motivo por el cual la adición excesiva de cal puede afectar al proceso, es que ésta puede generar compactación del material de alimentación lo que originará taponamiento en las tuberías y daños en la bomba.

Si no se observan cambios significativos en el pH al interior del biodigestor al emplear aditivo en el proceso, se procede a detener completamente la adición de cal y la alimentación de carga orgánica al sistema por unos días para estabilizarlo de esta manera.

En definitiva se puede decir que, los valores de aditivo agregado al sistema pueden presentar muchas variaciones a lo largo del tiempo al no ser dependientes de una sola variable, razón por la cual se observa una gran cantidad de fluctuaciones en la cantidad de aditivo agregado al sistema durante la operación del biodigestor.

## Resultados y Discusión



**Figura 4-7:** Producción diaria promedio de biogás

La eficiencia con la cual se encuentra operando un biodigestor, puede descifrarse a partir de su producción de biogás; observando características como la cantidad y calidad del biogás obtenido del proceso de digestión anaerobia.

Si se tiene un equilibrio y un correcto desempeño en todos los parámetros anteriormente observados y analizados, se tendrá como resultado una gran producción de biogás, así como también una excelente calidad del mismo. Es decir, un proceso de digestión anaerobia óptimo.

En la Figura 4-7 se puede observar la cantidad de biogás producida a lo largo de los 502 días de operación. En algunos casos se observa una alta producción de biogás. Pero se debe tener muy en cuenta la calidad del mismo. A continuación se explica de manera muy detallada las variaciones que se tiene en la producción del biogás y las razones de las mismas.

Entre los días de operación 195-265 se puede observar cierta estabilidad en la producción de biogás, con volúmenes que se encuentra entre los 300-500 L/d. En los días 216 a 239 (1) observamos un ligero descenso en la producción de biogás producto de la disminución de materia orgánica alimentada al biodigestor. Del día 265 al 273 (2) se observa un mayor

## Resultados y Discusión

---

descenso en la producción de biogás, esto se debe a que el biodigestor al exceder sus valores de cantidad de carga orgánica alimentada tiende a disminuir su pH y la calidad y cantidad producida de biogás no es la adecuada. Por lo que se decide detener la alimentación al biodigestor y de esta manera se reduce la cantidad de gas producido hasta estabilizar el sistema. Posteriormente, se observa un ascenso en la producción de biogás debido al incremento paulatino en la alimentación al biodigestor. Entre los días 300 y 332 (3) decrecen nuevamente los valores de producción de biogás debido a fugas en los filtros de tratamiento de gas y a fallas eléctricas en el proceso explicadas anteriormente, por lo que se detiene la alimentación al biodigestor hasta solucionar los problemas mencionados. Durante estos días también se registran valores de pH bajos por lo que la suspensión de carga de materia orgánica hacia el biodigestor es beneficiosa para la estabilización del sistema. A partir del día 332 hasta el día 356 (4) podemos observar un gran ascenso en los valores de producción de biogás alcanzando un máximo de producción de 755 L/d en el día de operación 356 y con una alimentación de 27L/d. Después de este máximo se observa nuevamente que los valores comienzan a decrecer de manera dramática hasta el día de operación 384, llegando a un valor mínimo de 294 L/d. Este ascenso tan pronunciado se debe principalmente a valores constantes en la temperatura (36 °C), incremento sistemático de la cantidad alimentada al biodigestor, llegando a un máximo de 27 L/d, proceso estabilizado, incremento en los valores de pH al interior del biodigestor llegando a un máximo de 6.84 y operación continua sin ningún tipo de interrupciones o contratiempos. Y el posterior descenso se debe principalmente a valores de carga orgánica que sobrepasan el óptimo, llegando a un máximo de 35L/d de materia orgánica alimentada y descenso en los valores de pH llegando a un mínimo de 6.19.

Posteriormente, en los días de operación 384-431 se puede observar una producción de biogás fluctuante, pero que se logra mantener en valores similares durante estos días de operación, existe un descenso en el día de operación 410 el cual se debe a la suspensión de alimentación de materia orgánica al biodigestor, por desabastecimiento de la materia prima. En los días posteriores se hace un incremento paulatino del material de alimentación por lo que se observa un aumento en la producción de biogás alcanzándose un valor máximo de 518 L/d en el día 415. En los días siguientes decrece nuevamente la producción de biogás, ya que en días previos se detiene la alimentación al biodigestor y se vuelve a retomar la operación del mismo de manera muy apresurada. Es decir, se incrementa la cantidad alimentada de forma muy rápida sin permitir que el sistema se estabilice y se autoregule

## Resultados y Discusión

---

por sí mismo, lo que crea un desbalance en el biodigestor, un descenso en el pH y en la producción de gas. Es por esto que, en los días 436-443 se decide detener la operación del biodigestor para de esta manera estabilizar el sistema y posteriormente reiniciar la alimentación al biodigestor de manera lenta y pausada permitiendo al sistema alcanzar los valores de pH y de producción de biogás deseados. Esta mejora se puede observar del día 443 al 463. Durante este periodo se observa una gran mejora en los valores de pH manteniéndose por encima de 6.5. Se realiza un incremento paulatino de la cantidad alimentada al biodigestor. Existen ciertos descensos en el pH y en la producción de biogás debido a que se intentó alimentar con una cantidad mayor a la óptima al biodigestor (30L/d); pero se corrige posteriormente. La temperatura durante este período no sufre variaciones bruscas y la producción de gas es elevada y va en aumento.

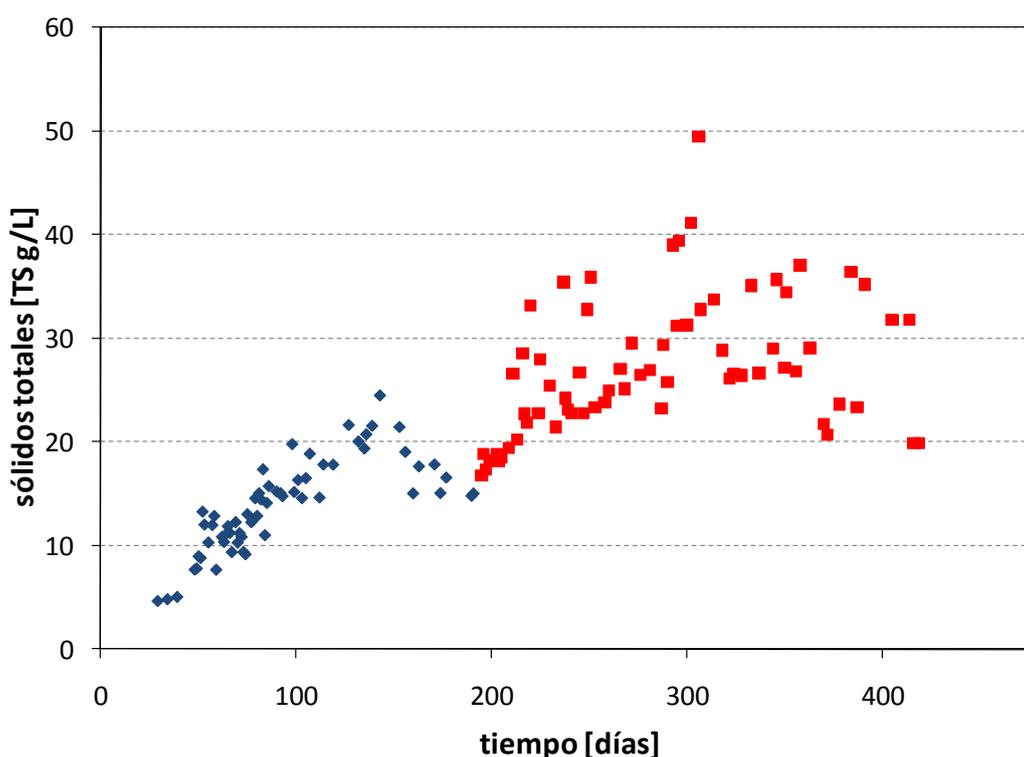
Así que, como se puede observar, al tener un correcto desempeño de todos y cada uno de los parámetros involucrados en el proceso de digestión anaerobia, se tiene una producción de gas óptima.

## Resultados y Discusión

### 4.2. Resultados de la Caracterización de la Mezcla Reactiva

Durante la operación de la planta piloto se llevó un estricto seguimiento, de las características y cualidades, que presentaba la mezcla reactiva al momento de ser descargada del biodigestor. De esta manera podemos conocer el estado en el que se encuentra el proceso y definir si este es el adecuado o no.

Los análisis realizados a la mezcla reactiva son: TS, oTS, DQO, alcalinidad y ácidos grasos volátiles; se efectúan tres veces por semana, a diferentes muestras, permitiendo así tener un monitoreo constante del proceso que se lleva a cabo en el interior del biodigestor.



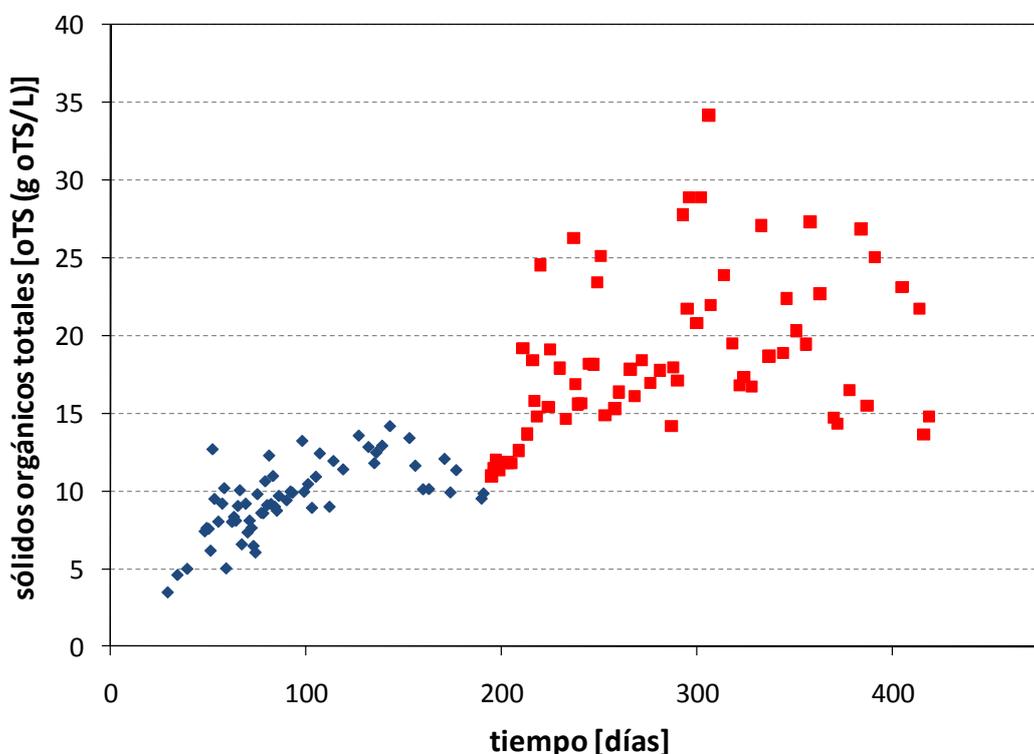
**Figura 4-8:** Sólidos totales de la mezcla reactiva con respecto al tiempo de operación del biodigestor

El análisis de sólidos totales, realizado a la mezcla reactiva resultante del proceso de digestión anaerobia evita que se sobrepasen los porcentajes de TS establecidos para cada tipo de biodigestor. El biodigestor que se opera en LADEA, tiene su operación en fase líquida con recirculación de la mezcla reactiva y flujo ascendente dentro de un lecho fijo, por lo que se tiene un máximo de 5% de TS, o 50 gTS/L, para que el funcionamiento del mismo sea el

## Resultados y Discusión

adecuado. Teniendo estos valores se evita comprometer las tuberías o la bomba con posibles taponamientos o la acumulación de sólidos en el lecho o en la zona inferior del reactor. Simultáneamente, se propician las condiciones necesarias y requeridas por las bacterias metanogénicas, beneficiando la eficiencia y producción de biogás.

En la Figura 4-8 se puede observar que en ningún momento de la operación se sobrepasa el máximo establecido, evitando de esta manera que se produzca cualquiera de los inconvenientes anteriormente presentados. Esta figura se encuentra directamente relacionada a la cantidad alimentada al biodigestor, ya que si se ingresa mayor cantidad de materia orgánica al reactor este tendrá mayor cantidad de sólidos totales que debe degradar y viceversa. Los diferentes puntos que se observan en la figura y que se presentan como máximos se deben a que en esos días la cantidad alimentada al biodigestor era alta. El gran pico que se observa en el día de operación 306 se debe a que la alimentación durante esta época es de 33L/d sobrepasando claramente el óptimo de operación que es de 27L/d.



**Figura 4-9:** Sólidos orgánicos totales de la mezcla reactiva con respecto al tiempo de operación del biodigestor

## Resultados y Discusión

---

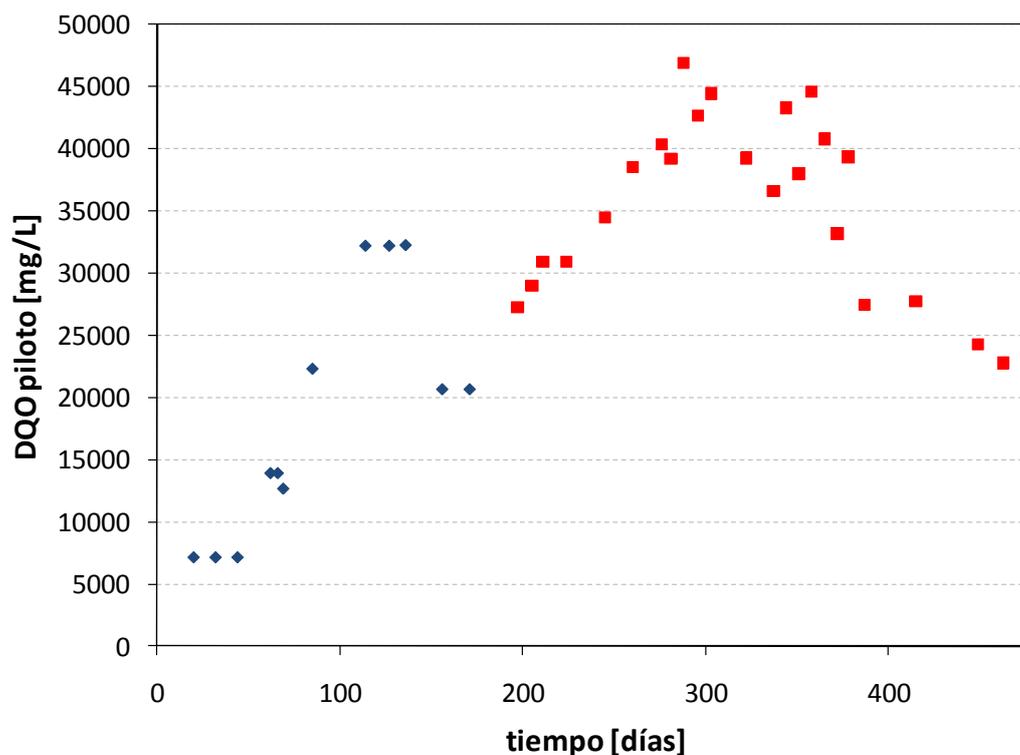
La distribución de sólidos orgánicos totales en la Figura 4-9 es bastante dispersa. No se encuentra una tendencia clara, pero sí comportamientos muy marcados por parte del sistema a cierto tipo de acciones. Se observa que al exceder el óptimo de carga al biodigestor, el cual tiene como máximo 27 L/d, inmediatamente se tiene una acumulación de materia orgánica, es decir valores de oTS elevados. Esto quiere decir que existe un exceso de materia orgánica degradable en el interior del biodigestor.

Por ejemplo, en el día de operación 306 se observa que se alcanza el valor más alto de todos con 34.19 g oTS/L, o 3.4% de oTS, esto se debe a que en los días previos se tiene una alimentación de 33L/d, muy por encima del óptimo de operación por lo que obviamente existirá acumulación de materia orgánica degradable.

De manera que, los puntos máximos que se observan en la Figura 4-9 se deben principalmente a la sobrecarga de materia orgánica al biodigestor, es decir días de operación en los cuales se sobrepasa y se mantienen volúmenes de alimentación superiores al óptimo. No se observan puntos mínimos debido a que al tener estas sobrecargas o exceso de material orgánico degradable en el biodigestor, al detener la alimentación lo único que se logra es favorecer al sistema, ya que se permite al mismo, degradar la materia orgánica en exceso y de esta manera estabilizar el proceso. Podemos decir que la zona media, entre 10 y 18 g oTS/L o 1 y 1.8% de oTS, es aquella en la cual el biodigestor tiene un funcionamiento adecuado, ya que durante estos periodos de operación se tienen valores de pH deseados y buena producción de biogás. Así como también, velocidades de degradación positivas y óptimos en la alimentación.

Sin embargo, pueden existir ocasiones en las cuales la cantidad de oTS ingresado sea muy alto y se obtengan valores de oTS de la mezcla reactiva por encima del rango establecido anteriormente, lo que no necesariamente quiere decir que exista mala degradación.

## Resultados y Discusión



**Figura 4-10:** DQO de la mezcla reactiva con respecto al tiempo de operación del biodigestor

Se ha mencionado anteriormente que la DQO es un parámetro conservativo, el cual permite conocer de manera indirecta la cantidad de materia orgánica en el proceso de digestión anaeróbica y su degradación.

En la Figura 4-10 se puede observar los valores de DQO de la mezcla reactiva obtenida del proceso de digestión anaeróbica.

En los días de operación 197 a 224 se pueden observar valores de DQO entre 20000 y 30000 mg/L, lo que indica que sí existe degradación de materia orgánica. La velocidad con la que se degrada la materia orgánica puede ser un poco lenta, pero se debe a que el sistema por primera vez tiene volúmenes de alimentación superiores a los 25 L/d.

Entre los días 245 a 387 se observa acumulación de materia orgánica, ya que durante todo este período se tienen volúmenes de alimentación que llegan a ser de 30 – 35 L/d por tiempos prolongados. Esto origina acumulación de materia orgánica, valores de pH bajos, baja producción de biogás y velocidades de degradación negativas. Por estos motivos durante este período se detiene en algunas ocasiones la operación del biodigestor. Pero los períodos

## Resultados y Discusión

que duran estas suspensiones son demasiado cortos y se retoma la operación del biodigestor de manera apresurada, incrementando los volúmenes de alimentación demasiado rápido lo que no permite al sistema estabilizarse y continúa acumulándose materia orgánica en su interior. Posteriormente, en los días de operación 415 a 435 se detiene nuevamente la operación del proceso por corto tiempo, pero en esta ocasión se reducen las cantidades alimentadas al biodigestor teniendo como máximo un volumen de alimentación de 27 L/d. Esta detención presenta una mejoría en los valores de operación del biodigestor, pero nuevamente al incrementar el volumen de alimentación de manera muy apresurada y por encima del óptimo se crea un desbalance en el sistema y aumento en la DQO de la mezcla reactiva. Finalmente, en los días de operación 436 a 463 se detiene la operación del biodigestor, durante 7 días, posteriormente se procede a incrementar los volúmenes de alimentación de manera lenta y pausada teniendo como resultado una recuperación en los valores de pH, buena producción de biogás y velocidades de degradación positivas.

**Tabla 4-1:** Resultados obtenidos en análisis de alcalinidad y ácidos grasos volátiles

Volumen de alimentación (L/d)	Carga orgánica (kg DQO <sub>feed</sub> /m <sup>3</sup> <sub>reactor</sub> d)	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	AGV (mg AGV/L)	AGV/Alcalinidad
10	0.45	2820	904	0.3
27	1.8	3600	1200	0.3
30	2.08	3650	2072	0.6
	<b>Rangos óptimos</b>	1000-5000	500-1000	< 0.5

La alcalinidad es la capacidad que tiene un sistema para mantener su pH estable frente a la adición de un ácido o una base. En la biodigestión la alcalinidad es una medida la cual nos permite conocer de manera inmediata la estabilidad del proceso.

Para que la biodigestión sea eficiente la alcalinidad total debe encontrarse en el rango de 1000 a 5000 mg CaCO<sub>3</sub>/L o por sobre este.

Por otro lado, los ácidos grasos volátiles, producto de la acidoénesis y acetogénesis, son los responsables de la existencia o no de acidificación en el sistema lo que podría provocar problemas en el mismo. El rango de operación óptimo, en el que se debe encontrar los valores de concentración de los ácidos grasos volátiles es de 500 a 1000 mg AGV/L para sis-

## Resultados y Discusión

---

temas mesofílicos. Y la relación ácidos volátiles/alcalinidad debe encontrarse en valores inferiores a 0.5 para que la operación sea la adecuada.

En la Tabla 4-1 se pueden observar algunos resultados de alcalinidad y ácidos grasos volátiles. En los dos períodos en los que se observa una relación ácidos volátiles/alcalinidad menor a 0.5 se tuvieron volúmenes de alimentación entre 10 y 27 L/d, valores en los cuales la alcalinidad y ácidos grasos volátiles se encuentran dentro de los rangos óptimos de operación.

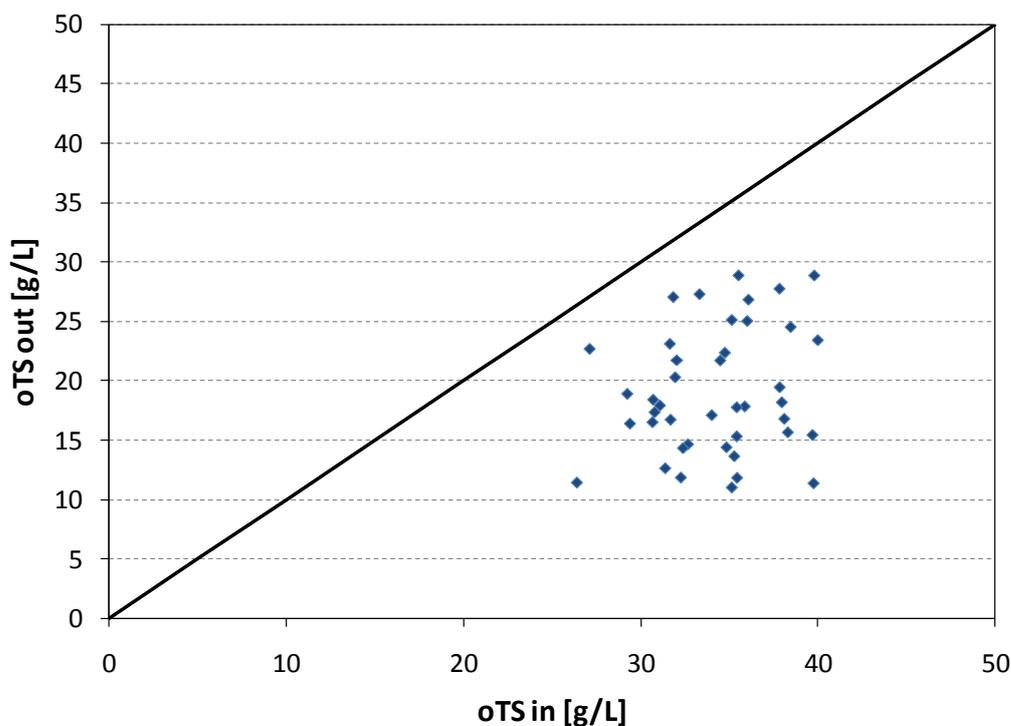
En el período en el que se observa una relación ácidos volátiles/alcalinidad mayor a 0.5 se tienen volúmenes de alimentación de 30 L/d. En este período el valor de alcalinidad se encuentra dentro del rango óptimo, más no el valor de ácidos grasos volátiles, lo que generará problemas en el sistema. Podemos decir que se empieza a tener una sobrecarga de materia orgánica en el sistema.

### **4.3. Interpretación y Evaluación de Resultados**

Los resultados obtenidos durante la operación de la planta piloto muestran claramente una tendencia, que indica de manera inequívoca los puntos máximos en los cuales el proceso de digestión anaeróbica se encuentra operando de manera eficiente. Una vez sobrepasados estos límites, el proceso se ve afectado severamente y su operación no será la adecuada. Esta tesis tiene como objetivo principal el definir estos límites y establecer los rangos de operación bajo los cuales se deben manejar todas las variables del proceso.

A continuación se presentan figuras con las relaciones entre los diferentes parámetros, las cuales indican el comportamiento que posee el biodigestor y los cambios que presenta el mismo al variar algún parámetro en el proceso de operación. Estas gráficas son complementarias a los resultados presentados anteriormente, en los cuales ya se descifra cierto comportamiento característico en el proceso.

## Resultados y Discusión



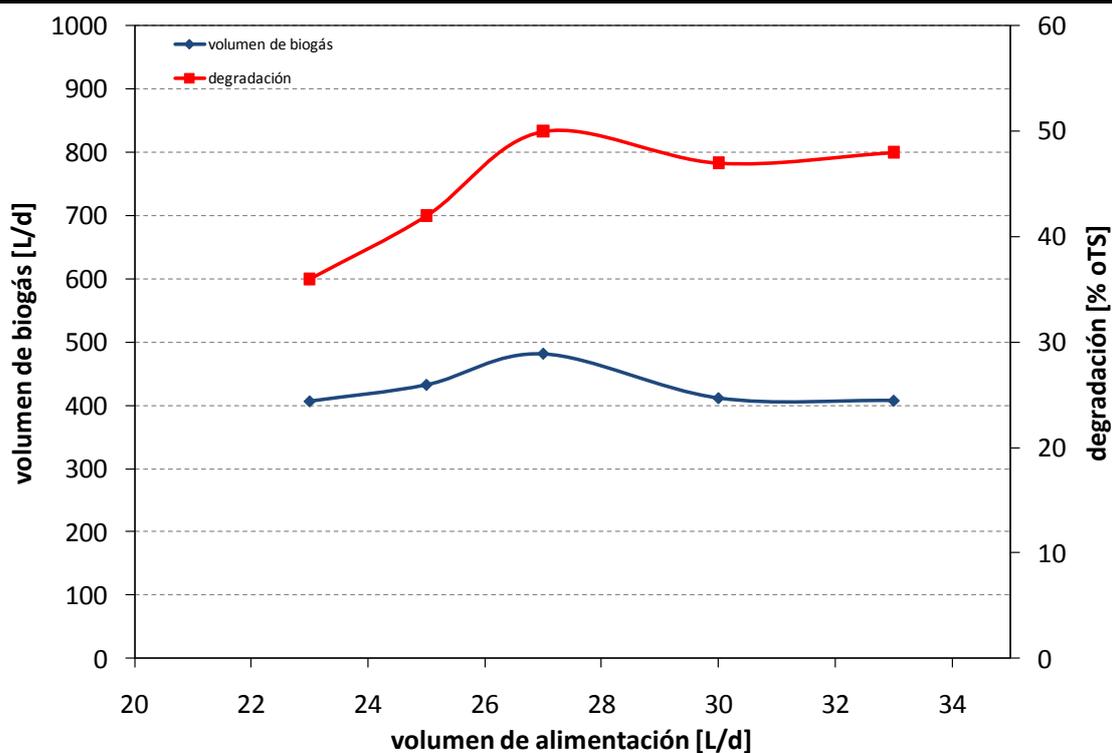
**Figura 4-11:** Relación de oTS<sub>descargado</sub> con respecto a oTS<sub>alimentado</sub>

Los valores de oTS a la entrada y a la salida del biodigestor indican si existe o no degradación de la materia orgánica alimentada al proceso para la producción de biogás.

En la Figura 4-11 se puede observar que los valores de oTS descargado del biodigestor son menores a aquellos tomados de la alimentación, lo que nos indica que durante todo el proceso existió degradación de la materia orgánica.

Los valores más cercanos a la recta de 45° indican una menor degradación de la materia orgánica, producto de la sobrecarga al biodigestor. Si bien en algunos casos se sobrepasó el volumen óptimo de alimentación, estos excedentes no fueron los suficientemente grandes como para inhibir el proceso.

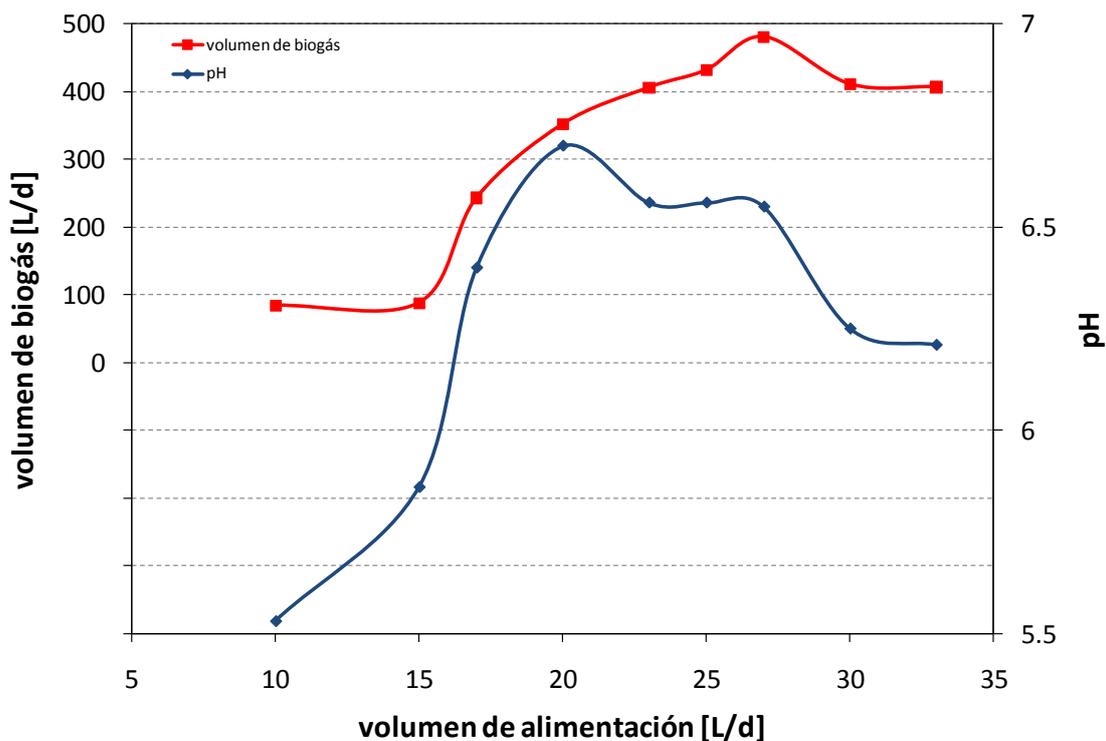
## Resultados y Discusión



**Figura 4-12:** Relación entre producción de biogás y degradación con respecto al volumen de alimentación.

En la Figura 4-12 se tiene la relación entre producción de biogás y degradación con respecto al volumen de alimentación, observándose que a medida que se incrementa los volúmenes de alimentación la degradación de materia orgánica se realiza de manera eficiente, hasta llegar a un máximo de 27 L/d, con elevada producción de biogás y degradación del 50% oTS. Si se excede un volumen de alimentación de 27 L/d se puede observar que los valores de degradación de oTS comienzan a decrecer.

## Resultados y Discusión



**Figura 4-13:** Relación entre producción de biogás y pH con respecto al volumen de alimentación ingresado al proceso.

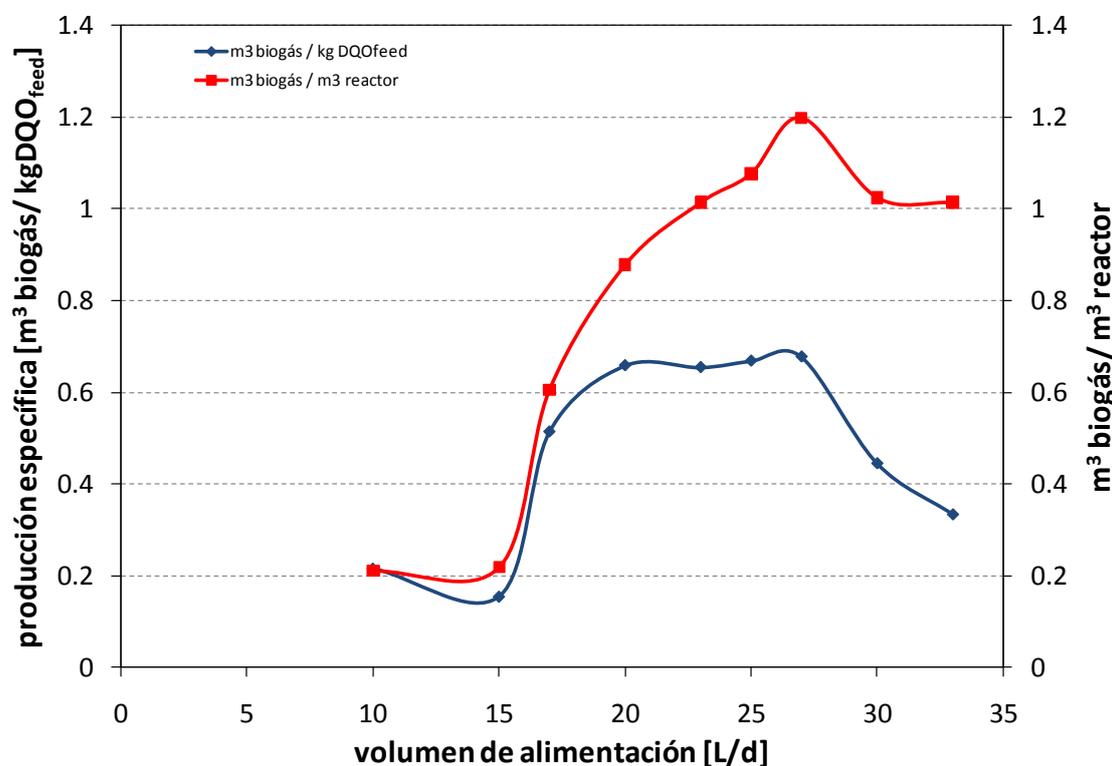
En la Figura 4-13 se puede observar la relación existente entre la producción de biogás y la alimentación que tiene el biodigestor. Como se observa para valores bajos de alimentación, la relación entre estos dos parámetros es directamente proporcional, es decir si se incrementa la cantidad de materia orgánica ingresada al proceso se tendrá un incremento en la producción de biogás y viceversa. Pero para volúmenes de alimentación altos, la producción de biogás no incrementa, y por el contrario se ve reducida, esto es producto de una sobrecarga efectuada hacia el sistema.

El volumen de alimentación en el cual se observa un máximo en la producción de biogás, es de 27 L/d por lo que se concluye que esta alimentación es la alimentación óptima, la cual corresponde a una carga orgánica de  $1.8 \text{ kg DQO}_{\text{fed}}/\text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ d}$ .

En cuanto a la relación pH y volumen de alimentación se puede observar que para volúmenes de alimentación entre 10 y 17 L/d se tienen valores de pH inferiores a 6.5, esto se debe a que cuando se tuvieron estas alimentaciones el biodigestor se encontraba atravesando las etapas de puesta en marcha y estabilización. Una vez estabilizado el proceso se observa

## Resultados y Discusión

que los valores de pH se mantienen por encima de 6.5, hasta llegar a volúmenes de alimentación de 27 L/d. Al superar volúmenes de alimentación de 27 L/d se observa que los valores de pH nuevamente decrecen manteniéndose por debajo del óptimo que es 6.5 – 7.5.



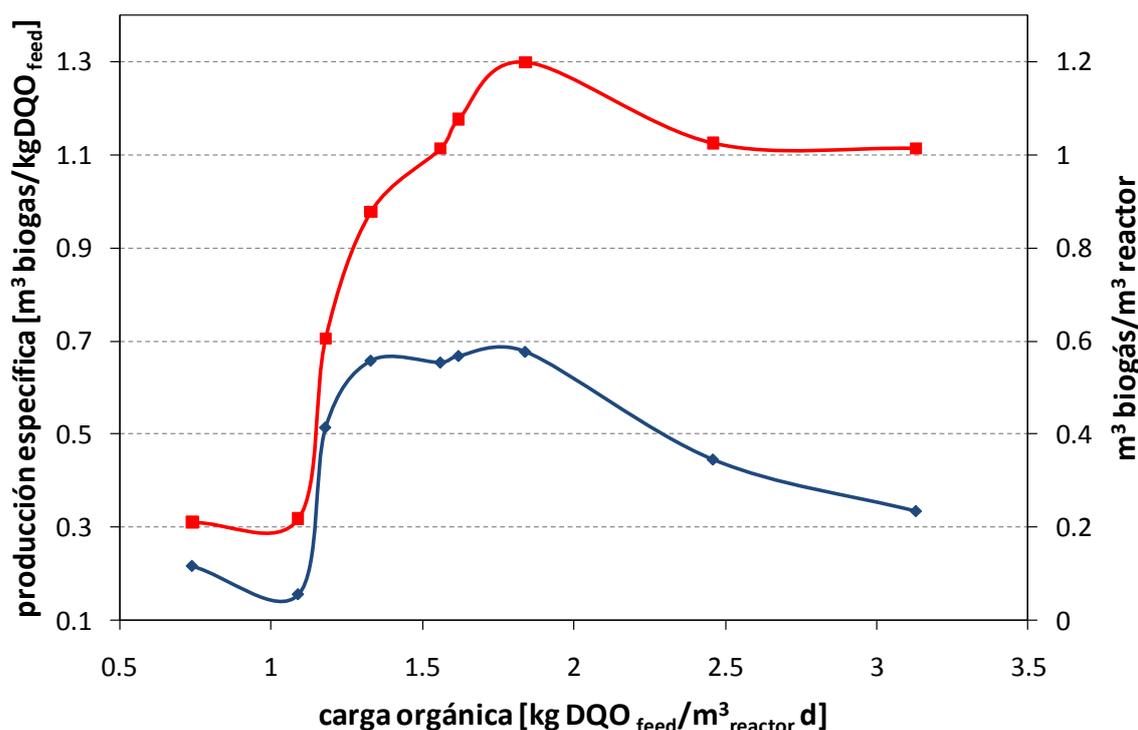
**Figura 4-14:** Relación entre producción específica de biogás y  $\text{m}^3\text{biogás}/\text{m}^3\text{reactor}$  con respecto al volumen de alimentación ingresado al proceso.

En la Figura 4-14 se muestra la relación entre volumen de alimentación y producción específica de biogás, expresada como ( $\text{m}^3\text{biogás}/\text{kgDQO}_{\text{feed}}$ ), así como también la relación entre volumen de alimentación y  $\text{m}^3\text{ biogás}/\text{m}^3\text{ reactor}$ . En ambos casos se observa que la producción máxima del sistema se da con volúmenes de alimentación de 27 L/d.

En el caso de la producción específica se obtiene un valor de  $0.677\text{ m}^3\text{ biogás}/\text{kg DQO}_{\text{feed}}$  con un porcentaje de metano del 69%.

En cuanto a la relación volumen de alimentación y  $\text{m}^3\text{ biogás}/\text{m}^3\text{ reactor}$ , se puede observar que la producción máxima de biogás que se tiene por  $\text{m}^3$  de biodigestor es de  $1.2\text{ m}^3\text{ biogás}$  lo que indica una operación eficiente del proceso.

## Resultados y Discusión



**Figura 4-15:** Relación entre producción específica de biogás y  $\text{m}^3\text{biogás}/\text{m}^3\text{ reactor}$  con respecto a la carga orgánica del proceso.

En la Figura 4-15 se puede observar que el valor bajo el cual se obtiene la mayor producción de biogás, tanto en  $\text{m}^3\text{biogás}/\text{kgDQO}_{\text{feed}}$  como en  $\text{m}^3\text{ biogás}/\text{m}^3\text{ reactor}$ , corresponde a una carga orgánica de  $1.8\text{ kg DQO}_{\text{feed}}/\text{m}^3\text{ reactor d}$  o volumen de alimentación de  $27\text{ L/d}$ . Si se exceden estos valores se observa un decrecimiento en la producción.

Es necesario destacar el hecho de que los datos empleados para las Figuras 4-11 a 4-15 son aquellos en los cuales el proceso no presentó ningún tipo de problema y su operación fue la adecuada.

Se concluye entonces que, al mantener una correcta operación del proceso sin ningún tipo de contratiempo, este operará de manera adecuada y eficiente con un volumen de alimentación de  $27\text{ L/d}$  o carga orgánica de  $1.8\text{ kg DQO}_{\text{feed}}/\text{m}^3\text{ reactor d}$ .

#### 4.4. Caracterización y Mejoramiento del Fertilizante Orgánico (Biol)

**Tabla 4-2.** Análisis físico-químico del biol

Análisis		Valor Promedio [mg/L]
Sólidos Totales	TS	22264
Sólidos Totales Orgánicos	oTS	695102
Nitrógeno	N	8700
Sodio	Na	413.8
Fósforo	P	167
Potasio	K	586.6
Calcio	Ca	2644.4
Magnesio	Mg	194.6
Cobre	Cu	1.45
Manganeso	Mn	3.75
Hierro	Fe	23.78
Zinc	Zn	2.69

El líquido resultante del proceso de digestión anaeróbica, denominado biol, posee características muy beneficiosas para plantas y cultivos como se muestra en el análisis físico-químico presentados en la Tabla 4-2. Pero debe atravesar un proceso de estabilización o higienización para su aplicación en el campo. Estos procesos de higienización permiten la eliminación de microorganismos patógenos, principalmente, coliformes y E. Coli.

Como se menciona en la sección 3.2.4. si el uso que se le va a dar al producto es en el campo agrícola este no debe superar las  $2 \times 10^6$  UFC/g. Por este motivo el biol que se obtuvo fue sometido a un tratamiento térmico, con el cual se busca eliminar los microorganismos patógenos anteriormente señalados, y posteriormente se realiza análisis microbiológicos para asegurar la calidad del producto.

A continuación se muestran algunos resultados:

## Resultados y Discusión

**Tabla 4-3:** Caracterización microbiológica del biol (Coliformes Totales)

<b>Fecha</b>	<b># análisis</b>	<b>Promedio [UFC/g]</b>
08/07/09	1	86
06/08/09	1	8
28/10/09	1	28
04/11/09	1	153
11/11/09	1	0
18/11/09	1	12
25/11/09	3	6845
03/12/09	3	4623
16/12/09	3	2513
30/12/09	3	1898
06/01/10	3	2740

**Tabla 4-4:** Caracterización microbiológica del biol (Echerichia Coli)

<b>Fecha</b>	<b># análisis</b>	<b>Promedio [UFC/g]</b>
08/07/09	1	29
06/08/09	1	0
28/10/09	1	9
04/11/09	1	48
11/11/09	1	0
18/11/09	1	7
25/11/09	3	1015
03/12/09	3	4313
16/12/09	3	873
30/12/09	3	745
06/01/10	3	1720

En la Tabla 4-3 y Tabla 4-4 se observan solamente los resultados obtenidos después de haber realizado el conteo respectivo de cada uno de los medios de cultivo y el cálculo señalado en la Ec. 3-9.

Como se puede observar en la Tabla 4-3 y Tabla 4-4 ninguno de los valores obtenidos sobrepasan el límite,  $2 \times 10^6$  UFC/g, por lo que podemos asegurar la buena calidad del producto obtenido en el proceso de digestión anaerobia y su posterior uso en cultivos.

## Resultados y Discusión

Adicionalmente, para monitorear el estado del producto y las características que posee el mismo se realizaron análisis de propiedades anti-fúngicas.

Los resultados de los análisis de minerales totales y azufre se muestran en el Anexo 5.

En la Tabla 4-5 se observa el rango de concentraciones estimulantes o inhibitorias de algunos elementos esenciales en el metabolismo microbiano [12].

**Tabla 4-5:** Efecto de la concentración de los cationes sobre la digestión anaeróbica

Acción	Concentración g/L		
	Estimulante	Inhibitoria	Muy inhibitoria
Sodio	0.1 - 0.2	3.5 - 5.5	8
Potasio	0.2 - 0.4	2.5 - 4.5	12
Calcio	0.1 - 0.2	2.5 - 4.5	8
Magnesio	0.075 - 0.15	1.0 - 1.5	3

En los análisis realizados al biol en los días 254 a 260 de operación se puede observar que los valores de calcio (Ca) se encuentran en 3.49 g/L, encontrándose estos valores muy cercanos a la acción inhibitoria para el proceso. Esto se debe a que durante este período de operación y los días previos se tuvieron volúmenes de alimentación de 30 L/d, valores de pH por debajo de 6.5 y por ende se agregó gran cantidad de aditivo al sistema, llegando a valores máximos de 600 g/d sobrepasando de manera dramática el promedio máximo de 200g/d. Todo esto debido a los elevados volúmenes de alimentación, como ya se mencionó anteriormente.

Se puede observar que, los demás elementos se encuentran en un rango por encima del estimulante, pero muy por debajo de la acción inhibitoria.

En los análisis realizados en los días 386 a 398 se puede observar que los valores de calcio (Ca) se encuentran en 1.79 g/L, encontrándose por encima de la acción estimulante, pero sin llegar a ser inhibitorios para el proceso. En los días previos a este periodo se comienzan a alimentar con volúmenes de 30 – 35 L/d y los valores de pH descienden, pero no se excede la cantidad de aditivo agregado al sistema siendo el máximo 200g/d. La producción de biogás decrece sistemáticamente por los volúmenes de alimentación excesivos. Los demás elementos al igual que en el análisis anterior se encuentran en un rango que no presentan ningún problema para el proceso de digestión anaeróbica.

## Resultados y Discusión

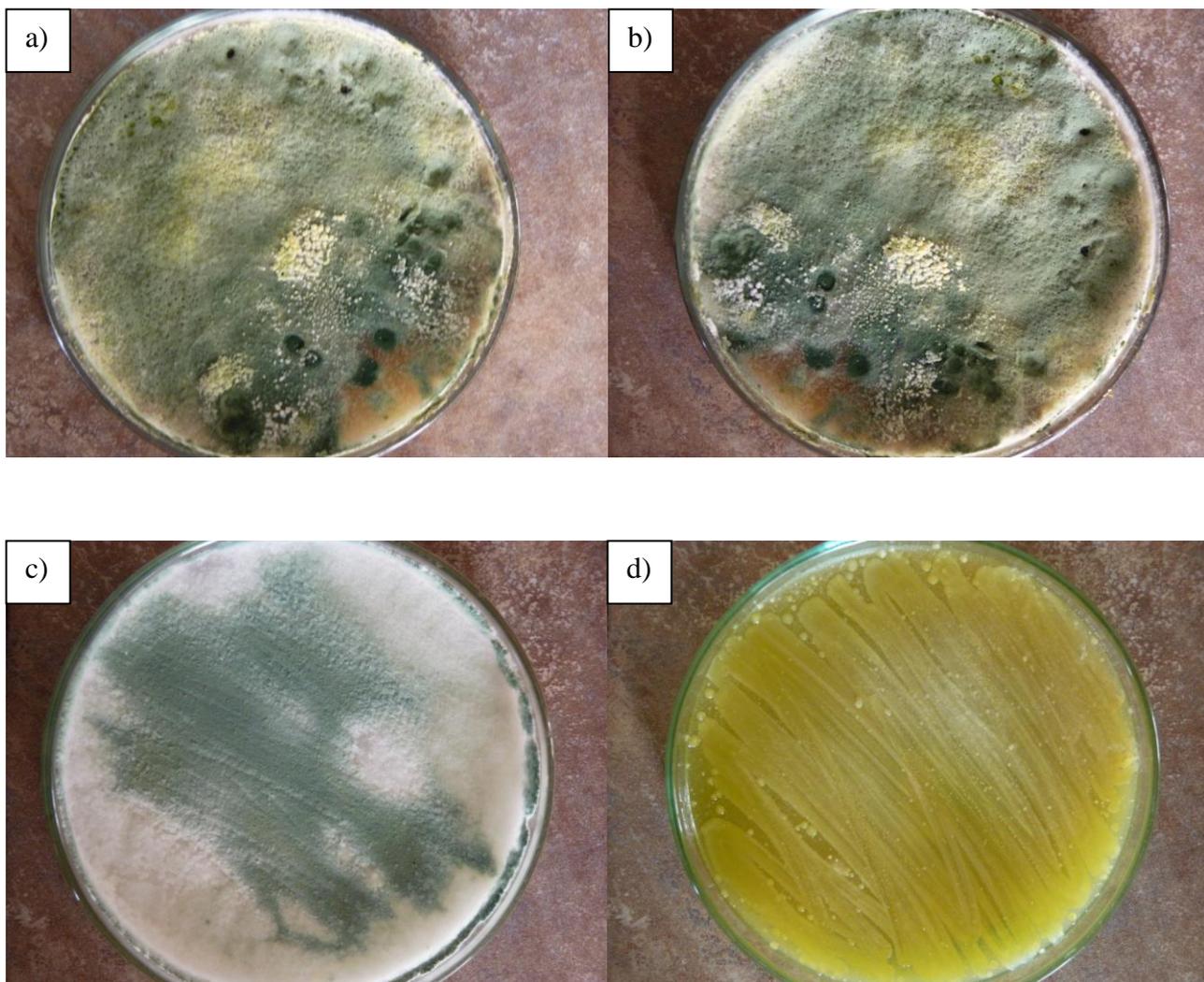
---

En cuanto a los análisis que se hicieron para observar las propiedades anti-fúngicas del biol, los resultados obtenidos después de haber realizado el método que se detalla en el Anexo 4, son los siguientes:

En la Figura 4-16 hasta Figura 4-20 se muestra el resultado de los análisis de las propiedades antimicóticas del biol, en diferentes tipos de hongos y en diferentes medios de cultivo. En la figura a) se presenta el hongo de la muestra original de las diferentes plantas, mientras que en las figuras b), c) y d) se presenta el hongo con medio de cultivo puro, con biol diluido y con biol concentrado, respectivamente.

## Resultados y Discusión

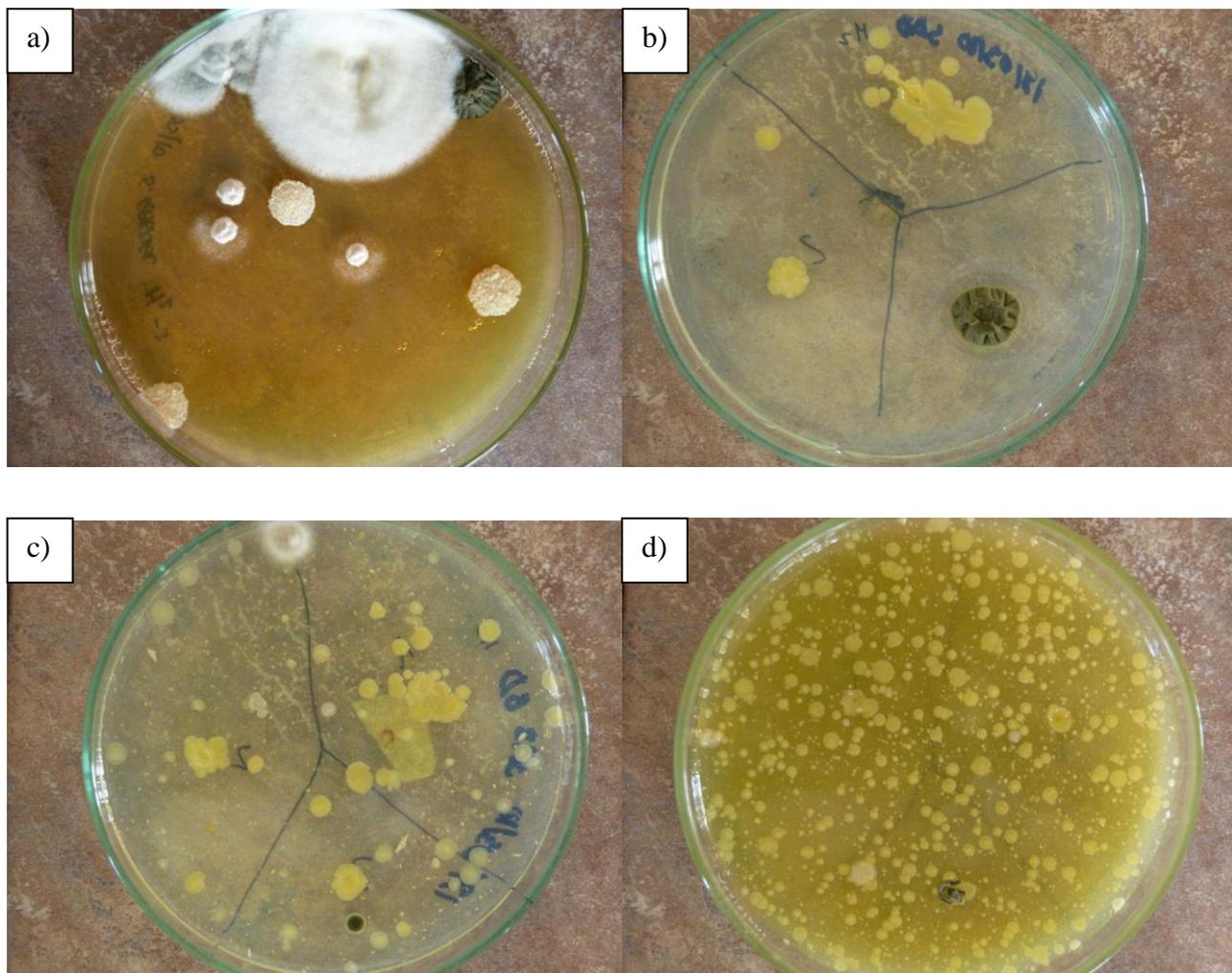
## Resultados obtenidos en muestra 1 M1: Chirimoya



**Figura 4-16:** Resultados obtenidos con hongo de chirimoya: **a)** muestra original, **b)** medio de cultivo, **c)** medio de cultivo + biol diluido, **d)** medio de cultivo + biol concentrado

## Resultados y Discusión

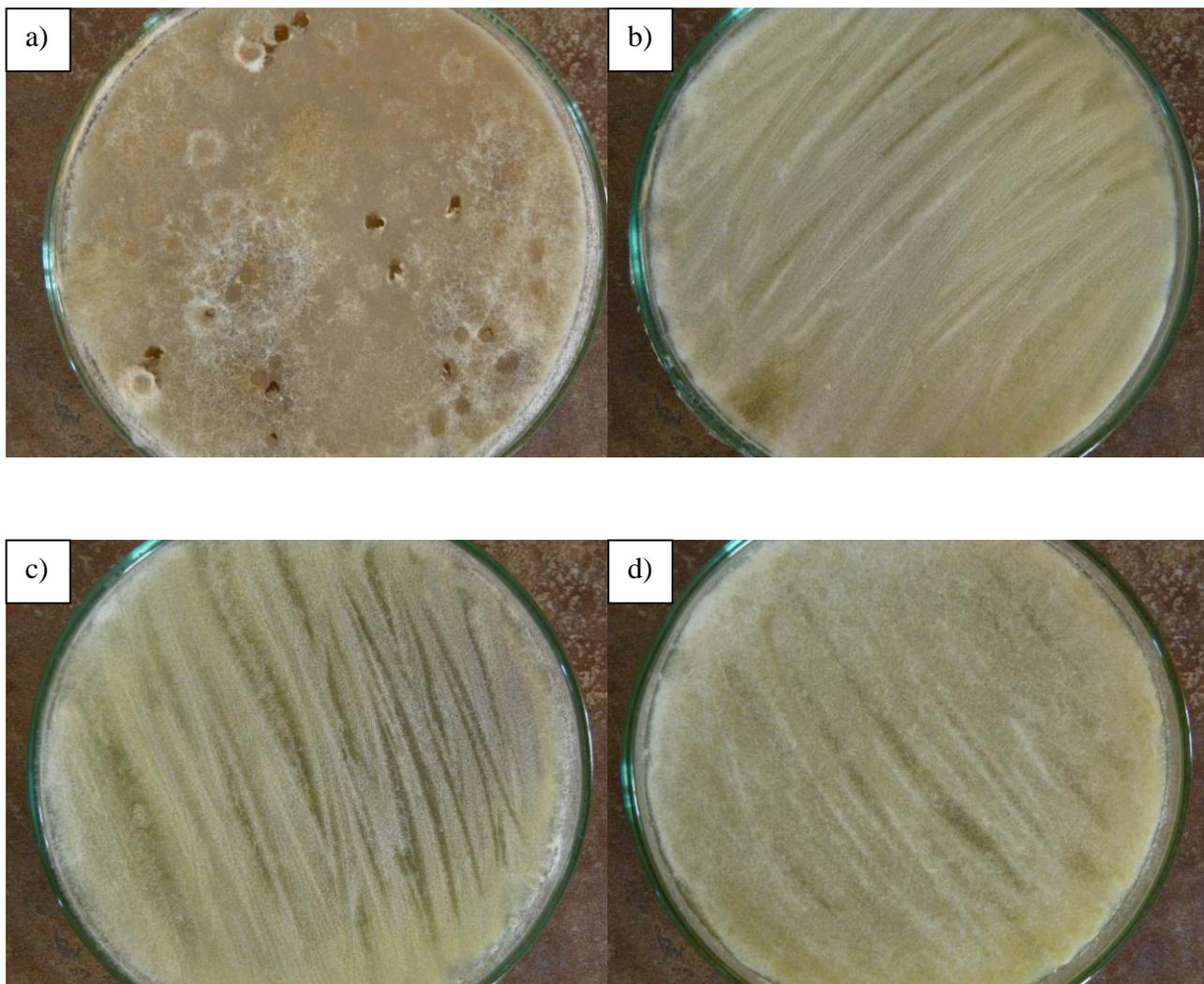
## Resultados obtenidos en muestra 2 M2: Aguacate



**Figura 4-17:** Resultados obtenidos con hongo de aguacate: **a)** muestra original, **b)** medio de cultivo, **c)** medio de cultivo + biol diluido, **d)** medio de cultivo + biol concentrado

## Resultados y Discusión

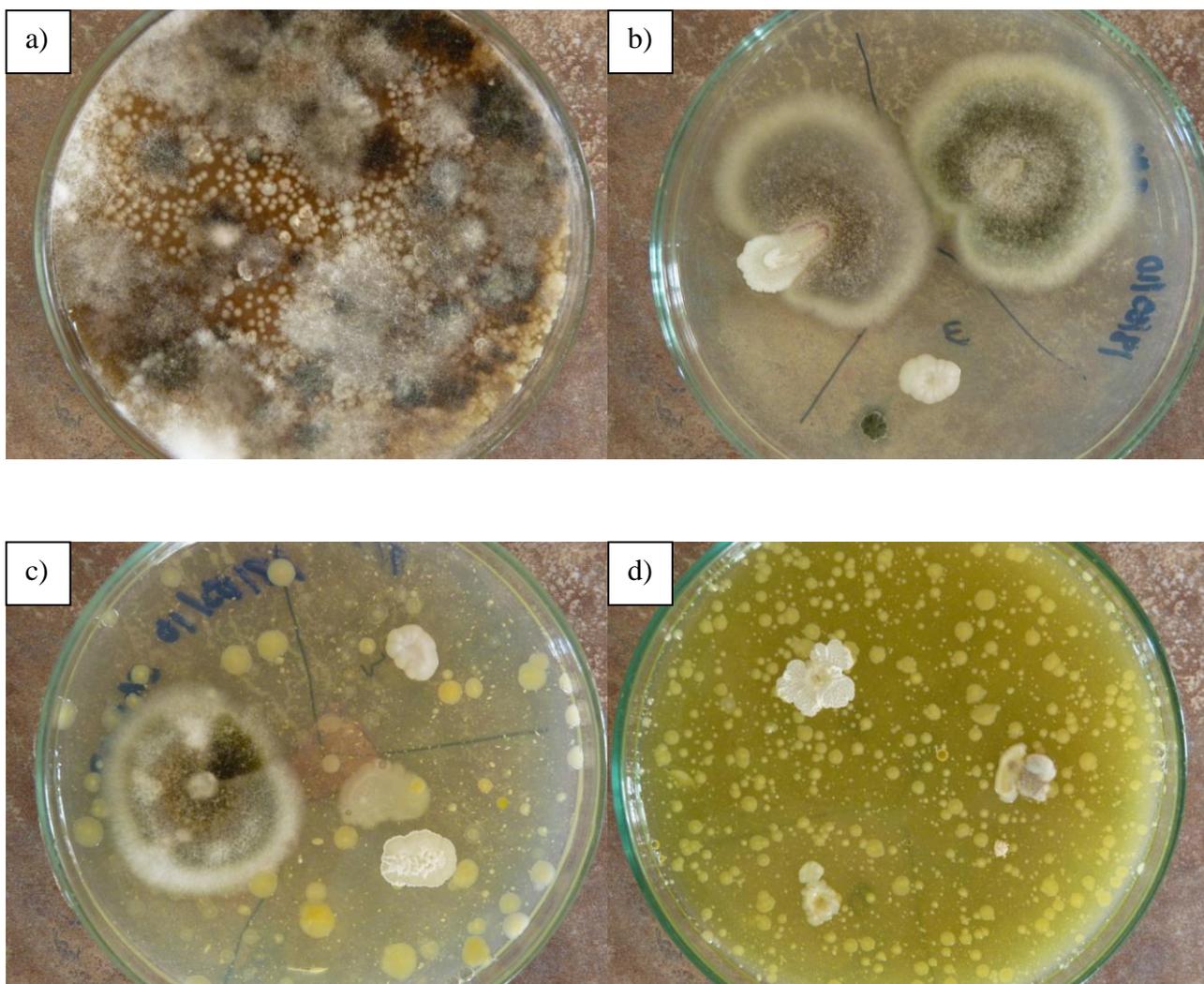
## Resultados obtenidos en muestra 3 M3: Maíz



**Figura 4-18:** Resultados obtenidos con hongo de maíz: **a)** muestra original, **b)** medio de cultivo, **c)** medio de cultivo + biol diluido, **d)** medio de cultivo + biol concentrado

## Resultados y Discusión

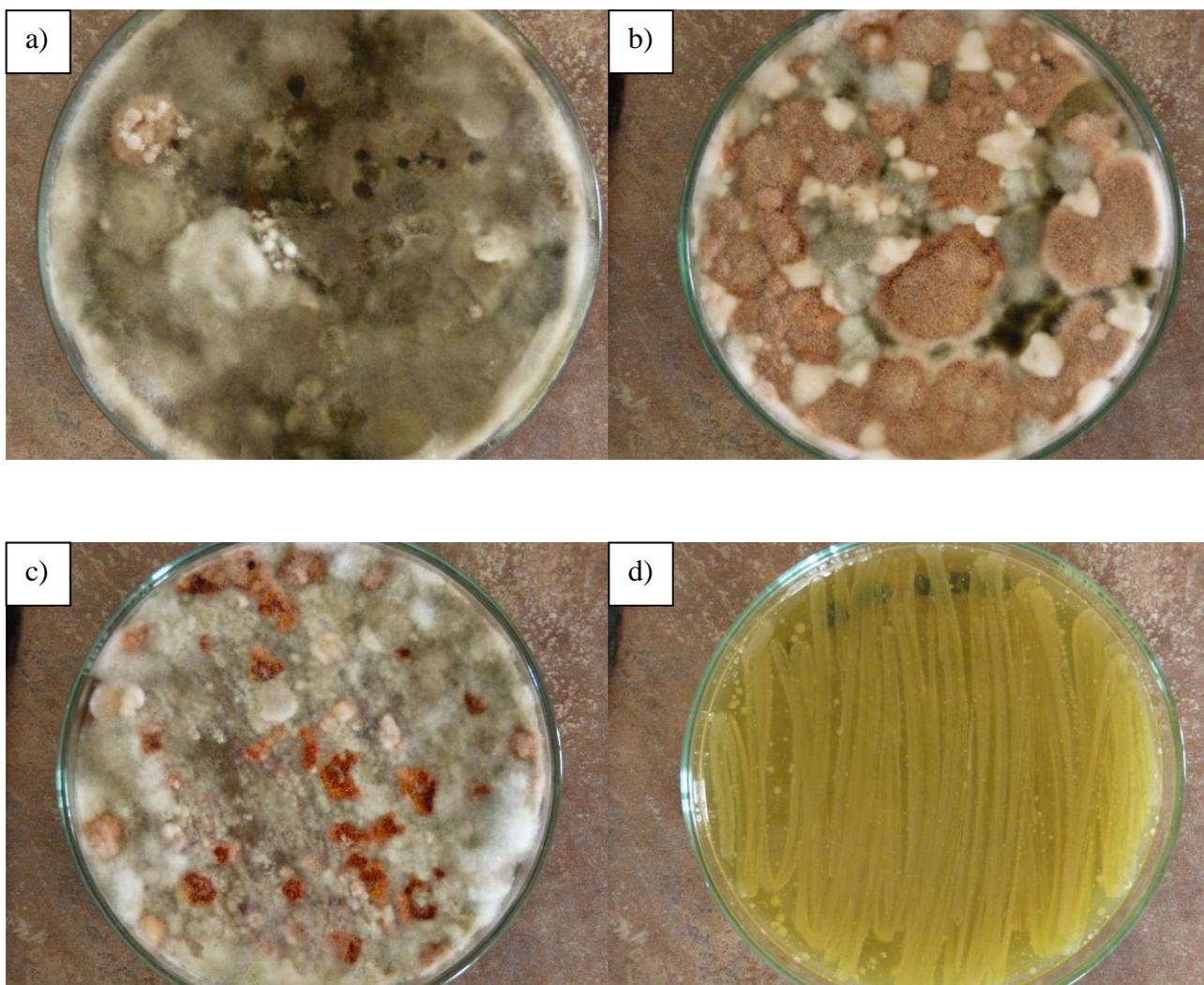
## Resultados obtenidos en muestra 4 M4: Frejol



**Figura 4-19:** Resultados obtenidos con hongo de frejol: **a)** muestra original, **b)** medio de cultivo, **c)** medio de cultivo + biol diluido, **d)** medio de cultivo + biol concentrado

## Resultados y Discusión

## Resultados obtenidos muestra 5 M5: Papa



**Figura 4-20:** Resultados obtenidos con hongo de papa: **a)** muestra original, **b)** medio de cultivo, **c)** medio de cultivo + biol diluido, **d)** medio de cultivo + biol concentrado

Observando los resultados obtenidos se puede decir que los medios en los cuales se detecta una eliminación o una detención en el crecimiento de los hongos, son las muestras de chirimoya y papa con concentraciones de biol elevadas. En las muestras de frejol se observa que en el medio de cultivo en el que se halla gran cantidad de biol se produce una detención en el crecimiento del hongo, pero no la eliminación del mismo. En las demás muestras (aguacate y maíz) no se observa inhibición alguna por parte del biol.

## Resultados y Discusión

Se puede concluir que el uso de biol en cultivos de chirimoya y papa puede generar propiedades anti-fúngicas ya que además de ser un gran fertilizante, podría permitir la eliminación en el crecimiento y formación de ciertos tipos de hongos.

Con estas pruebas se observa que el biol puede poseer capacidad anti-fúngica para cierta clase de cultivos y ciertos tipos de hongos. Los tipos de hongos que se generaron en todos y cada uno de los medios no fueron estudiados de manera más detallada debido a que esto no constituía un objetivo primordial en esta tesis.

### 4.5. Caracterización del Biogás

El biogás es el producto principal del proceso de digestión anaerobia, ya que representa una fuente alternativa para la generación de energía eléctrica. Por esta razón debe ser sometido a tratamientos y controles dependiendo del uso que se le va a dar. En capítulos anteriores se menciona el tipo de tratamiento que se da al biogás en la planta piloto, así como también los controles a los cuales se encuentra sometido. A continuación se muestran los resultados obtenidos en estos controles, con los que se busca determinar la calidad y composición del biogás.

Al realizar la prueba de absorción del  $\text{CO}_2$ , haciendo burbujear el gas resultante en una solución de cal al 4% y en otra solución de NaOH al 4% observamos que la solución de NaOH (4%) es más efectiva al absorber mayor volumen de  $\text{CO}_2$ .

**Tabla 4-6:** Comparación de los diferentes agentes de absorción

<b>Solución</b>	<b>CH<sub>4</sub> [%]</b>	<b>CO<sub>2</sub> [%]</b>
NaOH (4%)	61	39
Cal (4%)	73	27

Los resultados obtenidos después de haber realizado la prueba cuantitativa de absorción del  $\text{CO}_2$ , con NaOH son los siguientes:

## Resultados y Discusión

**Tabla 4-7:** Composición del biogás obtenido en el proceso de biodigestión

<b>Día</b>	<b>Volumen de alimentación [L/d]</b>	<b>pH</b>	<b>CH<sub>4</sub> [%]</b>	<b>CO<sub>2</sub> [%]</b>
420	22	6.53	59	41
426	28	6.39	61	39
465	27	6.62	69	31
469	27	6.57	62	38

Observando los resultados se puede decir que el biogás, producto del proceso de digestión anaerobia, obtenido durante los períodos de operación en los cuales se realizó el análisis fue de buena calidad. El porcentaje más bajo, en cuanto a composición de metano, se observa en el primer análisis. Este bajo porcentaje de metano en el biogás puede ser producto de los elevados volúmenes de alimentación que se tuvo en la operación durante épocas previas a este análisis. Se llegó a un máximo de 35 L/d de alimentación.

En las pruebas realizadas en el día de operación 426 se observa un gas de buena calidad, los días previos a este análisis se tienen alimentaciones de 25 L/d y valores de pH entre 6.3 y 6.5. En este período de prueba también se procede a realizar el análisis cualitativo del biogás con la prueba de llama, observando que el biogás resultante del proceso combustiona por sí solo y presenta una coloración azul característica del metano, indicándonos que el biogás resultante del proceso es de excelente calidad.

En este período también se realiza la prueba de absorción del CO<sub>2</sub>, haciendo burbujear el gas resultante por una solución con cal al 4% y se observa que la solución de NaOH al 4% es más efectiva al absorber mayor volumen de CO<sub>2</sub>.

En la prueba realizada el día de operación 465 se observa un biogás de excelente calidad con elevado porcentaje de metano, los días previos a este análisis se tiene volúmenes de alimentación de 27 L/d y valores de pH entre 6.5 y 6.7. Al realizar la prueba de llama se observa que el biogás se enciende por sí solo, sin la necesidad de llama piloto, y presenta la coloración azul característica.

Finalmente en la prueba realizada el día de operación 469 se observa buena presencia de metano y buena calidad de biogás. Los días previos a esta prueba se tienen volúmenes de alimentación de 27 L/d y valores de pH de 6.5.



**Figura 4-21:** Prueba cualitativa para la determinación del estado del biogás

## Resultados y Discusión

### 4.6. Balance de Masa de la Planta Piloto

Los datos seleccionados para el balance de masa de la planta piloto se efectuaron en períodos de tiempo en los cuales se observó estabilidad en los volúmenes de alimentación y en la operación del proceso. Con esto se desea conocer el comportamiento que presenta el proceso de biodigestión anaerobia en diferentes etapas y las diferencias que presentan cada una de ellas. Los períodos de tiempo seleccionados para realizar los cálculos respectivos fueron los siguientes: el primer período de tiempo que presenta una alimentación de 15 L/d corresponde a los días de operación 127 a 136, el segundo período de tiempo que presenta volúmenes de alimentación de 27 L/d corresponde a los días de operación 463 a 468 y el tercer período de tiempo con volúmenes de alimentación de 30 L/d corresponde a los días de operación 288 a 296.

Una vez que se han seleccionado los períodos de tiempo que serán analizados para el balance de masa, se procede a realizar una serie de cálculos con los siguientes datos pertenecientes a los diferentes períodos de tiempo: carga orgánica, volumen de alimentación, días de operación,  $DQO_{\text{feed}}$ ,  $DQO_{\text{out}}$ , volumen de biogás.

La ecuación de balance de masa se muestra a continuación:

$$A = E - S - C \quad \text{Ec. 4-1}$$

donde:

$A$ = Acumulación	[kgDQO/d]
$E$ = Entrada	[kgDQO/d]
$S$ = Salida	[kgDQO/d]
$C$ = Consumo	[kgDQO/d]

En la Tabla 4-8 se observan los resultados obtenidos del balance de masa junto con algunos resultados de la operación del biodigestor requeridos para el mismo:

## Resultados y Discusión

Tabla 4-8: Balance de masa

Datos	Unidades	Período 1	Período 2	Período 3
Días de Operación	d	7	6	9
Volumen de Alimentación	L/d	15	27	30
Producción de Biogás	L/d	63	495	299
Carga Orgánica	$\text{kg}_{\text{DQO}_{\text{feed}}}/\text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ d}$	1.03	2.08	2.61
Entrada	$\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{d}$	0.412	0.836	1.047
Salida	$\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{d}$	0.483	0.61	1.344
Acumulación	$\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{d}$	0.0029	-0.0301	-0.1871
Consumo	$\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{d}$	-0.074	0.256	-0.11
Producción Específica de Biogás	$\text{m}^3 \text{ biogás}/\text{kg}_{\text{DQO}_{\text{feed}}}$	0.152	0.592	0.286

De los resultados obtenidos en la Tabla 4-8 se observa que el consumo de materia orgánica para el período de operación 1 es de  $-0.074 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{d}$ , lo que nos indica que no hubo degradación durante este período de operación, teniendo como resultado acumulación en el proceso y baja producción específica de biogás. Este período comprende las etapas de puesta en marcha y estabilización del proceso razón por la cual se pueden explicar los resultados que se mencionan previamente.

En el período de operación 2 se observa un consumo de  $0.256 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{d}$ , lo que indica la existencia de buena degradación de materia orgánica en el proceso teniendo como resultado una muy buena producción específica de biogás con  $0.592 \text{ m}^3 \text{ biogás}/\text{kg}_{\text{DQO}_{\text{feed}}}$ , y la inexistencia de acumulación en el proceso expresada en la disminución del DQO en la mezcla reactiva. Los volúmenes de alimentación en el período de operación 2 son de 27 L/d.

Finalmente, en el período de operación 3 se tiene nuevamente un valor negativo en el consumo,  $-0.11$  lo que nos indica que la degradación en este período no es buena. La inexistencia de acumulación nos indica la suspensión de alimentación de materia orgánica al proceso, realizada en días previos a este período. Como resultado de la sobrecarga de materia orgánica que se realiza en este periodo de operación se tiene una producción de biogás específica baja,  $0,286 \text{ m}^3 \text{ biogás}/\text{kg}_{\text{DQO}_{\text{feed}}}$ . Durante este período de operación se tienen volúmenes de alimentación de 30 L/d.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

En esta tesis se busca la optimización en la operación de un biodigestor a escala piloto que se encuentra operando en el laboratorio de desarrollo de energías alternativas de la USFQ (LaDEA). Esta optimización se la hace con respecto al mejoramiento y maximización en la obtención de los productos del proceso de digestión anaerobia. Bajo el estricto control de las variables del proceso, temperatura, pH, adición de aditivo y volumen de alimentación.

El biodigestor a escala piloto de LaDEA, después de haber atravesado las etapas de diseño, construcción, puesta en marcha y operación en un período de 230 días inicia, su periodo de optimización con el cual se busca determinar y conocer los límites máximos de operatividad que presenta el mismo. Por esta razón se inicia un incremento paulatino en los volúmenes de alimentación realizados al sistema, para de esta manera incrementar la producción de biogás diaria, producción de fertilizante orgánico, disminuir los tiempos de residencia e incrementar la carga orgánica diaria. Todo esto bajo el estricto control y monitoreo de todas y cada una de las variables del proceso, además de los análisis realizados a los productos obtenidos. Al haber obtenido valores óptimos de operación en algunas de las variables del proceso como temperatura, pH, recirculación o agitación, las mismas no presentarán ningún tipo de cambio en su funcionamiento posterior.

El proceso de optimización se inicia con volúmenes de alimentación de 23 L/d o carga orgánica de  $1.43 \text{ kg DQO}_{\text{feed}} / \text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ d}$ . Con la finalidad de incrementar los niveles de productividad se procede a realizar un incremento paulatino en el volumen de alimentación llegando a un máximo de 35 L/d o carga orgánica de  $2.84 \text{ kg DQO}_{\text{feed}} / \text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ d}$ . Durante los incrementos en el volumen de alimentación al biodigestor, se observan ciertas tendencias y comportamientos que presenta el proceso, que junto con los resultados obtenidos en los análisis realizados a los productos, permiten determinar los valores bajo los cuales el biodigestor y el proceso de digestión anaerobia operan de manera óptima.

Durante los 272 días de operación que se tuvo en el biodigestor para encontrar sus valores óptimos de operación, se observa que el proceso de digestión anaerobia al sobrepasar volúmenes de alimentación de 27 L/d, o  $1.80 \text{ kg DQO}_{\text{feed}} / \text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ d}$ , empieza a presentar ciertos comportamientos o características, las cuales indican una falla en el sistema. Algunas de estas características son: disminución de los valores de pH por debajo del óptimo ( $< 6.5$ ), reducción en la producción de biogás junto con la calidad del mismo. Los análisis de

## Conclusiones y Recomendaciones

---

DQO, TS, oTS, alcalinidad y ácidos grasos volátiles sugieren también que durante estos períodos existe una clara acumulación de materia orgánica al interior del biodigestor y excesiva producción de ácidos, perjudicando al proceso de digestión anaerobia. Tomamos los volúmenes de alimentación del proceso como la variable más importante a controlar y a manipular, ya que a partir de la misma se tendrá o no un correcto funcionamiento de todo el proceso. Dependiendo del volumen de alimentación que se realiza al biodigestor, este presentará buena producción y calidad de biogás, valores de pH óptimos al interior del sistema; lo que regulará la cantidad de aditivo agregado al mismo, buena calidad de fertilizante orgánico; ya que si existe acumulación de materia orgánica al interior del sistema la materia no degradada será descargada en el biol.

Obviamente el volumen de alimentación representará la variable más importante de nuestro proceso, sólo si se tiene un correcto control sobre la temperatura, pH y agitación del sistema, los cuales son también parámetros muy importantes para el óptimo funcionamiento del biodigestor.

Es importante destacar que con volúmenes de alimentación ligeramente mayores a 27 L/d y con mezcla reactiva con valores de pH ligeramente por debajo a 6.5, se puede tener una mayor producción de biogás; pero en esta situación la importancia radica en la calidad que presentará este biogás, ya que el mismo no será de muy buena calidad.

La cantidad máxima de biogás producido fue de 971 L/d, con volumen de alimentación de 27 L/d y valores de pH por encima de 6.5, sin existencia de acumulación de materia orgánica en el sistema.

De manera que, si se tiene un buen manejo y un correcto funcionamiento en los parámetros de control, como son temperatura, pH y agitación del sistema, así como también un estricto monitoreo y una adecuada manipulación de materia prima y productos, el volumen máximo de alimentación que requerirá el sistema será de 27 L/d, con cantidades máximas de aditivo de 200g en cada alimentación. Se debe considerar la cantidad de materia orgánica ingresada al sistema como el regulador natural del proceso, ya que en función de la misma se tendrán, o no, las condiciones necesarias para que el sistema opere y produzca al máximo de su capacidad.

Se puede considerar esenciales, los análisis de alcalinidad y ácidos grasos volátiles, al momento de monitorear este tipo de procesos, ya que con los mismos se tiene la oportunidad de conocer el estado en el que se encuentra el sistema, y en caso de ser necesario aplicar medidas correctivas al proceso antes de que se perciban daños severos en el mismo, como

## Conclusiones y Recomendaciones

---

son descensos en el pH y deficiencia en la producción de biogás. Se debe recordar que en algunas ocasiones resulta más difícil reactivar una planta de biogás que iniciarla [17].

Los productos obtenidos del proceso, como se mencionó anteriormente, deben someterse continuamente a controles rigurosos para asegurar la calidad del producto y a la vez conocer el funcionamiento del proceso. Controles como la prueba de llama (cualitativa) son maneras rápidas y efectivas, las cuales permiten conocer de forma inmediata el estado del proceso y la calidad del producto, por lo que deben ser realizadas continuamente.

El fertilizante orgánico (biol) al atravesar por un proceso de digestión anaerobia y posteriormente un tratamiento térmico, para la eliminación o reducción de microorganismos patógenos, debe ser sometido a controles semanales o mensuales dependiendo de las facilidades que se tengan para este tipo de pruebas. Como se pudo observar el proceso de biodigestión y el tratamiento térmico son más que suficientes para cumplir con las normas establecidas para este producto.

Finalmente podemos decir, que si se siguen todas y cada una de las instrucciones, controles y cuidados mencionados a lo largo de esta tesis, la operación del biodigestor a escala piloto de LaDEA y de muchos otros biodigestores en general presentarán niveles de producción elevados y los consiguientes beneficios para sus propietarios.

## 6. Bibliografía

1 **Fragela, Marisol. et al;** *Los biodigestores como aportador de energía y mejoradores de suelos*; Universidad de Matanzas; 2007, pp 2 – 17.

2 **Decara, Lorena, Sandoval, Gabriela y Funes, Claudio;** *El uso de biodigestores en sistemas caprinos de la provincia de Córdoba*; Universidad Nacional de Río Cuarto; 2004, pp 4 – 13.

3 **Montgomery, Douglas C;** *Control estadístico de la calidad: Optimización de un proceso*; Limusa Wiley; 2007.

4 **Guevara, Antonio;** *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*; CEPIS; 1996, pp 11 – 40.

5 **Hiler, Edward A. y Bill A. Stout;** *Biomass Energy a Monograph*; TEES Monograph Series; 1985, pp 76 – 112.

6 **Moncayo, Gabriel;** *Dimensionamiento, Diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*; Aqualimpia Beratende Ingenieure; 2008.

7 **Urbáez Méndez Carlos Luis. et al;** *Biomasa: alternativa sustentable para la producción de Biogás*; Universidad de Pinar del Río; 1972

8 **López M. Manuel Enrique;** *El reactor anaeróbico tipo EASA: Nuevo reactor híbrido de flujo ascendente*; EASA CONSULTORES S.A.

9 **Dominguez, Pedro Luis y Ly, Julio;** *Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados*; Publicación (Sistemas integrados de producción con no rumiantes); Instituto de investigaciones porcinas; 2001, pp 35 – 38.

## Bibliografía

---

- 10 **Botero, Raúl y Preston, Thomas R;** *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas*; Manual para su instalación, operación y utilización; 1987.
- 11 **Consumer Eroski.** Biogás. *Produce energía ecológica y elimina residuos orgánicos.* (Acceso 4 de mayo de 2010) ([http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energia\\_y\\_ciencia/2005/04/07/141021.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/04/07/141021.php))
- 12 **Carrillo, Leonor;** *Energía de Biomasa*; 2004, pp 28 – 45.
- 13 **Duque, Carlos y Bravo, Juan;** *Manual técnico para la construcción y operación de Biodigestores*; PROCANOR; 2007, pp 5 – 9.
- 14 **Hilbert, Jorge;** *Manual para la producción de biogás*; Catelar: I.N.T.A.; 1985, pp 1 – 43.
- 15 **Alvarez, Fernando;** *Preparación y uso del biol*; ITDG; 2010, pp 29.
- 16 **Clesceri, Lenore, Greenberg, Arnold y Eaton, Andrew, [ed.].** *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* Vigésima edición. Washington DC : American Public Health Association, 1992.
- 17 **Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, ICAITI;** *Primer seminario de Biogás*; ROCAP; 1983
- 18 **Ramón, Romero y Simanca , J.L;** *Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo*; Revista ambiental agua, aire y suelo; Universidad de Pamplona, pp 21.
- 19 **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDEA;** *Biomasa: Digestores anaerobios*; 2007, pp 7 – 29

## Bibliografía

---

- 20 **López, José María.** *Digestión Anaeróbica de Lodos de Depuradora.* Tesis doctoral; Universidad de Alicante; Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química, 1989
- 21 **Riquelme Pérez, Jonathan;** *Problemas de estimación/ observación en procesos de biodigestión anaerobia;* Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de electrónica; 2009.
- 22 **Ripley, Boyle y J.C. Converse;** *Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of High – Strength Wastes;* Journal ( Water Pollution Control Federation); Vol 58, No.5; 1986, pp. 406 – 411
- 23 **Marquez Kacic, Camila;** *Estudio del tratamiento de lodos provenientes de pisciculturas mediante un sistema de digestión anaerobio;* Tesis, Universidad Católica de Temuco. Facultad de Ingeniería, 2005, pp 55 – 64.
- 24 **US EPA ( US Environmental Protection Agency).** *Environmental Regulation and Technology, Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge,* EPA/625/R-92-013,. US EPA, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio. USA. 1999.
- 25 **Hach Company.** *DR/890 COLORIMETER PROCEDURES MANUAL.* China: 1997 – 2007.
- 26 **Jenkins, S. Rod, Morgan, Joe M. y Zhang, Xiao.** *Measuring the Usable Carbonate Alkalinity of Operating Anaerobic Digesters.* Research Journal of the Water Pollution Control Federation, Vol. 63, No.1, 1991, pp. 28 – 34.
- 27 **Salamanca, Jairo Andrés.** *Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor a Escala Piloto para la Generación de Biogás y Fertilizante Orgánico.* Tesis de Grado. Universidad San Francisco de Quito. Ecuador 2009.