



FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

## Trabajo de Diploma

*Simulación del proceso de digestión anaerobia para predecir la producción de biogás y su composición en el biodigestor Laguna tapada de la Granja Integral Porcina, Martí II.*

Autora: Kiara Maibel Espinosa Rodríguez

Tutores: MsC. Luis Cepero Casas

DraC. Lourdes Y. González Sáez

MATANZAS

2022

Yo, Kiara Maibel Espinosa Rodríguez declaro ser la autora de este trabajo de diploma y autorizo al departamento de Química de la Universidad de Matanzas y a la Estación Experimental Indio Hatuey, utilizarlo de la manera que lo estime conveniente, además de todo aquel que necesite su consulta, siempre y cuando se respete el nombre del autor.

Para que así conste firma:

---

Kiara Maibel Espinosa Rodríguez  
Autor

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Institución

---

Nombre del presidente del tribunal

---

Firma

---

Evaluación

---

Fecha



*“Hágase más racional la vida humana. Aplíquese un orden económico internacional justo. Utilícese toda la ciencia necesaria para un desarrollo sostenido sin contaminación.”*

*Fidel Castro Ruz*

**DEDICATORIA**

- A mis padres Mayelín Rodríguez Pino y Arístides Espinosa Pers, dos pilares fundamentales en mi formación tanto profesional como personal, quienes me brindan su apoyo y amor para seguir alcanzando mis metas.
- A mi hermano por ser esa personita rebelde, pero quien me da ánimo por alcanzar mis metas para demostrarle que sí se puede lograr lo que uno se propone.
- A mi tía y a mi abuela por estar siempre al pendiente de mí y brindarme todo su amor y cariño.
- A mis abuelos por confiar en mí y para que se sigan sintiendo orgullosos de la nieta que tienen.
- A todas esas amistades de enseñanzas anteriores y de la misma universidad que siempre me dieron consejos alentadores y que se han convertido en parte de mi familia.

## AGRADECIMIENTOS

- En primer lugar, a mis padres que son las personas más importantes de mi vida, por guiarme por el buen camino y siempre confiar en mí, sin ellos no sería la persona y la estudiante que soy.
- A mi tía y a mi abuela por siempre estar ahí cuando las he necesitado y por todo el cariño y la confianza que me han brindado.
- A mis profesores por todo el conocimiento aportado.
- A mis tutores MsC. Luis Cepero Casas y DraC. Lourdes Y. González Sáez por guiarme en la realización de este proyecto.
- A Irma Cáceres por compartir sus experiencias y conocimientos, por brindarme su ayuda para sobrellevar la investigación.
- Al profesor Agustín Benítez Hernández por darme asesoramiento cuando lo necesité.
- A Yudit Lugo Morales por su ayuda incondicional en el trabajo y revisión de la tesis.
- A la Estación Experimental indio Hatuey por su aporte a mi formación profesional.
- A mis chicas del cuarto 143 por apoyarme en los momentos que más lo necesitaba: mi enciclopedia y niña Mariangela; mi estricta pero sentimental Kris; y en especial a Marisleidy, otra hermana de corazón que la vida me regaló. Gracias por ser mi familia universitaria.
- A mis Comadres, las que me dan los consejos más locos pero reales, las quiero.
- A todos aquellos que de una forma u otra confiaron en mí y me apoyaron siempre para cumplir este sueño de ser universitaria.

A todos,

¡MUCHAS GRACIAS!

**ABREVIATURAS**

DA: Digestión anaerobia

MSP: Modelos de simulación de procesos

%: porcentaje

°C: grados Celsius

TRH: Tiempo de retención hidráulico

EPDM: Etileno Propileno Dieno Monómero

PVC: policloruro de vinilo

HDPE: Polietileno de Alta Densidad

UV: luz ultravioleta

CH<sub>4</sub>: metano

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono

H<sub>2</sub>S: sulfuro de hidrógeno

H<sub>2</sub>: hidrógeno

NH<sub>3</sub>: amoníaco

NH<sub>4</sub>: nitrato

DBO: demanda biológica de oxígeno

DQO: demanda química de oxígeno

COT: Carbono Orgánico Total

MW: mega watt

m<sup>3</sup>: metros cúbicos

VAN: Valor actual neto

CFD: Costos Fijos Directos

TIR: tasa interna de retorno

## RESUMEN

La digestión anaerobia (DA) es uno de los procesos biológicos de mayor uso para el tratamiento de residuales con alta carga orgánica. El biogás (mezcla de metano y dióxido de carbono) y los efluentes sólidos y líquidos son subproductos de la digestión anaerobia de la materia orgánica. Dentro de las tecnologías existentes para la DA se encuentra la de laguna cubierta, utilizada en la granja integral porcino Martí II para el tratamiento de los residuales porcinos de esta empresa. En este trabajo se realizó la simulación del proceso de digestión anaerobia que ocurre en este biodigestor empleando como herramienta el simulador SuperPro Designer® v.10 para predecir la producción de biogás, su composición, así como evaluar y optimizar técnico, económico y ambientalmente su funcionamiento. La simulación fue validada con un valor experimental de producción de biogás y un modelo analítico para comprobar su comportamiento en el tiempo. La producción de biogás a partir de las excretas porcinas obtenida en el simulador fue de 2251,72 kg/h con una composición del biogás de 71,46% de metano ( $\text{CH}_4$ ), 26,73% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), 1,73% de Nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), y 0,07% de Sulfuro de Hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), resultados que se corresponde con los valores analíticos de laboratorio, validando técnicamente el uso de la simulación como alternativa apropiada para evaluar y optimizar técnico-económica y ambiental la tecnología bajo las condiciones cubanas.

**Palabras Claves:** biogás; digestión anaeróbica; modelo de simulación.

**ABSTRACT**

Anaerobic digestion (AD) is one of the most widely used biological processes for the treatment of waste with high organic load. Biogas (a mixture of methane and carbon dioxide) and solid and liquid effluents are by-products of the anaerobic digestion of organic matter. Among the existing AD technologies is the covered lagoon, used at the Martí II integrated pig farm for the treatment of pig waste from this company. In this work, the simulation of the anaerobic digestion process that occurs in this biodigester was carried out using the SuperPro Designer® v.10 simulator as a tool to predict the production of biogas, its composition, as well as to evaluate and optimize its technical, economic and environmental operation. The simulation was validated with an experimental value of biogas production and an analytical model to check its behavior over time. The biogas production from pig excreta obtained in the simulator was 2251.72 kg/h with a biogas composition of 71.46% methane (CH<sub>4</sub>), 26.73% carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), 1.73% nitrogen (N<sub>2</sub>), and 0.07% hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S), results that correspond to the laboratory analytical values, technically validating the use of simulation as an appropriate alternative to evaluate and optimize the technical-economic and environmental technology under Cuban conditions.

Key words: biogas; anaerobic digestion; simulation model.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
1.1 Digestión anaerobia .....	4
1.2 Etapas de la digestión anaerobia .....	5
1.2.1 Hidrólisis.....	5
1.2.2 Acidogénesis.....	6
1.2.3 Acetogénesis.....	6
1.2.4 Metanogénesis.....	6
1.3 Biodigestores.....	7
1.3.1 Biomasa o sustrato a utilizar.....	8
1.3.2 Condiciones para la biodigestión .....	8
1.3.3 Tipos de biodigestores y sus características .....	9
1.3.4 Partes fundamentales del biodigestor.....	10
1.3.5 Ventajas y desventajas de los biodigestores .....	11
1.3.6. Parámetros de control en los biodigestores.....	12
1.4 Biogás .....	18
1.4.1 Antecedentes del biogás .....	18
1.4.2 Composición del biogás .....	18
1.4.3 Usos del biogás .....	19
1.4.5 Producción de biogás a nivel mundial.....	20
1.4.6 Producción de biogás en Cuba .....	20
1.5 Simulación de un biodigestor de laguna tapada a través del simulador SuperPro Designer .....	21
1.5.1 La simulación de procesos químicos.....	21
1.5.2 Aplicaciones de la simulación de procesos.....	22
1.5.3 Simulador SuperPro Designer.....	22
1.5.4 Antecedentes del empleo del simulador SuperPro Designer.....	24
1.6. Conclusiones parciales .....	24
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS .....	25
2.1 Localización de la Granja Integral Porcina Martí II.....	25
2.2 Caracterización de la Granja Integral Porcina Martí II. ....	25
2.3 Descripción del proceso .....	25
2.5 Simuladores del proceso de producción .....	27
2.6 SuperPro Designer.....	27

2.6.1 Descripción del modelo .....	28
2.6.2 Desarrollo del modelo y operaciones .....	29
2.7 Impacto ambiental .....	35
2.8 Análisis económico .....	37
2.9. Conclusiones parciales .....	38
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	39
3.1 Validación del modelo empleando el programa SuperPro Designer .....	39
3.2 Componentes del flujo másico de entrada y salida del biodigestor. ....	39
3.3 Componentes del biogás en la simulación.....	42
3.4 Análisis del impacto ambiental .....	43
3.5 Análisis económico.....	47
3.6. Conclusiones parciales .....	48
CONCLUSIONES .....	50
RECOMENDACIONES .....	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52
ANEXOS .....	

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del medio ambiente por la deposición en el mismo de sustancias contaminantes está entre los principales problemas ambientales del mundo. En el caso de los contaminantes orgánicos una de las soluciones disponibles para reducir su carga orgánica y por tanto su impacto ambiental es el tratamiento anaerobio.

Para implementar esta solución tecnológica existe una amplia variedad de tecnologías comerciales. La tecnología más apropiada en cada caso depende de las condiciones específicas del problema a resolver. En particular las características de los residuales, la cantidad en que se producen y el costo de su tratamiento son criterios importantes para esta selección.

Como resultado del tratamiento anaerobio, se produce biogás y bio- abonos, los cuales son productos que valorizan económicamente la actividad de reducción de la carga contaminante. El uso del biogás como combustible gaseoso convierte a esta solución tecnológica medioambiental en una tecnología de energía renovable (Kapoor, 2020).

Según (Arrieta, 2016), la producción de biogás se produce como resultado de someter al estiércol, o a cualquier otro deshecho orgánico de la producción agrícola y agroindustrial (residuos lácteos, cárnicos, bagazos, cachaza, vinazas, etc.), a la acción de bacterias anaeróbicas en un proceso llamado biodigestión. En los biodigestores se mezcla el material orgánico con agua a temperaturas adecuadas, donde se originan un grupo de reacciones que producen el biogás.

Diversos estudios (Wassie & Adaramola, 2020), (Roubík & Mazancová, 2020) y (Laramee & Davis, 2013) han demostrado que los biodigestores se encuentran entre las opciones más favorables para la producción de energía limpia, rentable y ambientalmente racional con múltiples beneficios para los hogares y el medio ambiente. El proceso se realiza en cuatro etapas (González et al., 2015) de degradación anaeróbica de la materia orgánica. (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis). Para la producción de biogás se consta de cuatro componentes clave que son: materia prima, microorganismos, control del proceso y configuración del reactor o diseño tecnológico (Mel et al., 2015). Según (Cepero et al., 2019), (Siefers et al., 2010) dentro de la composición química del biogás tenemos los componentes fundamentales: CH<sub>4</sub> entre 40 - 70% en volumen, entre el 30-60% en volumen de CO<sub>2</sub>, 1-1.5% (H<sub>2</sub>), 0.3-3% N<sub>2</sub> y varias impurezas, especialmente H<sub>2</sub>S.

La producción de biogás se puede determinar por dos vías fundamentales: la analítica con su inherente impacto económico y la estimación a través de la simulación y los modelos matemáticos. Son varios los ejemplos de aplicación de la simulación en la modelación matemática y en la práctica que impactaron positivamente en el ámbito económico, técnico y ambiental (Díaz et al., 2015).

La simulación de procesos químicos es una herramienta fundamental para efectuar diversas tareas relacionadas con el diseño, control, evaluación y optimización técnico-económica de plantas y procesos relacionados con la industria química (Pérez et al., 2020). La simulación de proceso se define como la utilización de recursos de software para desarrollar un modelo matemático para la construcción de un modelo representativo de un proceso químico, con el fin de comprender el comportamiento real durante la operación de la planta (Auli et al., 2013).

Entre los simuladores más empleados en la actualidad se encuentra el SuperPro Designer, el cual se ha empleado para simular diferentes aplicaciones y procesos químicos, como: la digestión anaerobia de materia orgánica (Mani et al., 2016) para la obtención de biogás.

Desde 2009 la Estación Experimental de Indio Hatuey promueve la producción y utilización de la biodigestión anaeróbica en el sector agropecuario cubano con el fin de dar tratamiento a los diferentes residuales y a la vez usar las bondades de la energía y los bioabonos, con el apoyo de proyectos internacionales. Ello posibilitó la construcción de 176 biodigestores con diferentes tecnologías en 22 municipios, lo que contribuyó la formulación e implementación de estrategias locales de producción integrada de alimentos y bioenergía, con un uso diversificado del biogás, el aprovechamiento de los efluentes y el bioabono sólido en la mejora de suelos, y la creación de redes de suministros de biogás (Cepero et al., 2019). El municipio matancero de Martí es el escenario escogido para el desarrollo de un proyecto que persigue el autoabastecimiento local de energía y alimentos de forma económica y sostenible. Dicho proyecto es financiado por la Agencia Suiza de Desarrollo COSUDE, la cual contrató los servicios de la empresa alemana AquaLimpia Engineering e.K para la construcción de dos biodigestores en dos grandes centros porcinos, Martí I y II.

La Granja Integral Porcina (Martí II), se dedica a la cría de ganado porcino y vacuno para la alimentación del territorio del municipio de Martí y el turismo. Los residuos que se generan producen contaminación por lo que se transforman por biodigestión

anaeróbica en un biodigestor, tecnología laguna cubierta de 4200 m<sup>3</sup> de volumen de digestión, sin embargo, por ser una tecnología de nueva introducción en Cuba es necesario determinar la producción de biogás empleando el simulador SuperPro Designer® v.10 con el objetivo de evaluar y optimizar técnico-económica y ambiental la tecnología bajo las condiciones cubanas para el tratamiento de grandes cantidades de residuos porcinos.

Dada esta situación se definen como **Problema:**

No se cuenta con una evaluación de la tecnología de laguna cubierta de la Granja Integral Porcina Martí II, que permita optimizar técnico-económica y ambiental dicha tecnología para el tratamiento de los residuos generados.

Para dar solución a dicho problema se plantea la **Hipótesis:**

Si se simula el biodigestor de laguna tapada de la Granja Integral Porcina Martí II, entonces se podrá predecir la producción de biogás y su composición para evaluar y optimizar técnico-económica y ambientalmente dicha tecnología y verificar que es apropiada para el tratamiento de los residuales generados en el centro porcino.

### **Objetivo general**

Simular el proceso de digestión anaerobia para predecir la producción de biogás y su composición a partir de residuos de excretas de cerdos en el biodigestor laguna cubierta de la Granja Integral Porcina, Martí II.

### **Objetivos específicos**

- ✓ Diagnosticar la situación actual y la capacidad del sistema de tratamiento instalado.
- ✓ Proponer, a partir de la utilización de un simulador, la mejora del sistema de tratamiento de los residuales para incrementar la producción de Biogás.
- ✓ Analizar mediante la utilización de un simulador la composición del biogás resultante del tratamiento de residuales.
- ✓ Realizar el análisis ambiental y económico de la propuesta.

## CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se estudian los aspectos que recoge bibliografía especializada con respecto al tema objeto de estudio, la obtención de biogás a través de la digestión anaerobia. Se abordarán como principales temas el uso de simuladores para prevenir el impacto ambiental en este proceso, caracterización de los biodigestores, la digestión anaerobia como proceso y las generalidades del biogás.

### *1.1 Digestión anaerobia*

La digestión anaerobia ocurre espontáneamente en la naturaleza para degradar la materia orgánica hasta la forma más reducida del carbono: el metano ( $\text{CH}_4$ ), además se produce  $\text{CO}_2$  y trazas de otros gases ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , etc.). Esta mezcla conocida como biogás, fue llamada gas de pantanos, gas natural de yacimientos subterráneos o gas metabólico de rumiantes (Sosa, 2015). Es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa. Constituye un proceso vital dentro del ciclo de la materia orgánica en la naturaleza (García V., 2014).

La digestión anaerobia genera, además, un efluente que puede aplicarse en campos agrícolas para la recuperación de nutrientes, por sus propiedades como fertilizante. Este proceso biológico, si se compara con los procesos aerobios ofrece numerosas ventajas significativas, como la baja producción de lodos, menores requerimientos de energía y recuperación de energía verde. En la digestión anaerobia, 90.0 % de la energía disponible se transforma en  $\text{CH}_4$  por oxidación directa, y solo 10.0 % de la energía se consume en el crecimiento microbiano, mientras que en el proceso aerobio se consume, aproximadamente, 50.0 % (Pérez et al., 2016).

La biodigestión "se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las únicas premisas de que sean líquidos, contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable" (Barrera, 2020).

## 1.2 Etapas de la digestión anaerobia

### 1.2.1 Hidrólisis

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos (Varnero, 2011). La hidrólisis es el proceso mediante el cual se obtienen los sustratos orgánicos para el proceso de biodigestión, es el primer paso necesario para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos. La hidrólisis de las moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. Esta etapa depende de la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del pH, la concentración de  $\text{NH}_4$  y la concentración de los productos de la hidrólisis (García R., 2014).

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso. La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol (Varnero, 2011).

La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del

proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores (Varnero, 2011).

### *1.2.2 Acidogénesis*

En esta etapa se produce la fermentación de las moléculas solubles en compuestos acéticos, fórmicos (García R., 2014) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos (Varnero, 2011).

### *1.2.3 Acetogénesis*

Existen productos de la fermentación que deben ser transformados por las bacterias acidogénicas, en productos más sencillos como es el caso del etanol, ácidos grasos, acetato e hidrógeno. Los homoacetogénicos son un tipo de microorganismos acetogénicos que son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o algún compuesto monocarbonado ( $H_2/CO_2$ ) produciendo, con ello, acetato. Contrarias a las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno en su metabolismo, sino lo consumen como sustrato. Esta reacción permite mantener baja la presión de hidrógeno y con ello permitir la actividad de bacterias acidogénicas y acetogénicas (Varnero, 2011).

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaerobias han extraído el alimento de la biomasa y eliminan sus propios productos de desecho de sus células que serán usados como sustratos de las bacterias metanogénicas en la última etapa.

### *1.2.4 Metanogénesis*

En esta etapa actúan bacterias anaerobias estrictas, las metanogénicas. Son responsables de la formación de metano a partir de sustratos mono o bicarbonados unidos por algún enlace covalente polar (García R., 2014). Un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los

más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización. Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato,  $H_2/CO_2$ , formato, metanol y algunas metilaminas.

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen  $H_2/CO_2$  y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas. Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el  $H_2$  como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato, los *Methanosarcina* y *Methanotherix*. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior (Varnero, 2011).

### *1.3 Biodigestores*

Los biodigestores permiten la descomposición anaeróbica de la materia orgánica (sin contacto con el aire). En otras palabras, la falta de oxígeno favorece algunas bacterias que descomponen la materia (basura) y libera biogás, el cual está mayormente compuesto por metano el cual es inflamable y puede ser utilizado como combustible para la calefacción o para la cocina, o también ser refinado más puro en biometano.

El biodigestor es un depósito completamente hermético, en el que se dispone el estiércol de animales (Cubillos & Huertas, 2018), o en general desechos orgánicos en medio acuoso usando la biodigestión anaerobia, en la degradación de la materia se produce un fertilizante llamado bioI usado en agricultura y biogás (gas metano) usado para cocción de alimentos, calefacción, producción de energía eléctrica, entre otros (Barrera, 2020).

### 1.3.1 Biomasa o sustrato a utilizar

En general cualquier sustrato puede ser utilizado como biomasa en cuanto contengan carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa como componentes principales. Para seleccionar la biomasa se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- ✓ El contenido de sustancias orgánicas debe ser el apropiado para el tipo de fermentación elegido.
- ✓ El valor nutricional de la sustancia orgánica se relaciona directamente con el potencial de formación de biogás, por ende, se busca que sea lo más alto posible.
- ✓ El sustrato debe estar libre de agentes patógenos que puedan inhibir el proceso de fermentación.
- ✓ El contenido de sustancias perjudiciales o tóxicas debe ser controlado para permitir una tranquila evolución de la fermentación.
- ✓ Es importante que el resultado final del sustrato (después de haber aprovechado la fermentación para generar biogás) sea un desecho utilizable como por ejemplo fertilizante

### 1.3.2 Condiciones para la biodigestión

Las condiciones para la obtención de metano en el digestor son las siguientes:

- ✓ Un factor primordial es la temperatura, pues de ella depende que los microorganismos se encuentren activos y trabajando, debemos simular las condiciones óptimas para minimizar los tiempos de retención del sustrato. La temperatura ideal para la biodigestión es de 30 a 35°C aproximadamente.
- ✓ Un pH neutro o cercano al Neutro, 6,8 a 7,2.
- ✓ Herméticamente sellado, lo que facilita el trabajo de los microorganismos en un ambiente anaerobio y óptimo.
- ✓ Un nivel de humedad alto.
- ✓ El sustrato se encuentre bien mezclado y no tenga tamaños grandes que dificulten la degradación.
- ✓ Equilibrio de carbono/ nitrógeno.

### 1.3.3 Tipos de biodigestores y sus características

#### 1.3.3.1 Continuos

Cuando la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación, así como para su control. Dado que se genera una gran cantidad de biogás, habitualmente, éste se aprovecha en aplicaciones industriales.

#### 1.3.3.2 Semi continuo

Cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó. Este proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el digestor Indio y Chino.

#### 1.3.3.3 Discontinuos o régimen estacionario

Los digestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación. Esto se conoce también como digestores Batch o Batelada (Varnero, 2011).

#### 1.3.3.4 Biodigestor de lagunas cubiertas (lagunas tapadas)

Tal como su nombre lo indica, consiste en una excavación en el suelo en forma de laguna, la cual se protege con una membrana. Después del llenado completo de la laguna con la mezcla (agua y estiércol), se procede a cubrirla con membrana. Esta cubierta permite la captura de biogás (conocida como gasómetro) que se produce durante la descomposición de la materia orgánica, por lo general estiércol de porcinos o vacunos. Para la cubierta (donde se almacena el biogás) se deben utilizar membranas

de material elongable y resistente a los rayos UV. (Moncayo, 2013), recomienda utilizar membranas de caucho EPDM (etileno, propileno, dieno, monómero), como las AQFlex fabricadas por el Grupo AquaLimpia, y no utilizar membranas de PVC o de HDPE porque su tiempo de vida es de pocos años. Esto debido a que el PVC no es resistente a los rayos UV y es permeable al biogás, y las membranas de HDPE, no son flexibles y cuando se estiran se alargan y no regresan a su estado normal, por lo que se debilita y rajan. Estos dos materiales son aconsejables usar solo en el fondo de los digestores.

Estos digestores también pueden llevar sistemas de agitación de la mezcla, los cuales se ubican transversalmente y por debajo del nivel de la mezcla.

De acuerdo con (Tauseef et al., 2013), los digestores de lagunas cubiertas trabajan mejor con estiércol líquido con sólidos totales menores al 2%. Ellos también afirman que, debido a que la tasa de producción de metano en estos digestores depende de la temperatura ambiente, éstos no son productores eficientes de biogás en climas fríos. Sin embargo, son menos costosos que otros tipos de digestores y son efectivos reduciendo olores, aún en climas fríos. La exigencia de una gran superficie de tierra y pobres procesos de control son los principales inconvenientes de estos digestores.

La operación de un biodigestor es relativamente simple, aunque esto varía del modelo y los materiales a emplear.

#### *1.3.4 Partes fundamentales del biodigestor*

El tanque o reactor: es donde se produce la descomposición de la materia prima, puede estar construido con diferentes materiales, algunos de ellos flexibles, como las bolsas plásticas tubulares, y otros de tipo fijo como cemento o tanques plásticos. Su tamaño y volumen, se relaciona con la cantidad de biogás que podemos obtener y almacenar; así como la materia prima que necesitamos para alimentarlo.

Sistema de alimentación: es un dispositivo por el cual ingresa el material que se va a emplear durante el proceso, impidiendo el escape del biogás. De ser necesario deberá permitir que la materia prima sea triturada antes de ser procesada, y si está muy seca, se tendrá que agregar agua, por lo tanto, será necesario instalar un conducto adicional.

Control de presión: permite al usuario conocer en todo momento cuál es la acumulación de gases en el interior del tanque, y liberarla en caso necesario. En los biodigestores

domésticos, el sistema de control puede ser un manómetro y una válvula manual para emergencias; mientras que en los biodigestores industriales el proceso puede ser más complejo y automático, permitiendo en algunos casos vigilar y liberar la presión a distancia.

Válvula de seguridad: es una medida de control adicional. Permite soltar los gases de forma automática cuando el usuario no está vigilando, y se diseña para activarse al alcanzar una presión máxima.

Sistema de salida de gas: consta de una válvula de control que permite regular el caudal del biogás que sale.

Filtro de gases: tiene como función eliminar los gases no deseados (ejemplo el sulfuro de hidrógeno), para lo cual se debe incorporar un dispositivo de tratamiento, llamado filtro.

Sistema de purga: este mecanismo facilita la extracción de los restos del material digerido, los cuales se acumulan en forma de lodo, y contienen los nutrientes de la materia prima original, permitiendo que se pueda utilizar como fertilizante (Sotaquira, 2021).

### *1.3.5 Ventajas y desventajas de los biodigestores*

Según (Toala, 2013):

#### Ventajas

- ✓ Es una energía renovable y sustentable.
- ✓ Fomenta el desarrollo sustentable.
- ✓ Ayuda a controlar la excesiva acumulación de estiércol en las zonas ganaderas.
- ✓ Generación de fertilizantes naturales ricos en nutrientes, para cultivos de los campesinos.
- ✓ Ayudan a controlar y minimizar la contaminación ambiental, sin aportar al calentamiento global.
- ✓ Redirige y aprovecha los gases de efecto invernadero producidos por los vertederos y granjas industriales, lo cual reduce la huella de carbono de estos establecimientos y disminuye su contribución al cambio climático.

## Desventajas

- ✓ Debe evitarse cambios bruscos de temperatura, manteniéndola constante.
- ✓ Idealmente, la ubicación debe de estar cerca de donde se recolecta la biomasa.
- ✓ El biogás contiene un subproducto llamado sulfato de hidrógeno, el cual es un gas corrosivo y tóxico para los seres humanos.
- ✓ Si no se tiene un monitoreo constante de la presión interior, puede explotar o generar fugas de gas.
- ✓ El tiempo de durabilidad depende del tipo de biodigestor a construir.
- ✓ Al igual a cualquier otro gas combustible, existe el riesgo de explosión o incendios por un mal funcionamiento, mantenimiento o seguridad.

### 1.3.6. *Parámetros de control en los biodigestores*

#### *Sólidos Totales*

Los sólidos totales son los residuos materiales que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra de materia prima y su posterior secado en un horno a una temperatura definida (ya sea 105 °C o 80 °C). Los sólidos totales se dividen en sólidos suspendidos totales (aquellos que son retenidos por un filtro de poro nominal de 2 µm o menor) y en sólidos disueltos totales (los que pasan a través del filtro). Los sólidos disueltos totales comprenden sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y algunas pequeñas cantidades de materia orgánica que se disuelven en agua. A su vez, los sólidos totales, disueltos y en suspensión, pueden ser fijos y volátiles. Los primeros son aquellos que permanecen luego de una combustión a 500 °C. Los segundos equivalen al peso perdido durante la combustión (Arrieta, 2016).

#### *Sólidos Volátiles*

Si los sólidos totales se someten a una combustión o calentamiento bajo una temperatura de 600 °C durante 20 minutos o a 550 °C durante 6 horas en un horno bien ventilado, la materia orgánica se convierte a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (esta pérdida de peso se interpreta en términos de materia (o masa) orgánica o volátil, mientras que los sólidos

que no se volatilizan—las cenizas que quedan—se denominan sólidos fijos) (Moncayo, 2013). El método se basa en el hecho de que la mayoría de los materiales orgánicos se queman a esta temperatura, mientras que la mayoría de compuestos inorgánicos requieren mayores temperaturas. La definición de sólidos volátiles (SV), también denominados sólidos totales orgánicos o materia orgánica seca, varía en la literatura técnica. Así, por ejemplo, en el Manual de biogás, se definen a éstos como la porción de los sólidos totales que se libera de una muestra volatizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C. Muchos autores asumen que los sólidos volátiles representan el contenido exacto de materia orgánica de determinado tipo de biomasa. Sin embargo, la determinación de los sólidos volátiles y fijos por ignición no es la mejor medida para la distinción entre el material orgánico e inorgánico debido a que, por ejemplo, la pérdida de masa durante la combustión no se limita al material orgánico pudiendo también incluir la descomposición o volatilización de algunas sales minerales. Los métodos más apropiados para la caracterización de la materia orgánica incluyen la DBO y la DQO. (Arrieta, 2016).

### *Materia Orgánica*

La materia orgánica o compuesto orgánico es una sustancia química que contiene carbono, formando enlaces carbono – carbono y carbono – hidrógeno, y en muchos casos también puede contener oxígeno, nitrógeno, azufre, fósforo, boro, halógeno y otros elementos. Está compuesta, principalmente, por macromoléculas como carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Las aguas naturales sin contaminar presentan concentraciones (mg/l) muy bajas de materia orgánica. Las aguas contaminadas por materia orgánica pueden tener distintos orígenes como: el doméstico/urbano, el agrícola y el industrial. Los parámetros o indicadores que se utilizan para medir el grado de contaminación o de materia orgánica, presente en el agua se basan en la cantidad de oxígeno necesario para descomponer u oxidar los productos orgánicos. Entre éstos se encuentran la Demanda Bioquímica o Biológica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el Carbono Orgánico Total (COT) (Arrieta, 2016).

*Biodegradabilidad*

La biodegradabilidad de una sustancia hace referencia a que ésta se puede descomponer, con relativa rapidez, en sus componentes químicos más simples que lo conforman por medio de la acción de agentes biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales. La descomposición o degradación puede producirse por dos vías: la aerobia y la anaerobia. Las sustancias que son biodegradables pueden ser usadas como sustrato o alimento por parte de microorganismos para producir energía (por respiración celular), crear otros microorganismos y otras sustancias como los aminoácidos. Las sustancias que no son biodegradables bajo ambientes naturales se denominan recalcitrantes. Un compuesto recalcitrante, orgánico o inorgánico, es aquel que presenta estructuras químicas muy estables, por lo que es resistente a descomponerse a través de procesos químicos y al ataque biológico de microorganismos.

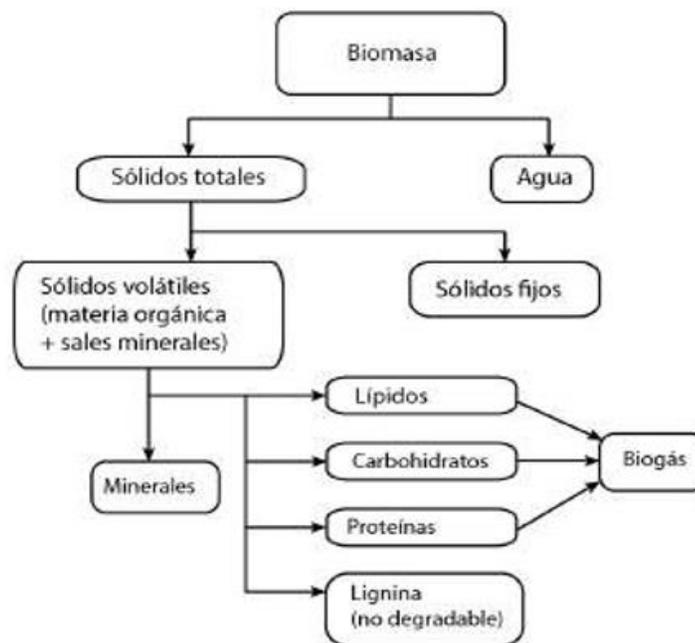


Figura 1.1: Composición de la biomasa y producción de biogás

Fuente: Elaboración propia

### *El pH*

El valor del pH es un importante indicador del funcionamiento del proceso dentro del biodigestor. En cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un rango de pH diferenciado (Tabla 1.1). El mayor problema generalmente es mantener el pH por encima de 6,6, ya que los ácidos orgánicos producidos como intermediarios en las primeras etapas debido a una sobrecarga o cualquier otro desequilibrio pueden provocar un rápido descenso del pH y el consiguiente cese de la producción de metano. La alcalinidad y el pH en la digestión anaerobia pueden ajustarse añadiendo a la mezcla diferentes productos químicos (bicarbonato de sodio y potasio, carbonato de calcio, etc.)

Tabla 1.1: Rangos óptimos de pH para los diferentes microorganismos

<b>Etapas</b>	<b>Tipo de bacterias</b>	<b>Rango óptimo pH</b>
<b>Hidrólisis</b>	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 – 7,4
<b>Acidogénesis</b>	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 – 7,4
<b>Acetogénesis</b>	Acetogénicas y homoacetogénicas	7,0 – 7,2
<b>Metanogénesis</b>	Metanogénicas hidrogenófilas y acetoclásticas	6,5 – 7,5

Fuente: (Jacinto, 2017)

### *Temperatura*

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en la digestión anaerobia, ya que determina la velocidad de degradación del proceso anaeróbico, principalmente las de las etapas de hidrólisis y metanogénesis. Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4 a 5 °C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 70 °C. Existen tres rangos de temperatura en los que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo (Arrieta, 2016):

- ✓ Psicrófilo: por debajo de 20 °C
- ✓ Mesófilo: entre 20 y 40 °C
- ✓ Termófilo: mas 40 °C

Los digestores que trabajan a temperaturas meso y termofílicas poseen generalmente sistemas de calefacción, aislamiento y control, los cuales son obviados en digestores

rurales económicos que trabajan a bajas temperaturas. La temperatura está íntimamente relacionada con los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digester para completar su degradación (Tiempo de retención Hidráulica, TRH). A medida que se aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención y en consecuencia se necesitará un menor volumen de reactor para digerir una misma cantidad de biomasa (Bergman, 2016)

Con el aumento en el rango de temperaturas se aumenta la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento y con ello la velocidad en la producción de biogás. No obstante, y a pesar de que el rango termófilo sea el más idóneo para obtener una rápida velocidad del proceso y mayor eliminación de patógenos, suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga. Además, operar en el rango termófilo requiere un mayor control y seguimiento del proceso, así como un mayor gasto energético para mantener la alta temperatura, mientras que el funcionamiento en el rango mesofílico es más estable y requiere un menor consumo de energía (Jacinto, 2017).

#### *Tiempos de retención hidráulica (TRH)*

Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los “sistemas discontinuos o Batch” donde el TRH coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digester. De acuerdo al diseño del reactor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir diferencias entre los tiempos de retención de líquidos y sólidos debido a lo cual suelen determinarse ambos valores. El TRH está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material. La relación costo beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura y el TRH, ya que varían los volúmenes, los sistemas paralelos de control, la calefacción y la eficiencia. El límite mínimo de los TRH está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digester extrae una

determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias (que pertenecen dentro del reactor) (Díaz de Basurto, 2013).

### *Sustancias inhibidoras*

El proceso de digestión anaerobia es inhibido por la presencia de tóxicos en el sistema. El nitrógeno amoniacal, el ácido sulfhídrico y los ácidos grasos volátiles son inhibidores importantes de las bacterias metanogénicas, así como los metales pesados a altas concentraciones. Este tipo de sustancias pueden encontrarse como componentes del sustrato de alimentación o como subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos del reactor. La literatura referente al proceso de digestión anaeróbica, habla de la variación que existe en los niveles de inhibición/toxicidad reportados para la mayoría de sustancias. La mayor razón para que existan estas variaciones es la complejidad del proceso de digestión anaerobia donde los mecanismos como el antagonismo, sinergismo y aclimatación pueden afectar significativamente a la inhibición (Díaz de Basurto, 2013).

### *Agitación*

Las siguientes razones para mantener un cierto grado de agitación en el medio en digestión son:

- Mezclado y homogeneizado del sustrato de alimentación con el inóculo.
- Distribución uniforme de calor para mantener una isoterma suficientemente correcta.
- Evitar la formación de espumas o la sedimentación.
- Favorecer la transferencia de gases, que pueden ser atrapados en forma de burbujas en el sustrato.

Diferentes métodos de agitación son la recirculación de materia digerida, agitación mecánica y la inyección del gas producido. La materia digerida se recircula desde el centro del reactor y tras mezclarse con el sustrato nuevo y calentarse se introduce de nuevo en el reactor. La agitación mecánica se lleva a cabo con turbinas de baja velocidad para no destruir los flóculos o agregados de bacterias, necesarios para mantener un proceso estable. Finalmente, el método de inyección de biogás es exitoso

para lograr la agitación del contenido del reactor y para evitar la formación de costras (Blanco et al., 2012)

## 1.4 Biogás

### 1.4.1 Antecedentes del biogás

Cuando a finales del siglo XVIII el físico italiano Alessandro Volta identificó por primera vez el metano ( $\text{CH}_4$ ) como el gas inflamable en las burbujas que emergían de los pantanos, no se pudo imaginar la importancia que este gas podría llegar a tener para la sociedad humana en los siglos venideros.

El metano alcanzó una especial importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles. Con el fin de la guerra y la fácil disponibilidad de combustibles fósiles, la mayoría de las instalaciones fueron cesando en su funcionamiento. Sin embargo, en India, a comienzos de la década de los 60, se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir de estiércol bovino con el doble propósito del aprovechamiento energético y la obtención de un biofertilizante. En China, a inicios de la década de los 70, se ha fomentado la construcción de digestores, mediante programas de ámbito nacional (Varnero, 2011).

Según (Portillo, 2013) la difusión del biogás se vio dificultada por el fácil acceso y el rendimiento que tenían los combustibles fósiles y, tras la crisis energética de los años 70, se reinició de nuevo la investigación y el desarrollo del biogás en todos los países del mundo, siendo más centrada en los países latinoamericanos.

Durante los últimos 20 años, el desarrollo del biogás ha tenido muchos avances importantes gracias a los descubrimientos sobre el proceso microbiológico y bioquímico que actúa en él y gracias a la investigación del comportamiento de los microorganismos que intervienen en las condiciones anaeróbicas.

### 1.4.2 Composición del biogás

El biogás se compone principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) y carbono dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) con pequeñas cantidades de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e hidrógeno saturado, hidrocarburos (es decir, etano, propano) (Bharathiraja et al., 2018). La composición mencionada se puede ver más detallada en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Composición típica del biogás

Componente	Fórmula	Concentración
Metano	CH <sub>4</sub>	40 - 75 %
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	15 - 60 %
Humedad	H <sub>2</sub> O	1 - 5 %
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0 - 5 %
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	Trazas
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	0 - 5000 ppm
Oxígeno	O <sub>2</sub>	< 2 %
Trazas de gases	-	< 2 %
Amoníaco	-	0-500 ppm

Fuente: (Bharathiraja et al., 2018)

#### 1.4.3 Usos del biogás

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos:

- ✓ En una caldera para generación de calor o electricidad.
- ✓ En motores o turbinas para generar electricidad.
- ✓ En pilas de combustible, previa realización de una limpieza de H<sub>2</sub>S y otros contaminantes de las membranas.
- ✓ Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural.
- ✓ Uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol o el gas natural licuado.
- ✓ Combustible de automoción.

El biogás, además de metano tiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas: agua, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, entre otros. Por tanto, es necesaria la limpieza del combustible, dependiendo del uso final. Una aplicación tipo de la digestión anaerobia es en las granjas de ganado bovino y porcino de gran tamaño o como planta comarcal de gestión de residuos en zonas de alta concentración de ganado estabulado, por el gran problema que generan los purines. En este caso se puede proponer y

proyectar una planta de digestión anaerobia de producción de biogás como auto abastecimiento energético según las necesidades (Toala, 2013).

#### *1.4.5 Producción de biogás a nivel mundial*

A partir del descubrimiento del italiano Alessandro Volta, la tecnología de los biodigestores fue usada en algunas partes del mundo, por ejemplo, Alemania montó su primera planta anaeróbica en 1906, y para 1997 tenía por encima de 400 plantas industriales; para el 2010 se espera una capacidad instalada de 5.300 a 6.300 MW.

Dinamarca tiene cerca de 20 plantas centralizadas de biogás debido a una política impulsada por el gobierno. España espera tratar los 83,5 millones de toneladas de desecho anuales y convertirlos en 8000 millones de m<sup>3</sup> de biogás/año, gracias al empuje del Ministerio de Ciencia e Innovación.

Grandes promotores de dicha tecnología lo son también Suiza y Suecia. En China se estima que más de 20 millones de personas utilizan como fuente de energía renovable el Biogás. El uso potencial de esta tecnología se debe a que es un proceso tecnológico simple de usar, con bajos requerimientos, utilizado para convertir materia orgánica en un vasto rango de tipos en metano.

Teniendo un sin número de ventajas que favorecen al ambiente, como son la reducción malos olores, patógenos y en algunos casos, gases de efecto invernadero. Finalmente, la tecnología no afecta el contenido de nutrientes, lo que convierte el efluente en un excelente fertilizante para suelos.

Un detalle clave para sacar el máximo provecho a la tecnología de digestores anaeróbicos en fincas agropecuarias, es un adecuado dimensionamiento del biodigestor. Cada biodigestor debería ser dimensionado acorde a las características de cada finca, indiferente de su tamaño; la tecnología es apta para granjas de cualquier tamaño (Toala, 2013).

#### *1.4.6 Producción de biogás en Cuba*

Con la entrega de tierras a pequeños productores, las crías de cerdos –con el consiguiente aumento de la contaminación hídrica– y los elevados precios que ha alcanzado la energía en el país, la utilización del biogás se muestra como una alternativa apropiada. Los productores están motivados y las normas ambientales son

más rigurosas, por lo que la demanda de digestores va en aumento, solo limitada por los costos y la disponibilidad de materiales; todo ello ha creado un ambiente favorable para el desarrollo del biogás, que es una solución inteligente para el tratamiento de las excretas animales que se generan (Suárez et al., 2018). Se difunden nuevas tecnologías apropiadas y aplicables en Cuba, se fomentan redes nacionales e internacionales y se incide en políticas públicas, todo ello apoyado en la formulación e implementación de estrategias locales de producción integrada de alimentos y energía. Asimismo, se priorizan estos temas para contribuir a sustituir importaciones de alimentos y de combustibles, a la vez que se reducen las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), se eliminan residuales contaminantes y se recuperan suelos degradados, además de contribuir a la adaptación de la agricultura al cambio climático y a la mejora de la calidad de vida en el contexto rural (Suárez et al., 2017).

### *1.5 Simulación de un biodigestor de laguna tapada a través del simulador SuperPro Designer*

#### *1.5.1 La simulación de procesos químicos*

La simulación se está convirtiendo en un requisito para el diseño de procesos importantes. Mediante el empleo de la simulación, los ingenieros y proyectistas pueden identificar problemas potenciales en el tiempo y tomar las debidas acciones correctivas. Un uso común de la simulación de proceso consiste en el mapeo de proceso y análisis de costo (Auli et al., 2013).

La simulación y modelación de procesos es la aplicación de un rango de herramientas de software para analizar operaciones unitarias individuales (o etapas del proceso) y su relación con el proceso global. La simulación de proceso se define entonces como la utilización de recursos de software de computadora para desarrollar modelos matemáticos con el fin de construir un modelo exacto y representativo de un proceso químico con el fin de comprender su comportamiento actual durante la operación regular de la planta. Estas herramientas pueden ser empleadas en todas las etapas del desarrollo de procesos, desde el diseño conceptual a través de la operación del proceso y su posterior optimización.

Los simuladores de proceso ofrecen la oportunidad de reducir el tiempo requerido para el desarrollo de proceso. Permiten realizar comparaciones de las alternativas de proceso en una base consistente de tal forma que un gran número de ideas puedan ser sintetizadas y analizadas interactivamente en un corto período de tiempo. Durante la etapa de desarrollo de proceso, los simuladores son empleados para facilitar las siguientes tareas: representar el proceso completo en la computadora, efectuar balances de masa y energía, estimar las dimensiones del equipamiento; calcular la demanda de mano de obra u servicios auxiliares en función del tiempo; estimar el ciclo de tiempo de proceso; efectuar análisis de costo; y evaluar el impacto medioambiental (Pérez et al., 2020).

### *1.5.2 Aplicaciones de la simulación de procesos*

La simulación de proceso es una herramienta para los ingenieros químicos y de proceso que puede ser empleada en la ejecución de tareas repetitivas o en actividades de gran complejidad que tienen que ser resueltas en periodos de tiempo relativamente cortos.

Entre las diversas aplicaciones que tiene la simulación de procesos se encuentran (Gil et al., 2016):

- ✓ Utilizar de forma más eficiente los recursos energéticos.
- ✓ Facilita la modelación, diseño y optimización de procesos integrados en un amplio rango de industrias.
- ✓ Minimizar los costos de operación y la emisión de corrientes de residuales que pudieran ser contaminantes.
- ✓ Incrementar el rendimiento y la eficiencia del proceso.
- ✓ Mejorar el control del proceso.
- ✓ Impulsar la enseñanza del diseño de proceso.

### *1.5.3 Simulador SuperPro Designer*

El SuperPro Designer es un simulador profesional de proceso desarrollado por Intelligent Incorporated, el cual facilita la modelación, evaluación y optimización de procesos integrados en una amplia gama de industrias tales como la farmacéutica, agroquímica, alimenticia, tratamiento de agua y biotecnológica. También está diseñada

específicamente para procesos que incluyen componentes biológicos. Aparte de la modelación de procesos, el simulador SuperPro Designer contiene varias herramientas avanzadas tales como la realización de cálculos de balances de masa y energía, base de datos extensiva para componentes y mezclas, el dimensionamiento de equipos, cálculos económicos y de rentabilidad del proceso, y la caracterización de los residuales obtenidos (Qureshi et al., 2013).

Según (Bergman, 2016), el SuperPro Designer es un software que se especializa en realizar cálculos técnico-económicos en la ingeniería de proceso, siendo capaz de establecer un proceso tanto por lotes (Batch) como continuo y de suministrar bases de datos para compuestos químicos, equipamiento y aspectos económicos. Una vez inicializado el simulador y haber definido los costos y ganancias, el programa es capaz de suministrarle al usuario resultados relacionados con la estimación de costo, el cual toma en cuenta los costos capitales y de operación, así como también costos auxiliares y administrativos.

La simulación en SuperPro Designer está centrada alrededor del diagrama de flujo del proceso. Después de escoger el modo de operación (por lotes o continuo), el usuario ubica los equipos en el espacio de trabajo y los conecta mediante una herramienta de conexión, la cual simula tuberías.

Este simulador ofrece una base de datos de compuestos químicos con un conjunto parcialmente completo de propiedades físicas. El usuario tiene que seleccionar aquellos compuestos químicos que deberán ser empleados en el proceso, y se recomienda comprobar si los parámetros físicos necesarios de estos compuestos están disponibles. Los precios de compra y venta de los compuestos químicos están asignados ocasionalmente por defecto, pero en la mayoría de los casos estos deberán insertarse manualmente por el usuario.

El SuperPro Designer divide las corrientes en una de estas tres categorías: Materias primas, Desecho y Ganancia. Las materias primas son las corrientes de entrada y necesitan tener especificados sus precios de adquisición. Las corrientes de desecho son corrientes de salida y necesitan tener definidos sus costos de eliminación. Las corrientes de ganancias son corrientes de salida también, y necesitan tener fijados sus precios de venta (Bergman, 2016).

#### 1.5.4 Antecedentes del empleo del simulador SuperPro Designer

Son varios los autores que han empleado el simulador SuperPro Designer para evaluar o diseñar plantas químicas. (Lam et al., 2014) Efectuaron un estudio tecno-económico con respecto a la producción de ácido succínico a partir de la fermentación de residuos alimenticios en Hong Kong. Para la realización de los balances de masa y energía, así como también para determinar la factibilidad económica de la propuesta tecnológica se empleó el SuperPro Designer. Los resultados obtenidos indicaron que el proceso propuesto es factible desde el punto de vista técnico económico. Otros autores (Mani et al., 2016) evaluaron en SuperPro Designer ciertos modelos cinéticos de hidrólisis de materia orgánica compleja y degradación de ácido grasos volátiles en un proceso de digestión anaerobia. También se efectuó la evaluación del modelo cinético para un sistema integrado simulado de digestión anaerobia líquida de estiércol y digestión anaerobia en estado sólido de rastrojo de maíz. (Balaska et al., 2017).

#### 1.6. Conclusiones parciales

- ✓ La digestión anaerobia ocurre espontáneamente en la naturaleza para degradar la materia orgánica hasta la forma más reducida del carbono: el metano ( $\text{CH}_4$ ), además se produce  $\text{CO}_2$  y trazas de otros gases ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , etc.).
- ✓ La digestión anaerobia consta de cuatro etapas, estas son: la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis.
- ✓ El biodigestor es un depósito completamente hermético, en el que se dispone el estiércol de animales o en general desechos orgánicos en medio acuoso usando la biodigestión anaerobia.
- ✓ El SuperPro Designer es un simulador profesional de proceso desarrollado por Intelligen Incorporated, el cual facilita la modelación, evaluación y optimización de procesos integrados en una amplia gama de industrias.

## CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se realiza una breve caracterización de la Granja Integral Porcina Martí II, perteneciente al municipio de Martí en la provincia de Matanzas. Se describe el proceso tecnológico que se lleva a cabo para la obtención de biogás a partir de las excretas de cerdo y los principales equipos que intervienen. Se analizan los diferentes aspectos a tener en cuenta para la simulación de este proceso en el simulador SuperPro Designer. También, se evaluarán los parámetros económicos y de impacto ambiental.

### *2.1 Localización de la Granja Integral Porcina Martí II*

La Granja Integral José Martí II, se encuentra ubicada en el municipio Martí de la provincia de Matanzas. El municipio Martí está situado al noroeste de la provincia Matanzas. Cuenta con 924,9 km<sup>2</sup> de extensión y se divide en 25 asentamientos, 4 urbanos y 21 rurales, con una población de 23137 habitantes. La actividad económica fundamental es la agropecuaria (Anexo 1).

### *2.2 Caracterización de la Granja Integral Porcina Martí II.*

Esta empresa se dedica a la cría de ganado porcino y vacuno para la alimentación del territorio del municipio de Martí y el turismo y cuenta con un biodigestor tecnología laguna cubierta de 4200 m<sup>3</sup> de volumen de digestión para el tratamiento de los residuales porcinos. El biogás resultante del estiércol se emplea como combustible para la generación de electricidad, se aprovechan los lodos estabilizados en lechos de secado como fertilizante orgánico en cultivos varios cercanos y el agua resultante del proceso para el riego de los mismos (Anexo 2).

### *2.3 Descripción del proceso*

El proceso de producción de biogás comienza en las naves pertenecientes a la Granja Porcina Integral Martí II, donde las excretas, mezcladas con agua de limpieza se transportan a través de canales hacia un tanque de homogenización que posee un volumen de 15 m<sup>3</sup>. Previo a este tanque se encuentran situadas trampas de sólidos y

arenas con el objetivo de eliminar cualquier objeto no deseado que pueda obstruir el proceso. La mezcla es impulsada mediante dos bombas al digestor de laguna tapada, donde ocurre el proceso de biodigestión anaeróbica. El mismo tiene un volumen de digestión de 4200 m<sup>3</sup>. Presenta una membrana flexible EPDM que sirve de gasómetro pudiendo acumular de 4800 a 5000 m<sup>3</sup> de biogás.

El biodigestor presenta un sistema de agitación compuesto por dos agitadores de 18,5 kW que funcionan de forma alterna e intermitente cada tres horas por 30 minutos moviendo el sustrato en general. El tiempo de retención de la materia orgánica es de aproximadamente 30 días con una carga diaria de 2% de sólidos totales (ST), carga baja, comparada con la que fue diseñada dicho digestor (4% de ST) para la obtención del biogás.

Al finalizar el proceso, según los días establecidos, el agua residual obtenida es depositada en una laguna aeróbica para realizar un segundo tratamiento, pasando sucesivamente a otras dos lagunas para después ser emitidas a un cuerpo receptor a donde a partir de aquí son utilizadas en fertirriego.

En el caso de los lodos digeridos, estos son extraídos del fondo del biodigestor por dos bombas de lodos y se conducen a un lecho de secado mediante radiación solar y posteriormente son utilizados como bioabonos en la agricultura.

La parte gaseosa es transportada a través de una tubería y filtrado el gas con el fin de eliminar los condensados que presenta el biogás y un filtro de desulfuración que contiene pellets de óxido de hierro, para así eliminar todo el H<sub>2</sub>S, obteniéndose así un producto final compuesta por 66-70% de metano, un 25-33 % de CO<sub>2</sub>, 1-5 % de nitrógeno y 0.7-0.18 % de H<sub>2</sub>S. El biodigestor tiene un sistema de seguridad compuesto por presostatos, antorcha y válvula de seguridad que hacen que cuando el biodigestor rebase los límites de presiones y acumulación de Biogás estos se activen, la antorcha comienza a trabajar y quemar biogás de forma automática con presiones de 1,5 -2 mbar y el de la válvula de seguridad a ±5 mbar (figura 2.1).

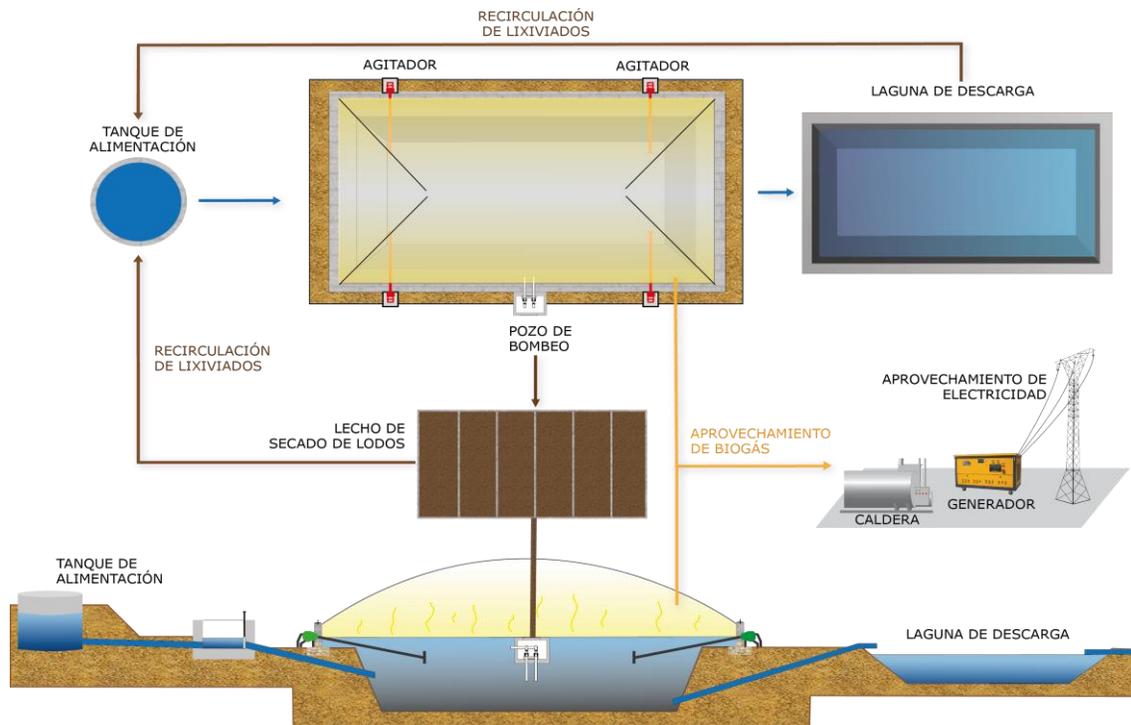


Figura 2.1: Diagrama de flujo típico de biodigestor laguna cubierta

### 2.5 Simuladores del proceso de producción

Los modelos matemáticos han ganado en complejidad por lo que, bajo las condiciones del diseño de experimentos, la simulación del modelo surge como una herramienta para resolver y analizar los resultados obtenidos (Hernández & Aguirre, 2005). Para la simulación del proceso de producción de biogás se pueden utilizar diferentes softwares. Según (Mel et al., 2015), el SuperPro Designer para calcular automáticamente balances de masa y energía, el volumen de cada proceso de unidad, manejan la composición de materias primas y productos, la estimación del capital y los costos operativos, los ingresos de productos y coproductos. A partir de la simulación, se puede observar la producción biogás.

### 2.6 SuperPro Designer

SuperPro Designer es un conjunto de las herramientas de la serie Pro-Designer que incluye BatchPro Designer, BioPro Designer and EnviroPro Designer. Los cuatro

productos tienen las mismas características (en términos de simulación, evaluación económica, análisis de rendimiento específico, valoración de impacto ambiental, etc.) y usan la misma interfaz, pero ellos difieren en la lista de unidades de modelamiento; BatchPro y BioPro Designer incluyen modelos principalmente para productos químicos, bioquímicos, fármacos, alimentos, formulación de productos, y procesos de embalaje. EnviroPro Designer incluye modelos principalmente para el tratamiento de agua y agua residuales, reciclaje de residuos, eliminación de residuos, y procesos de contaminación del aire.

Este programa se ubica dentro de los Simuladores Totales, desarrollado por Intelligen, Inc. SuperPro Designer facilita el modelamiento, evaluación y optimización de procesos integrados en un amplio rango de industrias (Farmacéutica, Biotecnología, Productos químicos especiales, Alimentos, Bienes de consumo, Procesamiento de Minerales, Microelectrónica, Purificación de Agua, Tratamiento de Aguas residuales, Control de Polución de Aire, etc.). La combinación de los módulos de operación de manufactura y ambientales en el mismo paquete permite al usuario concurrentemente diseñar y evaluar la manufactura y los procesos de tratamiento a final de la línea productiva y practicar la minimización de residuos para prevenir la contaminación, así como también controlar la contaminación. Constituye una herramienta valiosa para el ingeniero y el científico en el desarrollo de procesos, la ingeniería de procesos, y manufactura. El programa usa el concepto de Unidad de procedimientos.

### *2.6.1 Descripción del modelo.*

Para el simulador se consideran dos grupos de reacciones para la digestión o fermentación anaeróbica. Estos dos grupos (A y B) dependen de la complejidad de la reacción, definiéndose condiciones específicas para las etapas de la digestión (figura 2.2).

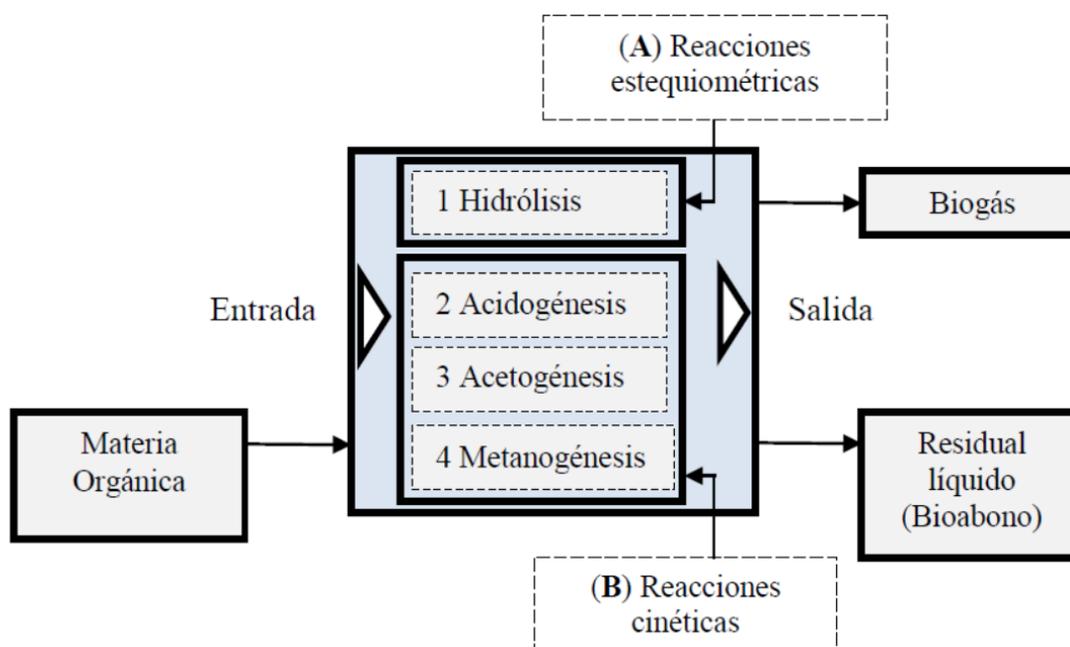


Figura 2.2. Esquema general del proceso de simulación

Para la definición del modelo, se consideran las reacciones estequiométricas (A) que intervienen en la hidrólisis (Anexo 3) y para el desarrollo de las etapas posteriores de la digestión anaeróbica, las cuales dependen de la cinética en las reacciones (B), se parten de las reacciones cinéticas de la degradación de aminoácidos y las etapas acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas (Anexo 4).

### 2.6.2 Desarrollo del modelo y operaciones

El proceso de simulación del modelo se desarrolla sobre la base de cuatro etapas para la producción de biogás, tales como la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Estas cuatro etapas describen metabolismos intermedios que parten de la composición de sustratos formados por carbohidratos, proteínas y grasas donde se rompen en monómeros, transformándose finalmente en metano, dióxido de carbono y trazas de gases que se forman en menor cuantía.

Estos reactores permiten desarrollar cada una de las etapas de la digestión, constituyendo ambos en conjunto como un reactor anaeróbico virtual para estimar la producción de biogás. Todas las condiciones del proceso como los Sólidos Totales (ST: 9%), Sólidos Volátiles (SV: 87%), pH: 7; razón de flujo (2,203.72 kg/h), temperatura

(26°C), y tiempo de retención hidráulica (TRH:30 días) del sustrato son definidas a la entrada de los parámetros de la simulación siguiendo los siguientes pasos.

*Crear un nuevo proceso*

Primeramente, al abrir el programa SuperPro Designer se ilustra una ventana (Figura 2.3) donde se selecciona en dependencia de lo deseado. En este caso será la primera opción que no es más que Start a New Process File (Comenzar un nuevo proceso).

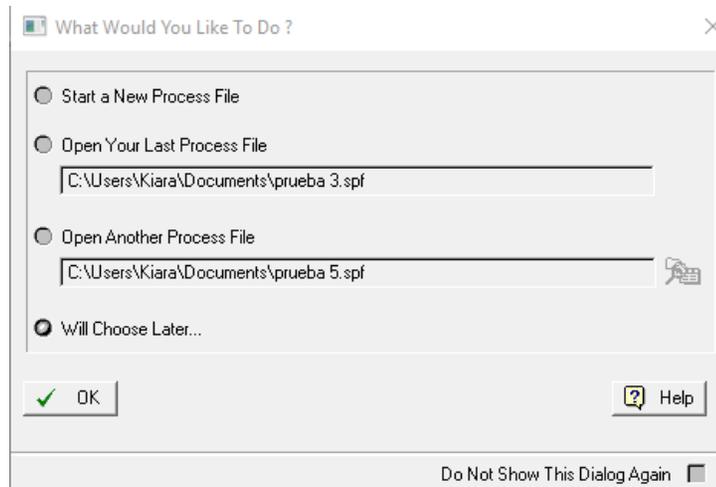


Figura 2.3. Creación de un nuevo proceso en el programa SuperPro Designer.

*Modo de operación del proceso*

Se necesita seleccionar el modo operacional del proceso que se desea simular (Figura 2.4), ya sea, si el proceso se realiza en Batch o Continuous. Además, es necesario plasmar el tiempo anual de operación del proceso.

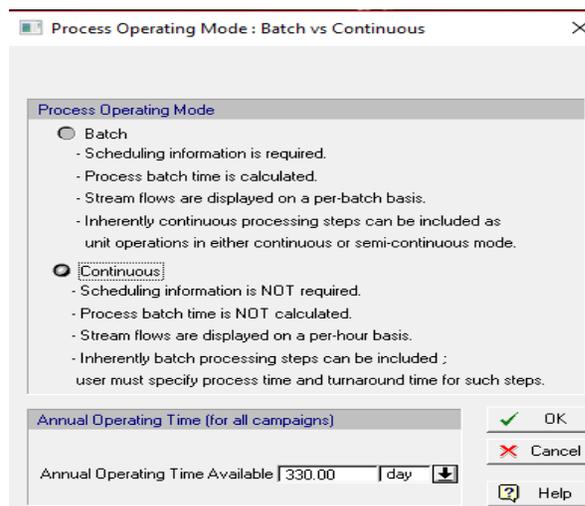


Figura 2.4. Selección del modo de operación del proceso.

*Introducción de los componentes*

Se hace necesario introducir los componentes, ya sean puros o mezclas, inmersos en el proceso (Figura 2.5 y 2.6). En este caso solamente se introducen componentes puros ilustrados en la Figura 2.7.

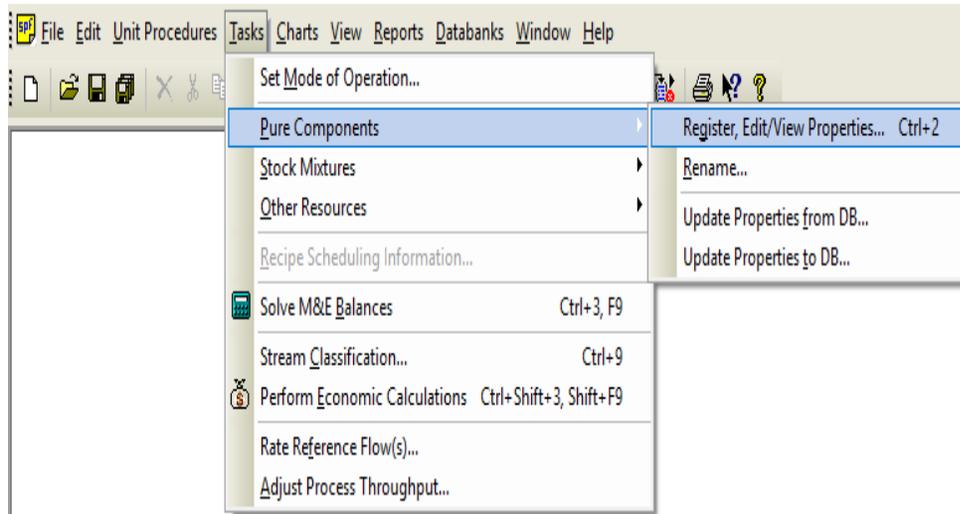


Figura 2.5. Selección de introducción de los componentes (puros) del proceso

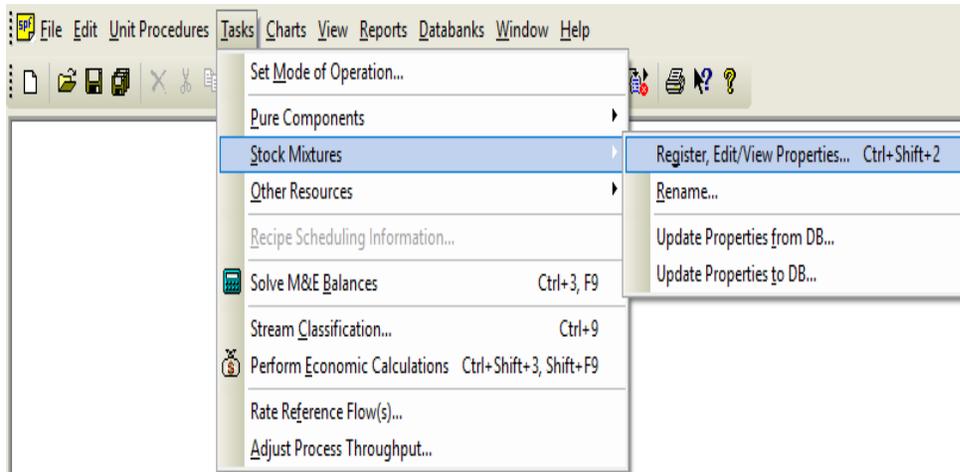


Figura 2.6. Selección de introducción de los componentes (mezclas) del proceso.

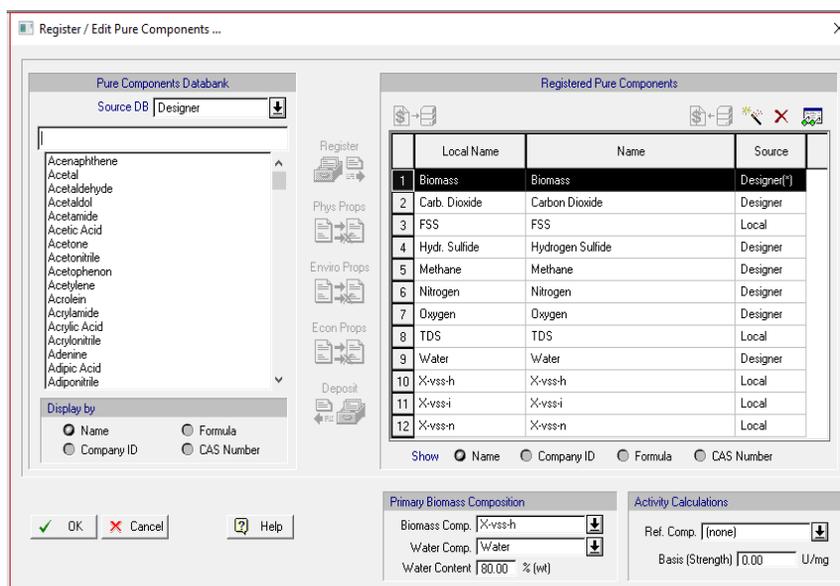


Figura 2.7. Introducción de los valores de los componentes.

Fue necesario crear nuevos componentes que no se encontraban en la lista de componentes del programa al surgir estos del propio proceso. Las características de estos componentes son obtenidas con varios análisis de laboratorios.

### *Equipos necesarios para el tratamiento de residuales y sus características*

Con el objetivo de efectuar el tratamiento a los residuales (excretas de cerdo), de la Granja Integral Porcina Martí II, mediante el proceso de digestión anaerobia, se selecciona en la pestaña *Unit Procedures* los equipos necesarios.

### Digestor Anaerobio

Primeramente, se selecciona el tipo de reactor en correspondencia con el proceso, como se muestra en la Figura 2.8 y 2.9.

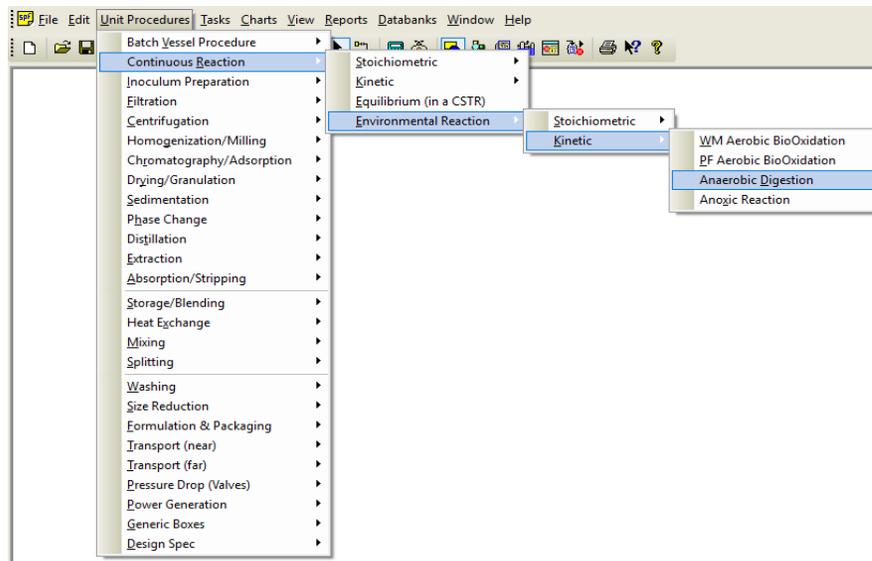


Figura 2.8. Selección del tipo de reactor.

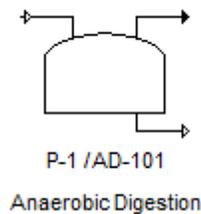


Figura 2.9. Reactor de Digestión anaerobia.

Este reactor para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia requiere de las siguientes características para su diseño:

Condiciones de operación:

- ✓ Thermal Mode (Modelo Térmico): que no es más que definir si el proceso sería de forma adiabática, si se establece la temperatura de salida o si se debe establecer la temperatura de entrada y salida, temperatura ambiente.
- ✓ Heat Transfer Agent (Agente de Transferencia de Calor): En este caso se utiliza agua de enfriamiento (Chilled Water).
- ✓ Power Consumption (Consumo de Energía): se selecciona la opción de consumo estándar en el equipo.
- ✓ Pressure (Presión): Presión de trabajo en el reactor, (1,5 -2 mbar)

Volumen:

- ✓ Residence Time (Tiempo de Residencia): Se plasma el tiempo de permanencia del sustrato en el digestor, en nuestro proceso es aproximadamente 30 días.
- ✓ Working to Vessel Volume Ratio (Volumen de Trabajo): el volumen de trabajo en este caso sería el volumen donde ocurre el proceso de digestión que aproximadamente en un 80% del volumen total (4200m<sup>3</sup>).

Reacciones

- ✓ En este aspecto se tiene en cuenta la reacción que se va a llevar a cabo en el reactor, con los coeficientes estequiométricos correspondientes y balanceados

Liberación de gases

- ✓ Aquí quedarían plasmado en que porciento se obtienen los diferentes gases que surgen en el proceso.

Al poner en marcha dicho reactor se obtendrán valores tanto de líquidos como de gases, los cuales saldrán del reactor por las corrientes S-103 y S-102 respectivamente.

Filtro

Seguidamente, como en el proceso es necesario filtrar el producto gaseoso para eliminar el contenido de H<sub>2</sub>S presente en esta corriente, se selecciona de la siguiente manera (Figura 2.10 y 2.11):

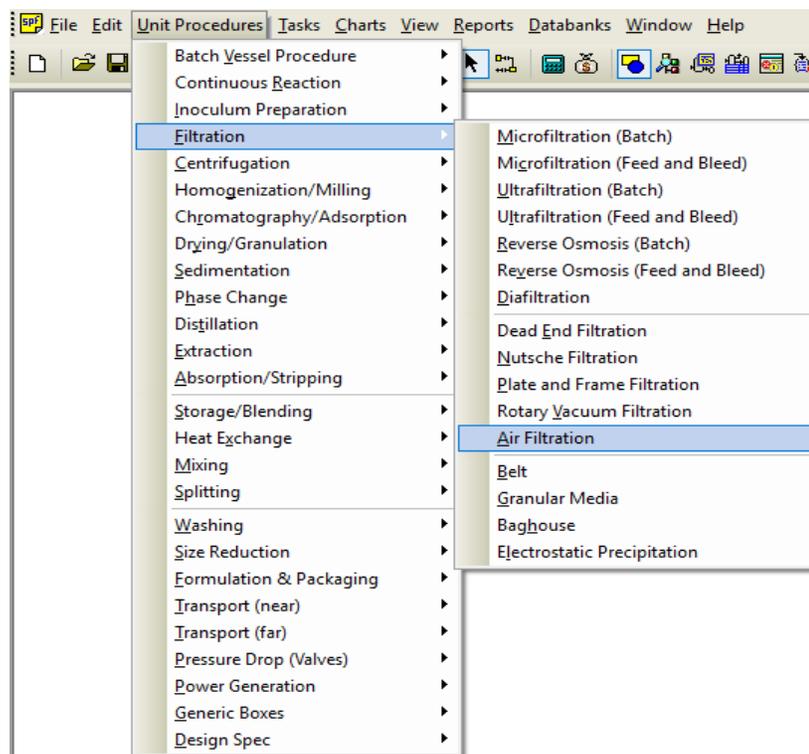


Figura 2.10. Selección del tipo de filtro.



Figura 2.11. Filtro de aire.

Nota: Por problemas del software el programa no permite insertar más de dos equipos. Por esta razón no se lleva a cabo la simulación del proceso por completo, solamente la inserción de los componentes: reacción química llevada a cabo, la obtención del producto deseado, es decir, el biogás y la filtración correspondiente para la eliminación del H<sub>2</sub>S.

### 2.7 Impacto ambiental

La evaluación de impacto ambiental se efectuó siguiendo la metodología matricial causa-efecto descrita por (Conesa, 1997) y denominada “Matriz de Importancia”. En la elaboración de la matriz de importancia se desarrolla una valoración cualitativa a partir de determinar el valor de la importancia del impacto.

Esta metodología exige tener identificadas las acciones que impactarán sobre los factores del medio ambiente.

Los factores ambientales sobre los que incidirán estas acciones vinculadas al proyecto o cualquier tipo de evento serán: atmósfera, agua, suelo, animales, plantas, hombre y economía.

Para la elaboración de la matriz de Importancia se emplearon once símbolos valorados por expertos, el primero corresponde al signo o naturaleza del efecto que provoca la acción, el segundo representa el grado de incidencia o intensidad del mismo y los nueve siguientes, reflejarán un atributo que caracteriza al efecto de la acción (tabla 2.1).

Tabla 2.1: Situación espacial de los símbolos de un elemento tipo.

<b>± (signo)</b>	<b>IN (Intensidad)</b>
<b>EX (extensión)</b>	MO (Momento)
<b>PE (Permanencia)</b>	RV (Reversibilidad)
<b>SI (Sinergia)</b>	AC (Acumulación)
<b>EF (Efecto)</b>	PR (Periodicidad)

## MC (Recuperabilidad)

## I (Importancia)

1- IN: Grado de incidencia de la acción sobre el factor ambiental.

Valor 1: Baja o afectación mínima

Valor 2-11: Media

Valor 12: Elevada

2- EX: Área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno del proyecto.

Valor 1: Muy localizada

Valor 8: Muy amplia o generalizada

Entre 1-8: Moderada

3- MO: Tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto

Valor 4: Corto plazo (<1 año)

Valor 2: Mediano plazo (1-5 años)

Valor 1: Largo plazo (Más de 5 años)

4- PE: Tiempo desde que se manifiesta el efecto hasta que el factor ambiental recupera su forma original.

Valor 1: Efecto fugaz

Valor 2: Temporal (1-10 años)

Valor 4: Permanente (Más de 10 años)

5- RV: Posibilidad de reconstrucción del factor afectado por el proyecto.

Valor 1: Corto plazo (<1 año)

Valor 2: Temporal (1-10 años)

Valor 4: Permanente (Más de 10 años)

6- MC: Posibilidad de reconstrucción total o parcial del factor afectado mediante intervención humana.

Valor 1: Recuperación inmediata

Valor 2: Medio plazo

Valor 4: Parcialmente recuperado

Valor 8: Irrecuperable

7- SI: Reforzamiento de los efectos provocados por una acción bajo determinadas condiciones originadas por el medio.

Valor 1: No sinergia

Valor 2: Sinergia moderada

Valor 4 Sinergia alta

8- AC: Incremento progresivo de la manifestación del efecto, cuando persiste de forma continua la acción que lo genera.

Valor 1: Acumulación simple

Valor 4 Acumulación moderada

9- EF: Relación causa-efecto, forma de manifestación del efecto como tal.

Valor 4: Efecto directo

Valor 1: Efecto indirecto

10- PR: Regularidad con la que se manifiesta el efecto.

Valor 1: Discontinua

Valor 2: Periódicos

Valor 4: Continuo

11- I: Importancia del efecto de una acción sobre un factor ambiental.

$$I = \pm [3 IN + 2 EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC]$$

No todos los impactos tienen la misma importancia o la misma magnitud. Así el impacto puede ser irrelevante, moderado, severo y crítico. Según (Conesa, 1997) cuando la importancia del impacto, calculado según la ecuación anterior, toma valores inferiores a 25, el impacto se considera compatible con el sistema o irrelevante (I), entre 25 y 50 se considera moderado (M), entre 50 y 75, es severo (S) y cuando ya es mayor de 75, el impacto es sumamente crítico (C).

### 2.8 Análisis económico

Para efectuar la simulación se consideró un tiempo de construcción de la planta de 12 meses, con tres meses para realizar la arrancada y puesta en marcha. Se tomó en cuenta un tiempo de vida del proyecto de 15 años, considerando que la planta producirá a un 85 % de capacidad durante los cinco primeros años, para luego producir al 88 % por dos años, al 90 % por cuatro años más, y al 95 % por los restantes cuatro años. El VAN fue determinado para una tasa de interés del 11 %, y se consideró un 32 % de impuestos por concepto de ingresos.

El costo de validación y puesta en marcha se consideró como un 15 % de los Costos Fijos Directos (CFD), mientras que los costos asociados con el Aseguramiento y Control de la Calidad se suponen como un 15 % del Costo Total de la Mano de Obra. Se tomó

en cuenta además que no existe rechazo del producto principal (biogás) con el motivo de no cumplir con los parámetros de calidad exigidos, que se gastan alrededor de USD \$ 20 000 anuales para efectuar operaciones de validación del proceso de producción, y que el costo relacionado con el tratamiento de residuales es de un 25 % del costo total de operación.

Se aplicó un salario nominal promedio de USD \$ 6,00/hora para los operarios que trabajan en la planta, y de USD \$ 10,00/hora para los supervisores y personal de dirección.

El costo de adquisición del equipo a tratar es de USD \$ 288 127, actualizado por el índice de costo, tomado de datos ofrecidos por factura de compra de la tecnología por la Estación Experimental Indio Hatuey. Además, se escoge una capacidad de producción de biogás de 3800 m<sup>3</sup>/día.

### *2.9. Conclusiones parciales*

- ✓ Según la bibliografía consultada el producto final debe estar compuesto por 66-70% de metano, un 25-33 % de CO<sub>2</sub>, 1-5 % de nitrógeno y 0.7-0.18 % de H<sub>2</sub>S.
- ✓ El simulador SuperPro Designer constituye una herramienta valiosa para el ingeniero y el científico en el desarrollo de procesos, la ingeniería de procesos, y manufactura.
- ✓ Para la definición del modelo, se consideran las reacciones estequiométricas que intervienen en la hidrólisis y para el desarrollo de las etapas posteriores de la digestión anaeróbica, se parten de las reacciones cinéticas de la degradación de aminoácidos y las etapas acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas.
- ✓ La evaluación de impacto ambiental se efectuó siguiendo la metodología descrita por (Conesa, 1997) y denominada “Matriz de Importancia”.
- ✓ Para la realización del análisis económico se utiliza el propio simulador SuperPro Designer, otra de sus principales herramientas.

## CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se realiza una validación de los resultados obtenidos a partir de la simulación del proceso de obtención de biogás a partir de la digestión anaerobia. Se realiza una comparación entre los valores obtenidos a través del modelo y los reales de los laboratorios. Además, del análisis económico y ambiental correspondiente.

### 3.1 Validación del modelo empleando el programa SuperPro Designer

Los resultados del modelo fueron validados a partir de ensayos de laboratorios realizados, mostrando la diferencia entre el reporte de los datos y los calculados.

En la tabla 3.1 se muestran los resultados del modelo y la diferencia calculada con respecto al valor analítico, según (Fujita et al., 1980). La diferencia comprendida corresponde a 0,29% para las condiciones de operación mostradas, evidenciándose una alta precisión de los resultados propuestos. Además de predecir la producción de biogás, el simulador permite analizar la composición del mismo con la finalidad de evaluar el rendimiento de la fermentación en general.

Con el empleo del programa se puede estimar la producción de biogás y su composición resultante para una variedad de sustratos.

Tabla 3.1. Resultados del programa para las condiciones de operación.

<b>Carga orgánica</b>	<b>Experimental Resultado</b>	<b>Simulación Resultado</b>	<b>Error (%)</b>
230,4 g/d	269 L/kg	269,5 L/kg	0,29

Fuente: Elaboración propia

### 3.2 Componentes del flujo másico de entrada y salida del biodigestor.

En la tabla 3.2 se muestra los valores medios de los componentes del flujo másico real de entrada al biodigestor a partir de la cantidad de animales existentes en el centro porcino. Estos valores son bajos, comparados con los valores de entrada de biomasa para los cuales fue diseñada la tecnología.

Tabla 3.2. Componentes del flujo másico de entrada del biodigestor

<b>Materiales</b>	<b>kg/h</b>	<b>kg/año</b>
Biomasa	1600	14 016 000
Agua	3333.3	29 199 708
<b>TOTAL</b>	<b>4933.3</b>	<b>43 215 708</b>

Fuente: Elaboración propia

En el diseño de esta tecnología se tuvo en cuenta un mayor número de animales y, por lo tanto, una entrada de biomasa dos veces mayor al volumen de entrada con la que hoy opera la planta (Moncayo, 2013). No obstante, se plantea por el fabricante que cuando se logra mantener igual cantidad de biomasa en la alimentación del biodigestor, aproximadamente 1,6 t de biomasa/h y 38,4 t/día, esto posibilita que el biodigestor funcione de forma estable.

Los resultados obtenidos por el modelo (tabla 3.3), corroboran que el biodigestor presenta una baja alimentación. En este modelo se obtuvo para el flujo másico de entrada de la biomasa un valor de 2203,72 kg/h. Según los valores del simulador se puede deducir que para que el biodigestor manifieste un mayor rendimiento es necesario incrementar la entrada de la biomasa residual aproximadamente en unos 603,72 kg/h para lograr así valores superiores de producciones de biogás. En el caso de los valores de flujo másico del agua son inferiores, pero pudieran mantenerse, pues la producción de biogás solo se incrementa con el incremento del flujo másico de biomasa, que hace que aumente el contenido de sólidos volátiles. El agua constituye dentro de este proceso un soporte que facilita la degradación en las diferentes etapas de la descomposición de la biomasa

Tabla 3.3. Componentes del flujo másico de entrada del simulador.

<b>Materiales</b>	<b>kg/h</b>	<b>kg/año</b>
<b>Biomasa</b>	2203,72	17 453 437,55
<b>Agua</b>	6611,15	52 360 312,64
<b>TOTAL</b>	<b>8814,87</b>	<b>69 813 750,18</b>

Fuente: Elaboración propia

En el análisis de los componentes del flujo másico de entrada y salida del simulador (tabla 3.4), se pudo evaluar el comportamiento de entrada y salida de cada uno de los componentes del proceso tanto de los líquidos como de los gases.

Tabla 3.4. Componentes del flujo másico de entrada y salida del simulador y sus diferencias.

Componentes	Entrada (kg/h)	Salida (kg/h)	Diferencia
Biomasa	2203,72	903,20	-1300,52
Dióxido de Carbono	0.00	697,15	697,15
Sulfuro de Hidrógeno	0.00	322,13	322,13
Metano	0.00	847,11	847,11
Nitrógeno	0.00	375,70	375,70
Oxígeno	0.00	9,63	9,63
Agua	6611,15	5659,97	-951,18
<b>TOTAL</b>	<b>8814,87</b>	<b>8814,83</b>	<b>-0,04</b>

Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos indican que mantienen un comportamiento similar a los valores obtenidos en los análisis efectuados a escala de laboratorio, se corresponden con lo que reporta la literatura.

El flujo de entrada debe mantenerse constante, sin embargo, ocurre una disipación y transformación de energía que no se tiene en cuenta en el caso del simulador que trabaja bajo condiciones ideales. Por tal motivo, se aprecian diferencias negativas entre lo que entra y sale del biodigestor simulado para algunos parámetros. Varios autores (Moncayo, 2013); (González et al., 2015) plantean que esta diferencia existente es debido a que existen pequeñas trazas de componentes de la biomasa y agua que se transforman en energía y se debe disipar por los límites de contornos del digestor simulado y el modelo no lo considera, aspecto este que se debe incorporar al simulador para que se tenga en cuenta y lograr que no exista diferencia en los valores de flujo másico.

### 3.3 Componentes del biogás en la simulación.

La composición del biogás en la simulación es importante sobre todo cuando este es usado con fines energéticos, y representa una herramienta para la concepción y diseño de plantas industriales, se pueden determinar cuáles son los parámetros que están deprimiendo la producción de biogás, así como provocando las variaciones en su composición de Biogás.

En la tabla 3.5 se muestra la composición del biogás producido en el biodigestor para las condiciones experimentales y las calculadas por el simulador. Esta información tiene gran relevancia con la posibilidad de implementar acciones que contribuyan a una mayor producción de CH<sub>4</sub>. Además, la concentración de los compuestos secundarios define criterios de diseño para disminuir el deterioro en las instalaciones de los procesos posteriores de una planta.

Tabla 3.5. Componentes del biogás en la simulación y el biodigestor Martí II.

Componentes	Simulador	Biodigestor Martí II
	%	% vol
Dióxido de Carbono	26,73	23,28
Sulfuro de Hidrógeno	0,07	0,054
Metano	71,46	69,42
Nitrógeno	1,73	5,46
Oxígeno	0,00	1,79
<b>TOTAL</b>	<b>100,00</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la predicción de producción de biogás para el flujo de alimentación de 2203,72 kg/h en las condiciones de la simulación fue de 782,36 m<sup>3</sup> de biogás por hora, incrementando la producción de biogás cuando se incrementa el flujo de alimentación. Según (Cepero et al., 2019); (Magaña et al., 2006); (Siefers et al., 2010) la composición química del biogás por componentes debe estar en el rango siguiente: CH<sub>4</sub> entre 40 - 70% en volumen, CO<sub>2</sub> entre 30 - 60% en volumen y menos del 7% los otros compuestos

gaseosos. Los valores obtenidos en el simulador fueron de 71,46; 26,73; 1,73; y 0,07 % de CH<sub>4</sub>; CO<sub>2</sub>; N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, respectivamente. Estos se encuentran dentro de los rangos teóricos existentes, se corresponden con lo reportado por (Pico Poma, 2018) y (Suárez et al., 2019) y con los valores obtenidos en la evaluación por cromatografía gaseosa a escala de laboratorio del biodigestor.

En términos de calidad cuanto menor sea el porcentaje de CO<sub>2</sub> en la mezcla, mejor combustión y mayor poder calorífico se logrará, ya que el CO<sub>2</sub> no aporta poder calorífico, sino que actúa de moderador bajando la temperatura y el rendimiento de la combustión (Magaña et al., 2006) otro elemento que es necesario tener en cuenta es el H<sub>2</sub>S.

Por otra parte, la producción de biogás está estrechamente relacionada con el TRH y el pH. Estos parámetros inciden directamente en el crecimiento de los microorganismos involucrados en la digestión o degradación de la biomasa y la producción de biogás. En el simulador se utilizó un TRH de 30 días y en el biodigestor es necesario mantener este parámetro entre 20 y 30 días, para que los microorganismos se mantengan en su mayor tasa de crecimiento. Por otro lado, también la temperatura influye en el proceso, a medida que esta aumenta y se acerca a temperaturas termofílicas (57<sup>0</sup>C) el TRH disminuye.

### *3.4 Análisis del impacto ambiental*

La evaluación de impacto ambiental es un procedimiento técnico-administrativo que sirve para identificar, prevenir e interpretar los impactos ambientales que producirá un proyecto en su entorno en caso de ser ejecutado, todo ello con el fin de que la administración competente pueda aceptarlo, rechazarlo o modificarlo. Se identifican los posibles impactos (efectos) que sobre los factores del medio puede provocar la acción identificada: inadecuado manejo del biogás, principal producto de la biodigestión. Entre los principales efectos se encuentran: explosión, escape de gas e incendio.

En la tabla 3.6 se muestra la matriz de incidencia la cual refleja los efectos impactantes que afectan a los diferentes factores ambientales.

Tabla 3.6. Matriz de incidencia.

<b>Acción: inadecuado manejo del biogás</b>				
<b>Factores Medioambientales</b>	<b>Efectos Impactantes</b>			
	Explosión	Escape de gas	Incendios	Total
<b>Atmósfera</b>	X	X	X	3
<b>Agua</b>	-	-	-	0
<b>Suelo</b>	X	-	X	2
<b>Animales</b>	X	X	X	3
<b>Plantas</b>	X	X	X	3
<b>Hombre</b>	X	X	X	3
<b>Economía</b>	X	X	X	3
<b>Total</b>	6	5	6	

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la matriz de importancia del impacto ambiental para explosión (tabla 3.7), se puede observar que el factor ambiental afectado de manera moderada como resultado de las explosiones es: el agua, la flora y la fauna, de manera severa: lo social y el aire y de manera crítica: el suelo y la economía.

Además, se aprecia que los símbolos más influyentes en el impacto son la Intensidad y la Extensión respectivamente.

Tabla 3.7: Matriz de importancia del impacto ambiental para explosión

<b>Factores Medioambientales</b>	<b>Explosiones</b>											
	N	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	Total
<b>Económico</b>	-	12	8	4	2	4	2	4	4	2	2	-76
<b>Hombre</b>	-	12	8	4	2	2	2	4	1	2	2	-71
<b>Atmósfera</b>	-	12	6	4	1	1	2	4	4	2	1	-67
<b>Agua</b>	-	10	0	4	1	1	2	4	1	2	1	-46
<b>Suelo</b>	-	12	8	4	2	4	2	4	4	2	8	-82
<b>Plantas</b>	-	8	7	4	4	2	2	4	4	2	4	-41

<b>Animales</b>	-	8	5	4	4	2	2	4	4	2	4	-39
<b>Total</b>	-	82	46	28	16	20	14	28	22	14	22	

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 3.8 se muestra la matriz de importancia del impacto ambiental respecto al escape de gas, donde se obtuvo que los factores ambientales afectados de manera severa son: el aire, lo social y la fauna, de manera moderada: el suelo y la flora, siendo el impacto en la economía severo. Además, se aprecia que los símbolos más marcados son la Intensidad y la Extensión respectivamente.

Tabla 3.8: Matriz de importancia del impacto ambiental para escape de gas.

<b>Factores Medioambientales</b>	<b>Escape de gas</b>											
	N	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	I
<b>Económico</b>	-	1	1	4	1	1	2	1	1	4	1	-20
<b>Hombre</b>	-	12	8	4	2	2	2	1	4	4	2	-73
<b>Atmósfera</b>	-	12	8	4	1	1	2	4	4	4	2	-74
<b>Agua</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Suelo</b>	-	1	4	2	2	4	2	1	4	4	2	-32
<b>Plantas</b>	-	5	7	4	2	4	2	1	1	4	2	-49
<b>Animales</b>	-	5	7	4	2	4	2	1	4	4	2	-52
<b>Total</b>	-	36	35	22	10	16	12	9	18	24	11	

**Fuente:** Elaboración propia

Por otra parte, en la matriz de importancia con respecto al incendio (tabla 3.9), se puede observar que el factor ambiental afectado con más severidad es lo social, el aire, el suelo y la fauna, siendo afectada de manera crítica: la economía y la flora. Además, se aprecia que la Intensidad del efecto es la más marcada, seguido de la Extensión.

Tabla 3.9: Matriz de importancia del impacto ambiental para incendio.

<b>Factores Medioambientales</b>	<b>Incendio</b>											
	N	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	I
<b>Económico</b>	-	12	8	4	2	4	2	4	4	4	2	-78
<b>Hombre</b>	-	10	7	4	2	2	2	1	1	4	2	-62

<b>Atmósfera</b>	-	11	8	4	2	1	2	1	4	4	2	-69
<b>Agua</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Suelo</b>	-	11	5	4	2	4	2	4	4	4	2	-69
<b>Plantas</b>	-	12	7	4	2	4	2	4	4	4	2	-76
<b>Animales</b>	-	11	7	4	2	4	2	4	4	4	2	-73
<b>Total</b>	-	67	42	24	12	19	12	18	21	24	12	

**Fuente:** Elaboración propia

En la evaluación realizada para la matriz de importancia, como herramienta que identifica los impactos de las posibles consecuencias del inadecuado manejo del producto del proceso o proyecto sobre el ambiente y que además identifica las posibles consecuencias para su atención y manejo. Se observa que los efectos que más influyen en los diferentes factores ambientales son los incendios y las explosiones (tabla 3.10). Estos efectos provocan daños severos y críticos a casi todos los factores medio ambientales con mayor incidencia e intensidad en la flora y lo social, seguido del aire, el suelo y la economía como se muestra en la tabla 14.

Tabla 3.10: Matriz general de impacto ambiental

<b>Factores Medioambientales</b>	<b>Acción: Inadecuado manejo del biogás</b>			
	<b>Incendios</b>	<b>Escape de gas</b>	<b>Explosiones</b>	<b>Total</b>
<b>Económico</b>	-78	-20	-76	-174
<b>Hombre</b>	-62	-73	-71	-206
<b>Atmósfera</b>	-69	-74	-67	-210
<b>Agua</b>	0	0	-46	-46
<b>Suelo</b>	-69	-32	-82	-183
<b>Plantas</b>	-76	-49	-41	-166
<b>Animales</b>	-73	-52	-39	-164
<b>Total</b>	-427	-300	-422	

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5 Análisis económico

La simulación del proceso en el simulador SuperPro Designer permitió obtener valores y resultados de un gran número de parámetros e indicadores económicos de importancia para este proceso de producción, entre los cuales se puede mencionar VAN, TIR, PRI, costos fijos, capital de trabajo, costo unitario de producción, margen bruto y neto, % de retorno de la inversión, entre otros (Aguiar et al., 2018).

La tabla 3.11 muestra los principales indicadores técnico-económicos obtenidos para la propuesta tecnológica evaluada en el simulador SuperPro Designer.

Tabla 3.11: Indicadores técnico-económicos obtenidos.

<b>Indicadores</b>	<b>Valor</b>
<b>Inversión total de capital (\$)</b>	570 000
<b>Costo de operación (\$/año)</b>	187 000
<b>Ganancias totales anuales (\$/año)</b>	351 000
<b>Capital de trabajo (\$)</b>	5000
<b>Cantidad de biogás producido (m<sup>3</sup>/día)</b>	3800
<b>Margen bruto (%)</b>	18,51
<b>Retorno de la Inversión (%)</b>	26,15
<b>Período de Retorno de la Inversión (PRI) (años)</b>	3,82
<b>Tasa Interna de Retorno (TIR) (%)</b>	28,83
<b>Valor Actual Neto (VAN) (\$)</b>	480 000

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.12 se muestran los resultados obtenidos en las principales partidas que se encuentran incluidas dentro de los costos de operación, así como los porcentos de ocupación.

Tabla 3.12: Resultados económicos de las principales partidas.

<b>Partida</b>	<b>Valor (\$/año)</b>	<b>%</b>
<b>Mano de obra</b>	30 000	37,5
<b>Control / aseguramiento de la calidad</b>	10 000	12,5
<b>Servicios auxiliares</b>	8000	10

<b>Gastos misceláneos</b>	32 000	40
<b>Total</b>	80 000	100

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados mostrados en las tablas anteriores, para una planta con una inversión inicial de USD \$ 570 000, el proceso se puede calificar de económicamente rentable y confiable desde el punto de vista inversionista, ya que el PRI no es superior a cinco años (3.82 años), la TIR es de 25.83 % y el VAN tiene resultado positivo USD \$ 480000, lo cual es un indicativo de rentabilidad de la inversión y ganancias positivas. Sin embargo estos indicadores económicos requieren actualizarse y ajustar a la realidad cubana, sobre todo los relacionados con los costos actuales de las entradas y salidas. Actualmente se trabaja en la política de energía renovable del país donde uno de los objetivos o indicadores a revisar son los precios que pueden tener no solo las materias primas, sino también los productos valorizados del proceso de biodigestión anaeróbica como el biogás, los bioabonos y el biometano como un gas de mejor calidad y poder energético.

### 3.6. Conclusiones parciales

- ✓ Los resultados del modelo fueron validados a partir de ensayos de laboratorios realizados, mostrando la diferencia entre el reporte de los datos y los calculados. La diferencia comprendida corresponde a 0,29% para las condiciones de operación mostradas, evidenciándose una alta precisión de los resultados propuestos
- ✓ Con el empleo del programa se puede estimar la producción de biogás y su composición resultante para una variedad de sustratos.
- ✓ En este modelo se obtuvo para el flujo másico de entrada de la biomasa un valor de 2203,72 kg/h. Según los valores del simulador se puede deducir que para que el biodigestor manifieste un mayor rendimiento es necesario incrementar la entrada de la biomasa residual aproximadamente en unos 603,72 kg/h para lograr así valores superiores de producciones de biogás.

- ✓ Se pudo observar que el factor ambiental afectado de manera moderada como resultado de las explosiones es: el agua, la flora y la fauna, de manera severa: lo social y el aire y de manera crítica: el suelo y la economía.
- ✓ Según los resultados mostrados en las tablas anteriores, para una planta con una inversión inicial de USD \$ 570 000, el proceso se puede calificar de económicamente rentable y confiable desde el punto de vista inversionista

## CONCLUSIONES

- El simulador SuperPro Designer® v.10 es una herramienta que sirve para predecir la producción de biogás y su composición en biodigestores lagunas cubiertas que tratan excretas porcinas.
- La producción de biogás a partir de las excretas porcinas obtenida en el simulador fue de 2251,72 kg/h con una composición del biogás de 71,46 % de metano (CH<sub>4</sub>), 26,73 % de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 1,73 % de nitrógeno (N<sub>2</sub>), y 0,07 % de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), resultados que se corresponde con los valores analíticos de laboratorio.
- Según el modelo de simulación de procesos las acciones impactantes que más influyen en los factores ambientales son los incendios y las explosiones, provocando daños a la mayoría con mayor incidencia e intensidad en la flora y lo social, seguido del aire, el suelo y la economía.
- El análisis económico reporta una inversión económicamente rentable y confiable con una inversión inicial de \$ 570 000 USD, y un periodo de recuperación de la inversión de 3,82 años.

## RECOMENDACIONES

Continuar el estudio del simulador SuperPro Designer® v.10 aplicándolo a otras tecnologías de digestión anaerobia existentes en Cuba.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, A. C., Osorio-Tobón, J. F., Silva, L. P., Barbero, G. F., & Martínez, J. (2018). Economic analysis of oleoresin production from malagueta peppers (*Capsicum frutescens*) by supercritical fluid extraction. *The Journal of Supercritical Fluids*(133), 86-93.
- Arrieta, P. W. (2016). *Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado*. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Piura, Perú.
- Auli, N. A., Sakinah, M., Bakri, A. M., Kamarudin, H., & Norazian, M. N. (2013). Simulation Of Xylitol Production: A Review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(7), 366-372.
- Balaska, F., Chikhi, M., Meniai, A. H., Chadi, N., Touiou, A., & Bouzerara, F. (2017). Experimental study and modeling using Super Pro Designer of the elimination of a dispersed azo dye by coagulation-microfiltration. *Desalination and Water Treatment*(82), 92-100.
- Barrera, C. J. (2020). *Diseño y simulación de un biodigestor automatizado para implementación en fincas pecuarias pequeñas*. Tesis de Maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C.
- Bergman, E. (2016). *Evaluation of the software SuperPro Designer through simulation of a biohydrogen production process*. Master Thesis, Lund University, Sweden.
- Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., & Iyyappan, J. (2018). Biogas production- A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 570-582.  
<https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093>
- Blanco, B. D., Cepero Casas, L., Suárez Hernández, J., & Martín Martín, G. (2012). *Manual de diseño, montaje y operación de digestores plásticos de bajo costo. Una alternativa para Cuba*. Estación Experimental de Pastos y Forrajes, Matanzas.
- Cepero, C. L., Suárez, H. J., Martín, M. G., & Aguilar, H. A. (2019). El fomento de la producción y utilización del biogás en Cuba: el papel de la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey. *Revista RedBioLAC*.
- Conesa, F. V. (1997). *Instrumento de la Gestión Ambiental en la Empresa*. 541.
- Cubillos, S. D., & Huertas, H. D. (2018). *EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DE UN BIODIGESTOR TUBULAR ANAEROBIO A ESCALA PILOTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PORCINAS EN LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA AGRÍCOLA GUACAVIA, CUMARAL-META*. Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Ambiental, Villavicencio.
- Díaz de Basurto, B. A. (2013). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya*.  
<https://es.scribd.com/document/279440868/Construccion-de-Biodigestor-de-R-S-U>

- Díaz, H., Caballero, J., & Díaz, J. (2015). *Simulación de una planta de tratamiento de aguas residuales y su análisis Técnico-económico-ambiental en la ciudad de Iquitos mediante el uso de Super pro Designer V6*. Bachelor's thesis, Universidad Nacional de La Amazonía Peruana, Perú.
- Fujita, M., Scharer, J., & Moo-Young, M. (1980). Effect of corn stover addition on the anaerobic digestion of swine manure. *Agric. Wastes*, 2(3), 177-184.
- García, R. A. (2014). *Diseño de un biodigestor anaerobio experimental*. Proyecto de investigación, Universidad Autónoma Metropolitana, Ingeniería Ambiental.
- García, V. P. (2014). *MANUAL DE BIOGÁS. Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos*. Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático.
- Gil, I. D., Guevara, J. R., García, J. L., Leguizamón, A., & Rodríguez, G. (2016). *Process Analysis and Simulation in Chemical Engineering*. New York, USA: Springer.
- González, M., Pérez, S., Wong, A., & Bello, R. &. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229-235.
- Jacinto, M. E. (2017). *Evaluación del potencial energético del biogás generado por el sector porcino en Placetas*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Santa Clara: Centro de Estudio Energético y Tecnología Ambiental.
- Kapoor, R. G. (2020). Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123052>.
- Lam, K. F., Leung, C. C., Lei, H. M., & Lin, C. S. (2014). Economic feasibility of a pilot-scale fermentative succinic acid production from bakery wastes. *Food and Bioproducts Processing*(92), 282-290.
- Laramee, J., & Davis, J. (2013). Economic and environmental impacts of domestic biodigesters: Evidence from Arusha, Tanzania. *Energy for Sustainable Development*, 17(3), 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.02.001>.
- Magaña, L., Torres, E. M., M., S. C., & Hernández, R. (2006). Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabras. *Acta Universitaria*, 16(2), 27-37.
- Mani, S., Sundaram, J., & Das, K. C. (2016). Process simulation and modeling: Anaerobic digestion of complex organic matter. *Biomass and Bioenergy*(93), 158-167.
- Mel, M., Hisham, A., & Avicennaa, I. S. (2015). Simulation Study for Economic Analysis of Biogas Production from Agricultural Biomass. *Energy Procedia*, 65, 204-214. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.026>
- Moncayo, R. G. (2013). *Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás*. Aqualimpia Engineering e.K.
- Pérez, A., Benítez C., I., & Miño V., J. E. (2020). *Simulación de Procesos Químicos y Aplicaciones del Simulador SuperPro Designer* (1a ed.). Misiones, Argentina.
- Pérez, P. T., Pereda, R. I., Oliva, M. D., & Zaiat, M. (2016). Anaerobic digestion technologies for the treatment of pig wastes. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 50(3).

- Pérez, S. A., Benítez, C. I., & Miño, V. J. (2020). *Simulación de procesos químicos y aplicaciones del simulador SuperPro Designer*. Argentina: Gráfica Libertad.
- Pico Poma, L. (2018). *Simulación del proceso de digestión anaerobia para predecir la producción de biogás a partir de residuos de la industria panelera en la provincia de Pastaza*. Tesis de grado, Puyo. Pastaza. Ecuador.
- Portillo, G. (2013). *Todo lo que debes saber sobre el biogás*. Renovables Verdes: <http://www.renovablesverdes.com/biogas/>
- Qureshi, N., Saha, B. C., Cotta, M. A., & Singh, V. (2013). An economic evaluation of biological conversion of wheat straw to butanol: A biofuel. *Energy Conversion and Management*(65), 456-462.
- Roubík, H., & Mazancová, J. (2020). Suitability of small-scale biogas systems based on livestock manure for the rural areas of Sumatra. *Environmental Development*. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100505>.
- Siefers, A., Wang, N., Sindt, A., Dunn, J., McElvogue, J., & Evans, E. &. (2010). A novel and cost-effective hydrogen sulfide removal technology using tire derived rubber particles. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 12, 4597-4622.
- Sosa, D. C. (2015). Parámetros de control y monitoreo del proceso en digestores anaerobios de pequeña escala diferentes tecnologías. Santa Clara.
- Sotaquira, M. M. (2021). *Diseño de un Biodigestor para el Aprovechamiento de la Materia Orgánica Generada en la Plaza de Mercado del Municipio de Sogamoso - Boyacá*. Tesis de Grado, Universidad Nacional Abierta y A Distancia - UNAD, Ingeniería Ambiental, Sogamoso.
- Suárez, C. V., I., D., & M., Á.-G. (2019). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Revista Centro Azúcar*, 46, 2223-4861. <http://centroazucar.uclv.edu.cu>
- Suárez, H. J., Sosa Cáceres, R., Martínez Labrada, Y., Curbelo Alonso, A., Figueredo Rodríguez, T., & Cepero Casas, L. (abril-junio de 2018). Evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 41(2), 85-92. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269158214001>
- Suárez, J., Matín, G., Cepero, L., Blanco, D., Savran, V., Sotolongo, J., López, A., González, O., Peña, A., Hernández, M., & Hernández, M. (2017). Producción Integrada de Alimentos y Bioenergía: La Experiencia Cubana. *Agroecología*, 12(1), 47-55.
- Tauseef, S. M., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2013). *Methane capture from livestock manure*. *Journal of Environmental Management*.
- Toala, M. E. (2013). *Diseño de un biodigestor de polietileno para la obtención de biogás a partir del estiércol de ganado en el rancho Verónica*. Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Ríobamba-Ecuador.
- Varnero, M. M. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32.
- Wassie, Y., & Adaramola, M. (2020). *Analyzing household biogas utilization and impact in rural Ethiopia: Lessons and policy implications for sub-Saharan Africa*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00474>.



**ANEXOS**

Anexo 1:



Figura A. Granja Integral Porcina Martí II.

Anexo 2:



Figura B. Antes y después de la instatación del biodigestor

## Anexo 3.

Tabla A: Reacciones estequiométricas de la hidrólisis.

No	Componente	Reacción de hidrólisis	% Conv.
1	Almidón	$(C_6H_{12}O_6)_n + H_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$	0,6±0,2
2	Celulosa	$(C_6H_{12}O_6)_n + H_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$	0,4±0,1
3	Hemicelulosa	$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow 2,5 C_2H_4O_2$	0,4±0,0
4	Hemicelulosa	$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_5$	0,6±0,0
5	Xilosa	$C_5H_{10}O_5 \rightarrow C_5H_4O_2 + 3H_2O$	0,6±0,0
6	Celulosa	$C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow 2C_2H_6O + 2CO_2$	0,4±0,1
7	Etanol	$2C_2H_6O + CO_2 \rightarrow 2C_2H_4O_2 + CH_4$	0,6±0,1
8	Proteína Soluble	$C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6H_2O \rightarrow 6,5CO_2 + 6,5CH_4 + 3NH_3 + H_2S$	0,5±0,2
9	Proteína Insoluble (P.I)	$P.I + 0,3337H_2O \rightarrow 0,045C_6H_{14}N_4O_2 + 0,048C_4H_7NO_4 + 0,047C_4H_9NO_3 + 0,172C_3H_7NO_3 + 0,074C_5H_9NO_4 + 0,111C_5H_9NO_2 + 0,25C_2H_5NO_2 + 0,047C_3H_7NO_2 + 0,067C_3H_6NO_2S + 0,074C_5H_{11}NO_2 + 0,07C_6H_{13}NO_2 + 0,046C_6H_{13}NO_2 + 0,036C_9H_{11}NO_2$	0,6±0,1
10	Trioleina	$C_{57}H_{104}O_6 + 3H_2O \rightarrow C_3H_8O_3 + 3C_{18}H_{34}O_2$	0,5±0,2
11	Tripalmato	$C_{51}H_{98}O_6 + 8,436H_2O \rightarrow 4C_3H_8O_3 + 2,43C_{16}H_{34}O$	0,5±0,3
12	Palmito-Oleina	$C_{37}H_{70}O_5 + 4,1H_2O \rightarrow 2,1C_3H_8O_3 + 0,9C_{16}H_{34}O + 0,9C_{18}H_{34}O_2$	0,6±0,2
13	Palmito-Linoleina	$C_{37}H_{68}O_5 + 4,1H_2O \rightarrow 2,2C_3H_8O_3 + 0,9C_{16}H_{34}O + 0,9C_{18}H_{34}O_2$	0,6±0,2

## Anexo 4

Tabla B: Reacciones cinéticas de la degradación de aminoácidos.

No.	Componente	Reacciones químicas
<i>Reacciones de degradación de Aminoácidos</i>		
1	Glicina	$C_2H_5NO_2 + H_2 \rightarrow C_2H_4O_2 + NH_3$
2	Teronina	$C_4H_9NO_3 + H_2 \rightarrow C_2H_4O_2 + 0,5C_4H_8O_2 + NH_3$
3	Histidina	$C_6H_8N_3O_2 + 4H_2O + 0,5H_2 \rightarrow CH_3NO + C_2H_4O_2 + 0,5C_4H_8O_2 + 2NH_3$ + $CO_2$
4	Arginina	$C_6H_{14}N_4O + 3H_2O + H_2 \rightarrow 0,5C_2H_4O_2 + 0,5C_3H_6O_2 + 0,5C_5H_{10}O_2 + 4NH_3 + CO_2$
5	Prolina	$C_5H_9NO_2 + H_2O + H_2 \rightarrow 0,5C_2H_4O_2 + 0,5C_3H_6O_2 + 0,5C_5H_{10}O_2 + NH_3$
6	Metionina	$C_5H_{11}NO_2S + 2H_2O \rightarrow C_3H_6O_2 + CO_2 + NH_3 + H_2 + CH_4S$
7	Serina	$C_3H_7NO_3 + H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + H_2$
8	Treonina	$C_4H_9NO_3 + H_2O \rightarrow C_3H_6O_2 + NH_3 + H_2 + CO_2$
9	Ácido-Aspártico	$C_4H_7NO_4 + 2H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 + NH_3 + 2CO_2 + 2H_2$
10	Ácido - Glutámico	$C_5H_9NO_4 + H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 + 0,5C_4H_8O_2 + NH_3 + CO_2$
11	Ácido - Glutámico	$C_5H_9NO_4 + 2H_2O \rightarrow 2C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + H_2$
12	Histidina	$C_6H_8N_3O_2 + 5H_2O \rightarrow CH_3NO + 2C_2H_4O_2 + 2NH_3 + CO_2 + 0,5H_2$
13	Arginina	$C_6H_{14}N_4O_2 + 6H_2O \rightarrow 2C_2H_4O_2 + 4NH_3 + 2CO_2 + 3H_2$
14	Lisina	$C_6H_{14}N_2O_2 + 2H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 + C_4H_8O_2 + 2NH_3$
15	Leucina	$C_6H_{13}NO_2 + 2H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_2 + NH_3 + CO_2 + 2H_2$
16	Isoleucina	$C_6H_{13}NO_2 + 2H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_2 + NH_3 + CO_2 + 2H_2$
17	Valina	$C_5H_{11}NO_2 + 2H_2O \rightarrow C_4H_8O_2 + NH_3 + CO_2 + 2H_2$
18	Fenilalanina	$C_9H_{11}NO_2 + 2H_2O \rightarrow C_6H_6 + C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + H_2$
19	Tirosina	$C_9H_{11}NO_3 + 2H_2O \rightarrow C_6H_6O + C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + H_2$
20	Triptofan	$C_{11}H_{12}N_2O_2 + 2H_2O \rightarrow C_8H_7N + C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + H_2$
21	Glicina	$C_2H_5NO_2 + 0,5H_2O \rightarrow 0,75C_2H_4O_2 + NH_3 + 0,5CO_2$
22	Alanina	$C_3H_7NO_2 + 2H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + 2H_2$
23	Cisteína	$C_3H_6NO_2S + 2H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 + NH_3 + CO_2 + 0,5H_2 + H_2S$

Tabla C: Reacciones cinéticas de las etapas acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas

<b>Reacciones acidogénicas</b>		
24	Dextrosa	$C_6H_{12}O_6 + 0,1115NH_3 \rightarrow 0,1115C_5H_7NO_2 + 0,744C_2H_4O_2 + 0,5C_3H_6O_2 + 0,4409C_4H_8O_2 + 0,6909CO_2 + 1,0254H_2O$
25	Glicerol	$C_3H_8O_3 + 0,4071NH_3 + 0,0291CO_2 + 0,0005H_2 \rightarrow 0,04071C_5H_7NO_2 + 0,94185C_3H_6O_2 + 1,09308H_2O$
<b>Reacciones acetogénicas</b>		
26	Ácido - Oleico	$C_{18}H_{34}O_2 + 15,2396H_2O + 0,2501CO_2 + 0,1701NH_3 \rightarrow 0,1701C_5H_7NO_2 + 8,6998C_2H_4O_2 + 14,4978H_2$
27	Ácido - Propiónico	$C_3H_6O_2 + 0,06198NH_3 + 0,314336H_2O \rightarrow 0,06198C_5H_7NO_2 + 0,9345C_2H_4O_2 + 0,660412CH_4 + 0,160688CO_2 + 0,0005H_2$
28	Ácido - Isobutírico	$C_4H_8O_2 + 0,0653NH_3 + 0,8038H_2O + 0,0006H_2 + 0,5543CO_2 \rightarrow 0,0653C_5H_7NO_2 + 1,8909C_2H_4O_2 + 0,446CH_4$
29	Ácido - Isovalérico	$C_5H_{10}O_2 + 0,0653NH_3 + 0,5543CO_2 + 0,8044H_2O \rightarrow 0,0653C_5H_7NO_2 + 0,8912C_2H_4O_2 + C_3H_6O_2 + 0,4454CH_4 + 0,0006H_2$
30	Ácido - Linoleico	$C_{18}H_{32}O_2 + 15,356H_2O + 0,482CO_2 + 0,1701NH_3 \rightarrow 0,1701C_5H_7NO_2 + 8,4402C_2H_4O_2 + 14,9748H_2$
31	Ácido - Palmítico	$C_{16}H_{34}O + 15,253H_2O + 0,482CO_2 + 0,1701NH_3 \rightarrow 0,1701C_5H_7NO_2 + 8,4402C_2H_4O_2 + 14,9748H_2$
<b>Reacciones metanogénicas</b>		
32	Ácido - Acético	$C_2H_4O_2 + 0,022NH_3 \rightarrow 0,022C_5H_7NO_2 + 0,945CH_4 + 0,066H_2O + 0,945CO_2$
33	Hidrógeno	$14,4976H_2 + 3,8334CO_2 + 0,0836NH_3 \rightarrow 0,0836C_5H_7NO_2 + 3,4154CH_4 + 7,4996H_2O$

## Anexo 5.



Figura C. Sistema de mezcla y Alimentación

## Anexo 6.



Figura D. Sistema de agitación

## Anexo 7.



Figura E. Lecho de secado

## Anexo 8.



Figura F. Válvulas de seguridad

## Anexo 9.



Figura G. Antorcha industrial