



**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Arranque en la operación de la planta semi-industrial de digestión  
anaeróbica en Latinoamericana de Jugos S.A**

**Ana Belén Cueva Solá**

**Dr-Ing. Daniela Almeida, Directora de Tesis**

Tesis de grado presentada como requisito  
para la obtención del título de Ingeniera Química

Quito diciembre de 2014

**Universidad San Francisco de Quito**  
**Colegio de Ciencias e Ingeniería El Politécnico**

**HOJA DE APROBACION DE TESIS**

**Arranque en la operación de la planta semi-industrial de digestión  
anaeróbica en Latinoamericana de Jugos S.A**

**Ana Belén Cueva Solá**

Daniela Almeida, Dr.-Ing.

Directora de Tesis

-----

César Zambrano, Ph.D.

Miembro del Comité

-----

Gustavo Muñoz, Ph.D.

Miembro del Comité

-----

Ximena Córdova, Ph.D.

Decana de la Escuela de Ingeniería

-----

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, diciembre de 2014

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

-----

Nombre: Ana Belén Cueva Solá

C. I.: 1720847100

Quito, diciembre de 2014

### **Dedicatoria**

A mi familia: Juan, Sandra, María José y Juan Francisco han sido y serán siempre mi motor de vida. Gracias por tanto.

### **Agradecimientos**

A Dios, por haberme dado fuerzas y bendiciones durante toda mi carrera universitaria. Por no permitir que bajara la guardia y culmine este proceso.

A mi familia, todos los miembros de ella, porque con palabras de aliento y a veces jalones de oreja me han ayudado para que esto sea posible.

Al departamento de Ingeniería Química, por haber sentado las bases de mi aprendizaje y permitirme la culminación de este proceso.

A Carlos Fabara y al departamento de Química por todos los conocimientos impartidos durante mi carrera universitaria.

A todos mis profesores que de una u otra manera me han impartido conocimientos y amistad.

A Daniela Almeida por todo el apoyo brindado durante este proyecto. También por ser una excelente profesora y exigir lo mejor de mí, aunque algunas veces no lo entendiera. Gracias por todo.

A mis miembros de comité, Gustavo y César, por sus observaciones en pro de la continua mejora de este proyecto.

A la planta procesadora de alimentos Latinoamericana de Jugos S.A., a Javier Serrano y todas las personas que trabajan ahí por haberme ayudado durante todo el proceso de experimentación. Más que compañeros durante este proceso se convirtieron en mis amigos.

A mis amigos por haberme sacado una sonrisa incluso en los peores momentos.

## Resumen

En este proyecto de tesis se estudia el arranque de la planta de digestión anaerobia ubicada en los predios de la empresa Latinoamericana de Jugos S.A.. Se estudia las condiciones bajo las cuales existirá una operación estable dentro de la planta para la maximización en la generación de biogás y fertilizante orgánico (biol).

El estudio consta de dos etapas. En la primera se trabajó con un digestor cilíndrico de lámina AISI 304 de 3mm de espesor, el cual debió ser reemplazado debido a deformaciones al someterlo a presión. En el segundo periodo se utilizó un segundo biodigestor el cual se construyó en lámina AISI 304 de 3,5mm de espesor.

Se analizaron diferentes parámetros operacionales como la cantidad de materia orgánica alimentada y la producción de biogás para observar bajo qué parámetros la cantidad de biogás era máxima.

Es importante mencionar que dentro del proceso hubieron días donde no se alimentó debido a problemas durante el arranque de la planta como lo son taponamiento de tuberías, sobrecarga del digestor o descensos en el pH.

Se realizaron diferentes análisis para caracterizar tanto la alimentación como la mezcla reactiva dentro del reactor y el biol extraído. Los análisis realizados son pH, demanda química de oxígeno, sólidos, alcalinidad y ácidos grasos volátiles.

Se observó que a medida que aumenta la cantidad de ácidos grasos volátiles también baja el pH del digestor por lo que es necesaria la adición de cal para regular este parámetro importante. Durante el estudio se obtuvo una producción máxima de  $7\text{m}^3$  de biogás por día con una tendencia creciente.

### Abstract

In this research project we studied the startup of the anaerobic digestion of fruit wastes plant that is located in Latinoamericana de Jugos S.A. We studied all of the parameters under which the plant operation is stable in order to maximize biogas and organic fertilizer generation.

The project was divided in two stages. In the first stage we worked with a cylindrical digester that was built using 3mm thick AISI 304 stainless steel sheets. This reactor had to be replaced due to deformation under vacuum pressure. In the second stage we used a modified cylindrical reactor that was built using 3,5mm thick AISI 304 stainless steel sheets.

The operation parameters that were analyzed were organic matter loaded into the reactor along with biogas production in order to determine the parameters under which biogas quantity is maximized.

It is important to mention that there were days where we did not load the reactor because of plant startup problems such as pipe clogging, digester overload and decreases in pH levels.

We ran analyses to characterize the feed, the reactive mixture in the digester and the organic fertilizer that was extracted. The analyses that were performed were pH, chemical oxygen demand, solids, alkalinity and volatile fatty acids.

We observed that increasing the amount of volatile fatty acids lowers the pH level in the reactor, which is why sometimes we added lime in order to regulate that important parameter. During this project we obtained a daily maximum biogas production of  $7\text{m}^3$  with an increasing trend.

## Tabla de Contenidos

1	Introducción .....	15
1.1	Antecedentes .....	15
1.2	Justificación del proyecto .....	16
1.3	Objetivos .....	17
2	Marco Teórico .....	18
2.1	Digestión Anaerobia .....	18
2.1.1	Proceso de la digestión anaerobia .....	18
2.1.2	Biogás .....	22
2.1.3	Bio-fertilizante .....	26
2.2	Diseño de digestores anaerobios .....	29
2.2.1	Modelos de digestores a pequeña escala .....	30
2.2.2	Digestores a escala industrial .....	33
2.3	Parámetros de operación de digestores anaerobios .....	35
2.3.1	Temperatura .....	35
2.3.2	pH .....	36
2.3.3	Carga orgánica diaria .....	37
2.3.4	Tiempo de retención hidráulico .....	37
2.3.5	Agitación – Mezclado .....	38
2.3.6	Nutrientes y compuestos tóxicos (inhibidores) .....	39
2.4	Sustratos para el proceso de digestión anaerobia .....	40
2.4.1	Sustratos de origen vegetal .....	41
2.4.2	Sustratos de origen animal .....	42
3	Métodos Experimentales .....	44
3.1	Materia prima .....	44
3.2	Parámetros operacionales y cálculos .....	45
3.2.1	Carga orgánica diaria .....	45
3.2.2	Tiempo de retención hidráulica .....	46
3.3	Caracterización de materia prima, mezcla reactiva y productos finales .....	46
3.3.1	pH .....	47
3.3.2	Producción y calidad de biogás .....	48

3.3.3	Demanda Química de Oxígeno .....	49
3.3.4	Sólidos Totales (TS) .....	50
3.3.5	Sólidos Orgánicos totales (OTS) .....	51
3.3.6	Sólidos totales suspendidos (TSS) y sólidos volátiles suspendidos (VSS)..	52
3.3.7	Alcalinidad .....	52
3.3.8	Ácidos grasos volátiles (AGV) .....	53
4	Diseño del Proceso de digestión anaerobia de desechos de fruta en Latinoamericana de Jugos S.A.....	54
4.1	Biodigestor a escala semi-industrial ubicado en Latinoamericana de Jugos S.A	56
4.2	Proceso de operación de la planta semi-industrial de digestión anaerobia ubicada en “Latinoamericana de Jugos S.A” .....	57
4.2.1	Almacenamiento de la materia prima y reducción de tamaño .....	57
4.2.2	Proceso de alimentación .....	60
4.2.3	Tratamiento del biogás.....	66
4.2.4	Tratamiento del bio - fertilizante .....	71
4.3	Control de la operación de la planta .....	72
4.3.1	Control de temperatura .....	73
4.3.2	Control de nivel.....	75
4.3.3	Control de presión.....	77
4.3.4	Control de pH.....	78
4.4	Operación automática y manual de la planta .....	80
4.4.1	Operación manual de la planta.....	81
4.4.2	Operación automática de la planta.....	82
5	Resultados y Discusiones .....	85
5.1	Sustitución del digestor .....	85
5.1.1	Cálculo del espesor óptimo de la lámina de construcción del digestor .....	85
5.2	Arranque de la planta de digestión anaerobia .....	87
5.3	Resultados de la operación durante el arranque de la planta .....	89
5.3.1	Volumen y composición de la alimentación .....	89
5.3.2	Carga orgánica diaria .....	94
5.3.3	Tiempo de retención hidráulico .....	95

5.3.4	Producción diaria de biogás .....	96
5.3.5	Temperatura en el biodigestor .....	99
5.4	Caracterización de alimentación, mezcla reactiva y biol.....	100
5.4.1	pH y adición de cal .....	100
5.4.2	Demanda Química de Oxígeno .....	101
5.4.3	Sólidos Totales (TS) .....	103
5.4.4	Sólidos Orgánicos Totales (OTS) .....	104
5.4.5	Sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles .....	105
5.4.6	Análisis de Ácidos Grasos Volátiles y Alcalinidad .....	106
5.5	Balance de masa dentro del reactor .....	107
5.6	Problemas presentados durante el arranque .....	108
5.6.1	Sistema de pre-tratamiento .....	108
5.6.2	Sistema de post- tratamiento .....	110
5.6.3	Sistema de calentamiento .....	110
6	Conclusiones y Recomendaciones .....	112
7	Referencias Bibliográficas .....	115
8	Anexos.....	118
8.1	Análisis de Biol llevado a cabo en el INIAP .....	119
8.2	Procedimientos de Análisis.....	120
8.2.1	Determinación del porcentaje de metano en biogás .....	120
8.2.2	Determinación de la Demanda Química de Oxígeno.....	120
8.2.3	Sólidos Totales y Sólidos Orgánicos totales.....	120
8.2.4	Sólidos Totales suspendidos y sólidos volátiles suspendidos.....	120
8.2.5	Alcalinidad.....	120
8.2.6	Ácidos Grasos Volátiles.....	120

### **Lista de Figuras**

Figura 2.1: Representación esquemática de las etapas de Digestión Anaerobia (11).....	19
Figura 2.2: Aplicaciones del biogás y sus respectivos tratamientos (7) .....	25
Figura 2.3: Esquema del biodigestor tipo chino (7).....	31
Figura 2.4: Esquema del biodigestor tipo Hindú (7).....	32

Figura 2.5: Esquema del biodigestor de desplazamiento (7) .....	33
Figura 2.6: Planta de co-generación en Dinamarca. Lemvig Biogás. (14) .....	34
Figura 2.7: Electricidad generada a partir de desechos y biomasa en el mundo (18).....	35
Figura 3.1: Desechos de naranjilla a procesar en la planta .....	45
Figura 3.2: Medidor de pH.....	47
Figura 3.3: Prueba cualitativa de biogás .....	48
Figura 3.4: Prueba cuantitativa de metano.....	49
Figura 3.5: (a) Digestor Hach. (b)Colorímetro Hach.....	50
Figura 3.6: (a) Estufa (b) Mufla .....	51
Figura 4.1: Diagrama de bloque de la planta de digestión anaerobia .....	55
Figura 4.2: Relleno del biodigestor.....	57
Figura 4.3: (a) Tanque de almacenamiento de fruta y estiércol. (b) Tornillo sinfín de transporte.....	58
Figura 4.4: (a) Equipo completo de reducción de tamaño (b) triturador .....	59
Figura 4.5: Motor VOGES para trituradora y picador .....	59
Figura 4.6: (a) Tanque de homogeneización (b) Agitador.....	61
Figura 4.7: Bomba sumergible GOULDS .....	62
Figura 4.8: Tamiz vibratorio .....	62
Figura 4.9: Tamiz vibratorio con tanque.....	63
Figura 4.10: Tanque almacenamiento de biol.....	64
Figura 4.11: Bomba de diafragma para recirculación.....	65
Figura 4.12: Anillo perimetral de alimentación .....	65
Figura 4.13: Salida de biogás.....	66
Figura 4.14: Sistema de pre-tratamiento de biogás.....	68
Figura 4.15: Contador de gases (25) .....	68
Figura 4.16: Tanque pulmón de almacenamiento de biogás.....	69
Figura 4.17: Gasómetro lleno .....	69
Figura 4.18: Bala de almacenamiento de biogás a presión .....	70
Figura 4.19: Generador eléctrico .....	71
Figura 4.20: Estabilizador de biol .....	72
Figura 4.21: Intercambiador de calor .....	73

Figura 4.22: Calefón y calderín .....	74
Figura 4.23: Medidor de temperatura analógico .....	75
Figura 4.24: Sensor de nivel Flowline .....	76
Figura 4.25: Medidor de nivel visual .....	76
Figura 4.26: Medidor de presión analógico .....	78
Figura 4.27: Sistema de control automático de pH.....	79
Figura 4.28: Panel de control .....	80
Figura 4.29: Diagrama del proceso en la pantalla táctil.....	83
Figura 4.30: Biodigestor en la pantalla táctil .....	84
Figura 5.1: (a) Primer Biodigestor. (b) Segundo Biodigestor.....	87
Figura 5.2: Variación de la alimentación durante el periodo de estudio .....	90
Figura 5.3: Desecho de fruta y estiércol alimentados .....	91
Figura 5.4: Relación desecho de fruta: estiércol .....	92
Figura 5.5: Volumen de biol reciclado y agua alimentada .....	93
Figura 5.6: Carga orgánica.....	94
Figura 5.7: Tiempo de retención hidráulico.....	95
Figura 5.8: Producción diaria de biogás y % de CH <sub>4</sub> .....	97
Figura 5.9: Relación entre la cantidad de biogás producida y la alimentación.....	98
Figura 5.10: Temperatura en el biodigestor .....	99
Figura 5.11: Variación de pH de la alimentación y la mezcla reactiva. Cantidad de aditivo .....	100
Figura 5.12: DQO alimentación y mezcla reactiva.....	102
Figura 5.13: TS alimentación y biol .....	103
Figura 5.14: OTS mezcla reactiva y alimentación.....	104
Figura 5.15: TSS y VSS de la mezcla reactiva .....	105
Figura 5.16: AGV/ Alcalinidad de la mezcla reactiva.....	106

## Lista de Tablas

Tabla 2.1: Resumen del proceso de digestión anaerobia (10) .....	21
Tabla 2.2: Composición típica del biogás (14) .....	22
Tabla 2.3: Comparación entre las propiedades energéticas del biogás con combustibles de uso común (7) .....	24
Tabla 2.4: Equipos de uso común y su consumo de biogás (7) .....	24
Tabla 2.5: Características físicas y químicas del biol y biosol (7).....	27
Tabla 2.6: Análisis microbiológico del biol y biosol (7) .....	27
Tabla 2.7: Compuestos químicos presentes en el biol (7) .....	28
Tabla 2.8: Clasificación de los reactores para el proceso de digestión anaerobia a nivel industrial (17).....	30
Tabla 2.9: Clases de compuestos inhibidores y su concentración (17).....	39
Tabla 2.10: Clasificación y características de los desechos según su origen (7).....	40
Tabla 2.11: Características de los desechos de fruta (20).....	42
Tabla 2.12: Características de diferentes estiércoles de origen animal (20).....	42
Tabla 4.1: Características de ambos biodigestores .....	56
Tabla 4.2: Selectores en el panel de control .....	81
Tabla 5.1: Datos de diseño del reactor .....	86
Tabla 5.2: Condiciones iniciales de operación .....	87
Tabla 5.3: Condiciones iniciales en el segundo reactor .....	88
Tabla 5.4: Balance de masa para el reactor.....	108

# 1 Introducción

## 1.1 Antecedentes

Desde sus inicios, la especie humana ha explotado los diversos recursos que la naturaleza ha puesto a su alcance. A partir del desarrollo de la agricultura, la pesca, la ganadería, entre otras actividades, ha crecido el impacto de las poblaciones en el medio ambiente.

Con la Revolución Industrial la ciencia y tecnología se desarrollaron de manera intensiva. El comercio experimentó un desarrollo extraordinario, lo que conllevó a una explosión demográfica y económica junto con el desarrollo de la urbe. Es en este momento, donde ya se comenzó a tratar los residuos, ya que debido a su acelerada generación, la asimilación por los ciclos naturales se ha vuelto casi imposible como se había dado hasta entonces (1).

A partir del siglo XX y, debido a la expansión de la economía basada en el consumo la cantidad de desechos generados se ha multiplicado hasta tomar proporciones críticas y generar un grave impacto en el ambiente (2). Además, durante las últimas décadas la demanda de combustibles fósiles ha crecido de manera importante debido al desarrollo tecnológico y a los excesos del ser humano en la explotación de su entorno. Es por esto que ha ido aumentando el interés en la búsqueda de fuentes energéticas alternativas, entre las que podemos encontrar la digestión anaerobia de desechos orgánicos (3). La disposición y tratamiento de los diferentes desechos, tanto orgánicos como inorgánicos, en el área urbana e industrial se ha convertido en uno de los focos de atención más importantes para municipios y autoridades competentes por lo que se han buscado opciones que permitan la acelerada degradación de los mismos con una considerable reducción de los riesgos ambientales (4).

El proceso de digestión anaerobia consiste en una transformación biológica de compuestos orgánicos debido a microorganismos. En este caso específico por bacterias metanogénicas que se desarrollan en un entorno anaerobio, es decir sin presencia de oxígeno, y son responsables de la generación de metano a partir de la materia orgánica alimentada (5).

El biogás producto de la digestión anaerobia está compuesto por dióxido de carbono y metano, gases responsables del efecto invernadero. Pero al ser el metano un hidrocarburo tiene un alto poder calorífico lo que hace que su aprovechamiento energético sea posible. Es así que dentro del marco del proyecto se intenta aprovechar estos recursos y disminuir su emisión al ambiente (5).

En el Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas, LaDEA, de la Universidad San Francisco de Quito se ha investigado la digestión anaeróbica de los desechos de fruta generados en la fábrica Latinoamericana de Jugos S.A a escalas de laboratorio y planta piloto. En Mayo del 2010, específicamente, el LaDEA envió el proyecto “Diseño, construcción y puesta en marcha de una planta semi-industrial de digestión anaerobia de alta tecnología para el tratamiento integral de desechos orgánicos y su transformación en energía renovable (biogás) y fertilizante orgánico (biol)” a la primera convocatoria del Proyecto Innova Ecuador impulsada por el Ministerio de Coordinación de Producción, Empleo y Competitividad. Este proyecto fue uno de los 19 ganadores dentro de la convocatoria (6).

InnovaEcuador es un programa que apoya la innovación empresarial y sectorial, para así diversificar los sectores productivos, dentro de este programa se han planteado dos líneas de apoyo, la primera centra su base en la innovación productiva mediante la introducción de un nuevo producto, mientras que la segunda se basa en la mejora significativa de un producto, bien o servicio, es así que se las dos líneas de apoyo se han denominada InnovaEmpresa e InnovaConocimiento (6).

Después de ciertas complicaciones de carácter burocrático y administrativo, en marzo de 2013 se terminó con la construcción de la Planta de digestión anaerobia de desechos de fruta en las instalaciones de la empresa Latinoamericana de Jugos S.A y su posterior puesta en marcha que es descrita dentro de este estudio.

## **1.2 Justificación del proyecto**

Actualmente, la demanda energética mundial se ha suplido con la explotación de combustibles fósiles, los cuales son fuentes energéticas no renovables, ya que su generación se da en ciclos naturales demasiado extensos. Es por esto que la necesidad de encontrar fuentes energéticas alternativas es importante (7). Dentro de este

contexto se ha visto que la digestión anaerobia puede apostar en la generación energética utilizando desechos agroindustriales de diferentes orígenes.

La planta de producción Latinoamericana de Jugos S.A. produce diariamente alrededor de una tonelada de desecho de fruta, por lo que el tratamiento de este desecho es un problema, tanto para la empresa como para la Municipalidad del Cantón Rumiñahui, la cual debe enviar un camión de basura varias veces al día.

Es por esto que la construcción de una planta de tratamiento de desechos de fruta en las instalaciones de la planta Latinoamericana de Jugos SA ayudaría al tratamiento de los desechos generados. Además que reducirá el impacto ambiental generado por estos desechos al enviarlos a los centros de acopio municipales. A la vez que habría una reducción en los costos energéticos de la planta ya que se podría suplir la energía utilizada en el proceso anaeróbico mediante la generación eléctrica utilizando el biogás resultado de la digestión anaerobia. El producto de interés del proyecto es el bio-fertilizante que puede ser comercializado. Es así, que la construcción y puesta en marcha de la planta es un proyecto beneficioso no solo para la empresa sino también para la Municipalidad del Cantón Rumiñahui.

### **1.3 Objetivos**

El objetivo general del proyecto es alcanzar la operación regular de la planta semi-industrial de digestión anaeróbica en la empresa Latinoamericana de Jugos S.A

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Registrar, analizar y controlar los parámetros de operación
- Alcanzar la operación óptima en la planta
- Elaborar el manual de operación de la planta

## 2 Marco Teórico

### 2.1 Digestión Anaerobia

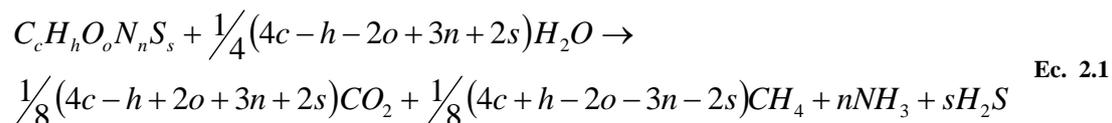
La digestión anaerobia (AD) es un proceso que ha cobrado creciente importancia en los últimos años, debido a las necesidades de crear nuevas fuentes de energía y de tratar los desechos orgánicos que se generan diariamente (8).

Este es un proceso de conversión bioquímica donde en ausencia de oxígeno los microorganismos degradan materia orgánica para generar como producto principal biogás, el cual es una mezcla entre metano y dióxido de carbono que se utiliza como combustible para la generación de energía tanto calórica como eléctrica. El subproducto de la producción es un biofertilizante que consta de un afluyente líquido “biof” y un afluyente sólido “biosol” (9).

#### 2.1.1 Proceso de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia puede ser descrita como una serie de procesos microbiológicos para la degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Como resultado se logra la conversión casi completa de la materia orgánica biodegradable en metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y amoníaco (10).

En 1952 Buswell propuso una fórmula genérica para el proceso de digestión anaerobia, la cual puede ser utilizada para predecir la cantidad del biogás generada (10)



En el proceso de digestión anaerobia diferentes tipos de microorganismos degradan la materia orgánica en una serie de reacciones simultáneas, las cuales se subdividen principalmente en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Estas etapas que se ven resumidas en la Figura 2.1

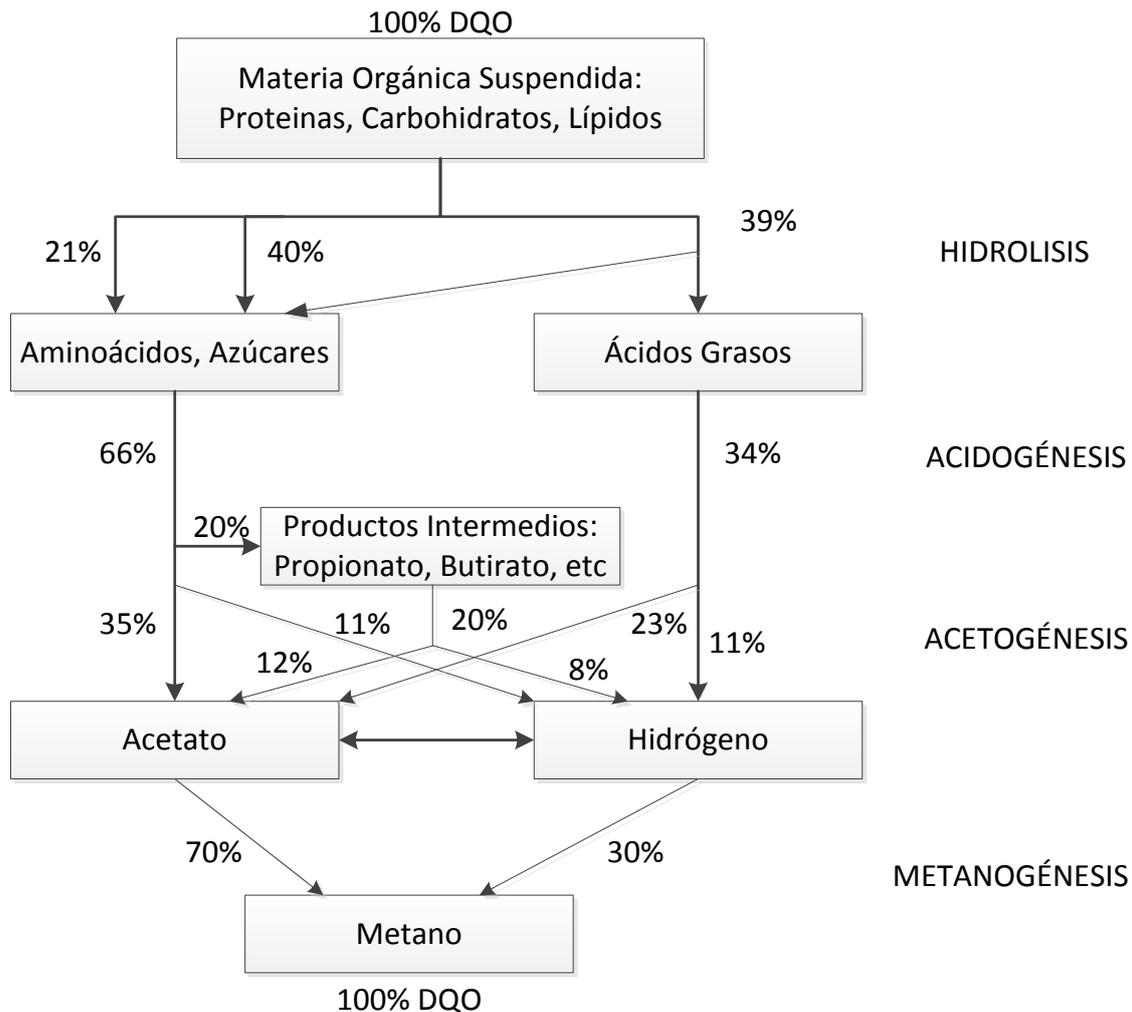


Figura 2.1: Representación esquemática de las etapas de Digestión Anaerobia (11)

En el primer paso, la hidrólisis, los diferentes polímeros orgánicos complejos tales como polisacáridos, proteínas y lípidos son degradados hacia productos solubles los cuales deben tener un tamaño suficiente como para permitir el transporte a través de la membrana celular de las bacterias. El proceso de hidrólisis es el paso más lento y por ende limitante del proceso de digestión anaerobia (11).

En la segunda etapa, la acidogénesis, los monómeros producidos en el proceso de hidrólisis son degradados por una vasta gama de bacterias tanto anaerobias como anaerobias facultativas y resulta en la producción de dióxido de carbono, hidrógeno gaseoso, alcoholes, ácidos orgánicos, compuestos orgánicos nitrogenados y compuestos organosulfurados. El más importante dentro de estos productos es el ácido acético, ya que se utilizará como el sustrato principal para las bacterias metanogénicas (10). Esta etapa es estrictamente anaerobia, por lo que la presencia de oxígeno podría tener un gran efecto en el proceso. Pero siempre coexisten con pequeña cantidad de bacterias aerobias, las cuales ayudarán a la eliminación de oxígeno en cualquier momento que este se encuentre disponible (11).

En el tercer paso, la acetogénesis, los productos de la etapa anterior, tales como ácidos grasos volátiles de bajo peso molecular son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono por la acción de microorganismos acetogénicos. Mediante la remoción del hidrógeno obtenido se puede favorecer el equilibrio termodinámico hacia la producción del ácido. Varios autores han agrupado los tres primeros pasos de la digestión anaerobia como una sola etapa conocida como fermentación ácida y es importante observar que dentro de este proceso ningún producto orgánico fue removido de su fase líquida sino que fue transformado en un compuesto que se utiliza como sustrato para las bacterias metanogénicas (11).

En el paso final de la digestión, conocido como metanogénesis, el ácido acético, producto principal de la fermentación ácida, es convertido en dióxido de carbono y metano. El metano es sintetizado en un 66% a partir del ácido acético mediante su descarboxilación producido por bacterias metanogénicas acetoclásticas como lo son *Methanosaeta* y *Methanosarcina* mientras que un 34% es producido a partir de la reducción del dióxido de carbono con hidrógeno dado por bacterias metanogénico hidrogenofílicas (11). De esta manera se mantiene una baja presión de hidrógeno dentro del reactor, ya que este es consumido dentro del proceso de metanogénesis y, como ya se mencionó, favorece el desplazamiento del equilibrio hacia la producción de ácido acético en el proceso de acetogénesis (10). Es importante mencionar que cuando el gas metano se separa de la fase líquida y pasa a la fase gaseosa es el único momento donde se remueve producto orgánico (11).

En la Tabla 2.1 se resumen el tipo de conversión dentro del proceso, así como las bacterias presentes en cada una de las etapas (10).

Tabla 2.1: Resumen del proceso de digestión anaerobia (10)

Proceso	Tipo de conversión	Bacterias
Hidrólisis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proteínas en aminoácidos y péptidos solubles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Clostridium, Proteus vulgaris, Peptococcus, Bacteriodes, Bacillus vibrio</i></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbohidratos en azúcares solubles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Clostridium, Acetovibrio celluliticus, Staphylococcus, Bacteriodes</i></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lípidos en ácidos grasos de cadena larga o alcoholes y glicerol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Clostridium, Micrococcus, Staphylococcus</i></li> </ul>
Acidogénesis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aminoácidos en ácidos grasos, ácido acético y NH<sub>3</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Lactobacillus, Escherichia, Staphylococcus, Bacillus, Pseudomonas, Desulfovibrio, Selenomonas, Sarcina, Veillonella, Streptococcus, Desulfobacter, Desulfuromonas</i></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Azúcares en productos intermedios de la fermentación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Clostridium, Eubacterium limosum, Streptococcus</i></li> </ul>
Acetogénesis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ácidos grasos de cadena larga o alcoholes en ácido acético e hidrógeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Clostridium, Syntrophomonas wolfeii</i></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ácidos grasos volátiles y alcoholes en ácido acético e hidrógeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Syntrophomonas wolfeii,</i></li> <li>• <i>Syntrophomonas wolinii</i></li> </ul>
Metanogénesis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrógeno y dióxido de carbono en metano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Methanobacterium, Methanobrevibacterium, Methanoplanus, Metanospirillum</i></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ácido acético en metano y dióxido de carbono</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Methanosaeta, Metanosarcina</i></li> </ul>

Como producto principal de la digestión anaerobia se obtiene biogás y al estar compuesto principalmente por metano tiene un valor energético importante, el cual puede ser aprovechado como combustible en calderos para producir calor o para la cogeneración de calor y energía mediante motores de generación combinada (12).

Por otra parte, el subproducto de la digestión anaerobia es un líquido el cual puede ser utilizado como fertilizante, ya que posee compuestos fitoreguladores que ayudan al desarrollo de las plantas y al enriquecimiento de suelos (13).

## 2.1.2 Biogás

### 2.1.2.1 Características del biogás

El biogás es el producto principal de la digestión anaerobia. Es un gas con una densidad muy parecida a la del aire con  $1,22 \text{ kg/Nm}^3$ , está compuesto mayoritariamente de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), pero contiene también trazas de gases tales como amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) (12).

El biogás puede ser considerado como un biocombustible neutro que contiene  $\text{CO}_2$  y su utilización es vasta en motores y equipos que utilizan gas natural. Tiene una capacidad calorífica que varía entre  $19,7$  y  $23,3 \text{ MJ/m}^3$  valor dependiente del porcentaje de metano que existe en el biogás y se podría considerar como el 50-70% de la capacidad calorífica que tiene el gas natural comercial para el cual los valores típicos son de  $31,6$ -  $39 \text{ MJ/m}^3$  dependiendo de la fuente y la composición (12).

En la Tabla 2.2 se muestran diferentes valores para cada uno de los componentes del biogás encontrados en literatura. Pero se debe considerar que estos valores son dependientes de varios parámetros entre los que se encuentran: el tipo de sustrato, el tipo de digester utilizado, la temperatura, tiempo de operación, entre otros.

Tabla 2.2: Composición típica del biogás (14)

Compuesto	Símbolo	Contenido (%v/v)
Metano	$\text{CH}_4$	50-75
Dióxido de Carbono	$\text{CO}_2$	25-45
Vapor de Agua	$\text{H}_2\text{O}$	2 (20°C) – 7(40°C)
Amoníaco	$\text{NH}_3$	<1
Ácido Sulfhídrico	$\text{H}_2\text{S}$	<1

El segundo componente más importante en el biogás es el dióxido de carbono el cual no es aprovechable energéticamente y no afecta a los equipos utilizados para su aprovechamiento energético, por lo que su remoción no es necesaria. Pero al ser un componente tan abundante en el biogás su remoción dará como resultado una mejora tanto en la capacidad calorífica como del índice de Woobe el cual es una relación entre el aire y el combustible para asegurar una combustión completa. Para aplicaciones en automotores el gas debe tener una proporción de metano del 95%, es decir se debe remover casi la totalidad del dióxido de carbono. Este proceso se conoce como enriquecimiento del biogás a biometano y para el proceso se utilizan una variedad de tecnologías, entre las que se encuentran: absorción en agua, adsorción presurizada, y procesos tanto de membrana como criogénicos (12).

Al ser la digestión anaerobia un proceso en fase líquida y a condiciones de temperatura de 35-40°C siempre existirá vapor de agua junto con el biogás, compuesto que no solo reduce la capacidad calorífica del biogás sino que también presenta problemas al condensarse en tuberías de gas o incluso al reaccionar con otros compuesto tales como el H<sub>2</sub>S para formar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> causando corrosión dentro de las tuberías (12). Es por esto que una efectiva remoción del vapor de agua es importante dentro del tratamiento del biogás obtenido.

El amoníaco dentro del biogás se produce durante la degradación de materia orgánica rica en proteínas y se ha determinado que normalmente la concentración de este compuesto dentro del biogás es bastante baja. Esto se debe a las condiciones de operación del biodigestor ya que el amoníaco se forma a valores altos tanto de pH como de temperatura mientras que a valores de operación normal del biodigestor la mayoría de nitrógeno estará disponible como amonio dentro del biol lo que permitirá su aprovechamiento como fuente de nitrógeno en las plantas. Se debe tomar en cuenta que al utilizar como combustible un biogás con una alta concentración de amoníaco se promoverá la formación de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) los cuales son gases contaminantes (12).

Adicionalmente, el biogás normalmente contiene varios componentes sulfurados entre los que se encuentran sulfuros y disulfuros. Dentro de estos compuestos el principal es el ácido sulfhídrico el cual es producido al degradar proteínas y no tiene ninguna aportación al aprovechamiento energético del biogás. La concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás depende del sustrato utilizado para la digestión y varía entre 0,1 al 2% en volumen. H<sub>2</sub>S es un gas tóxico y corrosivo para todos los equipos de combustión de biogás por lo que su remoción es una de las etapas más importantes del tratamiento del biogás. Si se combustiona biogás sin tratamiento el H<sub>2</sub>S es convertido en óxido de azufre, el cual puede reaccionar fácilmente con agua y producir ácido sulfúrico. Este compuesto corroe las superficies metálicas del motor y al ser utilizado en motores de autos también envenenará el convertidor catalítico. Es por esto que se ha definido un valor máximo de H<sub>2</sub>S de 20mg/Nm<sup>3</sup> para una operación adecuada de los sistemas de combustión de biogás (14).

### 2.1.2.2 Aprovechamiento energético del biogás

El uso energético del biogás se basa principalmente en la combustión del metano. La combustión es una reacción de oxidación y reducción donde el metano es convertido en dióxido de carbono y vapor de agua con la consecuente liberación de energía (7). Esta reacción se puede representar mediante la siguiente ecuación.



En la Tabla 2.3 se puede observar la comparación entre las propiedades energéticas del biogás y otros combustibles de uso común.

Tabla 2.3: Comparación entre las propiedades energéticas del biogás con combustibles de uso común (7)

Valores	Biogás	Gas Natural	Propano
Poder calorífico (KWh/m <sup>3</sup> )	7	10	26
Límite de explosión (% gas en el aire)	6-12	5-15	2-10
Temperatura de ignición (°C)	687	650	470
Requerimiento teórico de aire (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	6,6	9,5	23,9

Es así que aprovechando las propiedades energéticas del biogás se lo puede utilizar para diferentes aplicaciones entre las que se encuentran la producción de calor o vapor, la generación eléctrica y su utilización como combustible para automotores.

La generación de calor o vapor es el uso más simple del biogás y se basa en el aprovechamiento de la energía térmica liberada por el proceso de combustión. Es ampliamente utilizado en sectores donde no existe suficiente abastecimiento de combustibles y su utilización es dirigida hacia las labores básicas como lo son la cocina y el calentamiento de agua (12).

Los quemadores comunes de gas se pueden adaptar fácilmente a los requerimientos del biogás mediante el cambio en la relación entre aire y gas con lo que se lograrían alcanzar presiones de gas entre 8 a 25 mbar para hacer efectiva la combustión y se debe tomar en cuenta la necesidad de alcanzar una concentración de H<sub>2</sub>S inferior a 100ppm (12).

En la Tabla 2.4 se pueden observar diferentes artefactos de uso común que pueden ser operados utilizando biogás.

Tabla 2.4: Equipos de uso común y su consumo de biogás (7)

Equipo	Consumo de biogás (m <sup>3</sup> /h)*
Lámpara	0,07
Cocina de dos quemadores	0,20 - 0,42
Olla arrocera	0,14
Generador eléctrico (600W)	0,7 - 0,8
Calentador de agua	2,2

\*Para equipos adaptados al uso con biogás

Otra de las aplicaciones importantes del biogás es la generación de electricidad o combinación de calor y electricidad, tecnología que toma el nombre de “combined heat and power stations”, en los cuales se aprovecha tanto la energía eléctrica generada por el combustible como el calor desprendido durante el proceso.

Dependiendo de la utilización principal del sistema se toma la electricidad o el calor generado como subproductos. Este proceso toma importancia al realizarse un aprovechamiento más eficaz que sólo utilizando el calor o la electricidad generada. Es importante tomar en cuenta que el uso de biogás en microtubinas (25-100kW) y turbinas grandes (>100kW) puede llegar a tener una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa, es decir una eficiencia entre 70 – 80% y es un sistema de bajo mantenimiento. Pero comúnmente solamente se utilizan motores de encendido por chispa para el aprovechamiento energético de biogás. Ambos sistemas requieren una remoción de H<sub>2</sub>S por debajo de los 100 ppm y la remoción de agua (15).

En el caso de la utilización de biogás como combustible en vehículos, éste debe ser condicionado de tal manera que posea características muy similares a las del gas natural. Su utilización solo será posible en automotores acondicionados para funcionar con gas natral, los cuales poseen un tanque de gas y un sistema de combustión a gasolina o diésel. El uso del biogás ha sido ampliamente estudiado ya que posee un octanaje de alrededor 100 o 110 lo que permite su utilización en motores que posean una alta relación volumétrica de compresión, pero al mismo tiempo posee algunas desventajas entre las que se encuentran su baja velocidad de encendido, la necesidad de purificar el biogás para ser comprimido y almacenado en bombonas cilíndricas de alta presión, el costo de instalación del sistema a gas, la disminución de la capacidad de carga del automóvil debido al peso del cilindro y la falta de una red de distribución de este tipo de combustible (7).

En la Figura 2.2 se muestran las posibles aplicaciones del biogás y el tratamiento pertinente para hacerlo apto para cada uno de estos usos.

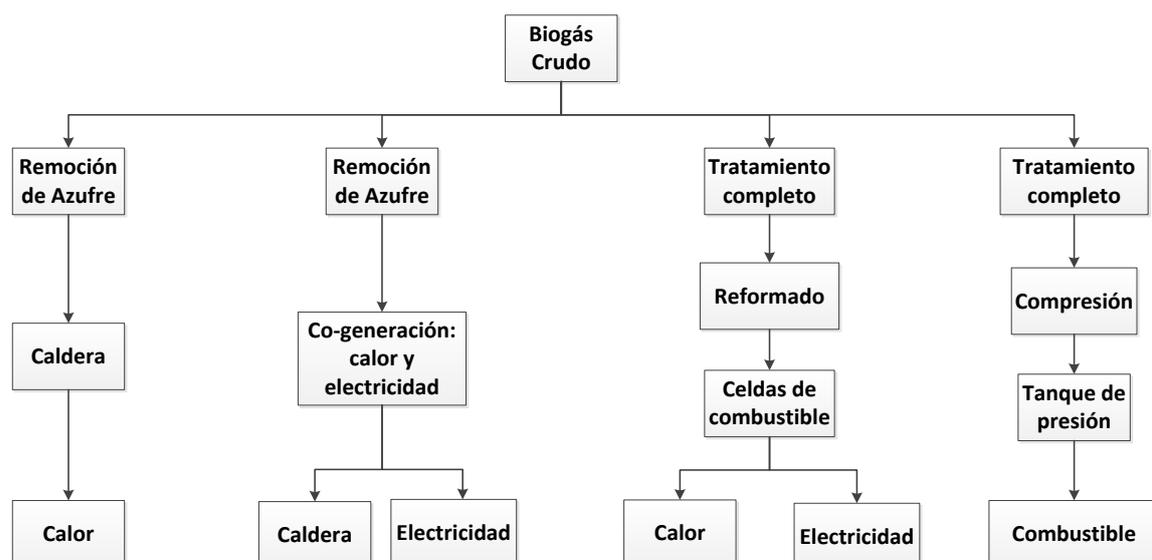


Figura 2.2: Aplicaciones del biogás y sus respectivos tratamientos (7)

## 2.1.3 Bio-fertilizante

### 2.1.3.1 Características del bio-fertilizante

La construcción de una planta de digestión anaerobia supone la implementación de una red de utilización total de la materia orgánica que antes era desechada. En este proceso se obtiene un producto principal: el biogás, el cual va a ser aprovechado energéticamente; y como subproducto un lodo residual conocido como bio-fertilizante, que se utiliza como acondicionador y fertilizante del suelo (7).

El uso del biofertilizante para cultivos es importante debido a que es una fuente de fitorreguladores los cuales ayudan al óptimo desarrollo de plantas y a una mejor productividad en los cultivos (16). Tomando en consideración los diferentes parámetros para la digestión anaeróbica, así como el tipo de sustrato utilizado en el proceso, se tendrá que aproximadamente el 85-90% de la alimentación del digestor saldrá como biofertilizante. Este biofertilizante está compuesto por un afluyente líquido conocido como “biol” y un residuo sólido conocido como “biosol”, manteniendo una relación de 9:1 aproximadamente entre biol y biosol (13).

El biol es un producto estable biológicamente, rico en humus y con una baja carga de patógenos. Este afluyente líquido de la digestión anaerobia tiene una amplia actividad biológica lo que permite el desarrollo de fermentos nitrosos y nítricos, así como también de hongos y levaduras que permitirán la favorable regeneración de suelos (7).

Por otra parte, el biosol se encuentra al separar la parte sólida del afluyente biofertilizante líquido obtenido. Se utiliza de manera similar al compost y su composición depende principalmente de las características bioquímicas del sustrato a degradarse. El biosol se puede utilizar solo o complementarlo con compost y/o fertilizantes químicos (13).

Las características tanto del biol como del biosol permitirán el análisis de las condiciones y los parámetros para su utilización en diferentes cultivos y se debe tomar en cuenta que cada biofertilizante es “único” y que cada uno de sus características dependerá del sustrato y los parámetros operacionales que rigen la digestión anaerobia.

La Tabla 2.5 muestra los principales componentes tanto del biol como del biosol presentado por la OLADE (7).

Tabla 2.5: Características físicas y químicas del biol y biosol (7)

<b>Parámetros</b>	<b>Biosol</b>	<b>Biol</b>
pH	7,2	7,9
N total (Kjeldal %)	1,0	1,8
P total (%)	4,1	8,4
K total (%)	0,4	0,7
Relación C/N	19,0	25,0
N mineral (mg/kg)	550,0	30,0
Conductividad (dS/m)	10,1	14,4

La Tabla 2.6 muestra un análisis microbiológico de los dos componentes de la digestión anaerobia indicando en la primera fila la cantidad de biomasa calculada y el tipo de microorganismos en cada tipo de fertilizante (7).

Tabla 2.6: Análisis microbiológico del biol y biosol (7)

<b>Característica microbiana</b>	<b>Biosol</b>	<b>Biol</b>
Actividad biológica (# células/ml *10 <sup>4</sup> )	357	1054
Hongos y levaduras (# células/ml *10 <sup>3</sup> )	250	25
Fermentos nitrosos (# células/ml *10 <sup>3</sup> )	1200	1100
Fermentos nítricos (# células/ml *10 <sup>3</sup> )	800	50
Coliformes totales (# colonias/ml *10 <sup>3</sup> )	0,1	0

Por otra parte, en la Tabla 2.7 se muestran diferentes compuestos químicos encontrados en el biol, muchos de los cuales servirán como fitohormonas, y ayudarán al crecimiento y desarrollo de las plantas.

Tabla 2.7: Compuestos químicos presentes en el biol (7)

Compuesto	Cantidad (nanogramos /g)
Ácido indol acético	9,0
Giberelina	8,4
Purinas	9,3
Tiamina (Vitamina B1)	259,0
Rivoflavina (Vitamina B2)	56,4
Ácido Fólico	26,7
Ácido Pantoténico	142,0
Triptófano	26,0
Cianocobalamina (Vitamina B12)	4,4
Piridoxina (Vitamina B6)	8,6

### 2.1.3.2 Beneficios del aprovechamiento del bio-fertilizante

Tanto el biol como el biosol son buenos acondicionadores del suelo ya que mejoran sus propiedades físicas debido al gran aporte de materia orgánica que presentan. Al ser productos de baja densidad y baja resistencia mecánica aportan al suelo una textura peculiar y mejoran su estructura con lo que ayudan a una reducción en la tasa de erosión. Por otra parte, mejoran la capacidad de retención de agua y el intercambio gaseoso (7).

En el caso del biol debido a su pronta descomposición brinda al suelo nutrientes disponibles de una manera eficaz. Los ácidos húmicos presentes contribuyen a una mejora en la estructura y porosidad del mismo con la consecuente mejora en su capacidad de intercambio iónico. El biol generalmente posee el doble de cantidad de humus estable que el estiércol puro lo que incrementa de forma significativa la actividad biológica del suelo. Por otra parte, al tener un alto contenido de nitrógeno en forma de amonio, se evita la pérdida de este importante componente mediante lixiviación así como las pérdidas producidas por la volatilización en el proceso de denitrificación biológica (17).

En cuanto a los cultivos el biol ofrece varios efectos positivos. Uno de ellos es que evita las manchas en las hojas producidas generalmente cuando se aplica una mezcla de desechos con estiércol que no han pasado por un proceso de digestión anaerobia. Esto se debe a la presencia de ácidos grasos de bajo peso molecular y ácido acético compuestos que son procesados y eliminados en el proceso de digestión anaerobia.

Otra de las ventajas que se han encontrado en el uso del biol es que se puede rociar y mezclar con el agua de riego y así tener un paulatino efecto fertilizante (14).

En el caso del biosol su uso permite una regulación de los ciclos de aprovechamiento de nutrientes de la planta, se fortalecen los cultivos y, por ende, mejora el rendimiento. Otro aspecto importante es que al tener características sólidas mejora la calidad del suelo, su estructura y la capacidad de retención de la humedad lo que favorece la actividad biológica del mismo y aumenta su porosidad con la consiguiente mejora en la permeabilidad y ventilación (13).

El biosol confiere a los suelos arenosos una mayor cohesión con lo que se mejora notablemente la capacidad de retención de nutrientes en este tipo de suelos. Al ser un producto sólido puede ser combinado con materia orgánica que va a ser compostada y así se reducirá el tiempo de compostaje. Otro aspecto importante es que el uso de biosol disminuirá de manera importante la cantidad de fertilizantes químicos a utilizarse en los cultivos al compararlo con sólo estiércol o sólo compost (13).

Otro de los beneficios que ofrece el uso de biosol es la inhibición en el crecimiento de hongos y bacterias patógenas para el cultivo. También reduce considerablemente la erosión del suelo. Al tener una mayor disponibilidad de nutrientes estos serán más fácilmente aprovechables para la planta que al utilizar solamente estiércol (13).

## **2.2 Diseño de digestores anaerobios**

El corazón de una planta de digestión anaerobia es el biodigestor y su diseño es una de las partes críticas para la maximización de la producción de biogás. El reactor es un recipiente donde se almacena la materia prima a digerir y es el dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica para producir biogás como producto principal y biofertilizante como subproducto.

Los digestores pueden tener forma cilíndrica, ovoide, cúbica o rectangular aunque en la actualidad la predominancia es hacia la construcción de reactores en forma cilíndrica. Las cubiertas pueden ser fijas o flotantes, las cuales tienen como misión impedir tanto el escape de olores como la entrada de oxígeno. También cuentan con un sistema de tuberías para la salida de gas o un sistema para la recolección del mismo (7).

Existen varios diseños de digestores anaeróbicos de carácter industrial y con el fin de simplificar el análisis de los mismos se los ha clasificado en base a diferentes parámetros como son: el tipo de sustrato, las condiciones ambientales asociadas al lugar donde se instalará el reactor, condiciones físicas para instalar la planta, entre otras. En la Tabla 2.8 se presenta una clasificación de biodigestores utilizados a nivel industrial.

Tabla 2.8: Clasificación de los reactores para el proceso de digestión anaerobia a nivel industrial (17)

Parámetro	Tipo de reactor
Carga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batch</li> <li>• Continuo o semi-continuo</li> </ul>
Intensidad de mezcla	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mezcla completa</li> <li>• Mezcla parcial o nula</li> </ul>
Manejo del sustrato	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contacto anaeróbico</li> <li>• Upflow Anaerobic Sludge Blanket (U.A.S.B)</li> <li>• Lecho fluido</li> <li>• Filtro anaerobio</li> </ul>
Manejo Bioquímico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Una etapa</li> <li>• Multietapa</li> </ul>

La primera clasificación corresponde al tipo de alimentación que se le dará al digester. La segunda corresponde a la agitación dentro del digester la cual conferirá diferentes características al proceso. Tercero, se clasifica de acuerdo a cómo se mantiene la mayor cantidad de bacterias activas dentro del digester, disminuyendo así el tiempo de retención. Finalmente, se clasifica de acuerdo a la cantidad de etapas del digester, es decir si será un biodigester donde todas las etapas de la digestión se den en un solo digester o dividido en varios digestores para cada etapa (17). En el caso de dos etapas existe un primer biodigester con alto tiempo de retención en donde se lleva a cabo la fase acidogénica, y en un segundo reactor con bajo tiempo de retención se da la metanogénesis. Con esta división se logra una mejor degradación de los desechos, cuya etapa de hidrólisis es lenta, como en el caso de frutas.

Es así que para el diseño de un biodigester se consideran diferentes parámetros como el tipo de sustrato a degradarse, los requerimientos y oportunidades de manejo energético de cada biodigester, y si se trata de un proceso a pequeña escala o rural, un proceso a mediana escala, o un proceso a gran escala o industrial.

### 2.2.1 Modelos de digestores a pequeña escala

Las plantas de digestión anaerobia a pequeña escala utilizan tecnologías bastante simples y generalmente se limitan al tratamiento de desechos de fincas. El aprovechamiento del biogás está destinado al uso para la cocina y la iluminación. Los digestores construidos bajo este régimen son simples, de bajo costo, robustos y de fácil operación, por lo que no poseen sistemas de control ni de calentamiento, y generalmente son construidos bajo tierra. Dentro de los biodigestores rurales o a pequeña escala encontramos el modelo chino, hindú y de desplazamiento.

El modelo chino es un reactor cilíndrico vertical enterrado de generalmente 6 a 8 m<sup>3</sup> de volumen con el techo y la base con forma de domo. Al comenzar el proceso se alimenta el reactor por el techo removible con residuos agrícolas y estiércol. Posteriormente existirá una alimentación diaria con los desechos orgánicos generados durante el día. La alimentación se da por un tubo que llega hacia la parte media del digestor, no existe un gasómetro por lo que al acumularse el biogás dentro del reactor el líquido es empujado por la tubería de descarga por donde posteriormente se removerá un volumen parecido al alimentado. Al ser un tanque sin agitación existe un proceso de sedimentación dentro del reactor por lo que se debe planificar cronogramas de vaciado total dos o tres veces al año. A pesar de que este digestor es poco eficiente para la generación de biogás, es formidable para la generación de bio-fertilizante, el cual es el componente más útil dentro de las granjas o fincas (14). En la Figura 2.3 se muestra el diseño de un digestor del tipo Chino.

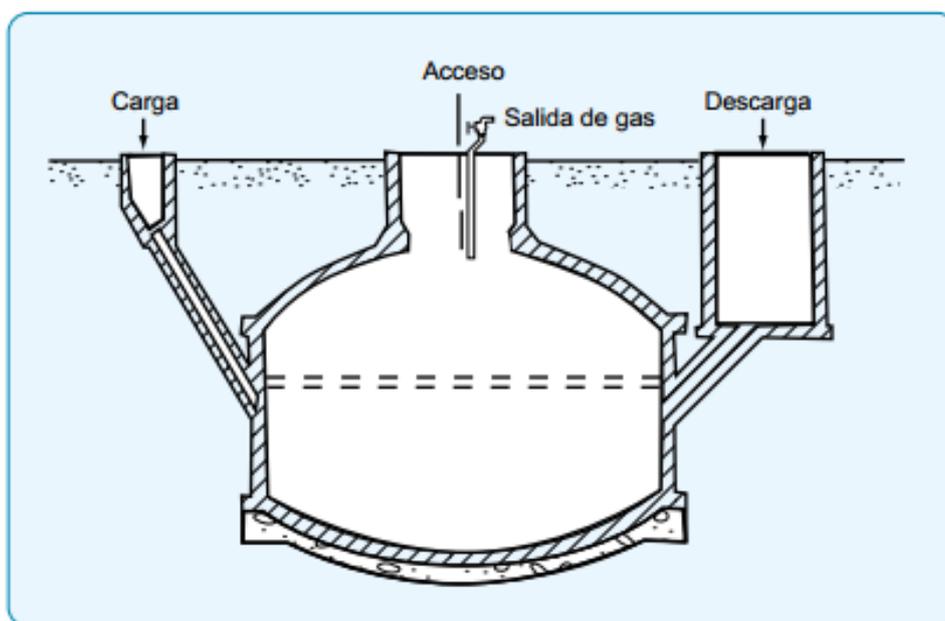


Figura 2.3: Esquema del biodigestor tipo chino (7)

El modelo hindú es un reactor vertical enterrado, muy parecido a un pozo, con alimentación continua. La producción de biogás es casi constante si las condiciones de operación son mantenidas. Para la recolección del biogás existe un gasómetro integrado al sistema el cual se compone por una campana ubicada en la sección superior del pozo en donde se almacena el gas. Al poseer un sistema de almacenamiento del gas este tipo de reactor tiene una operación eficiente y una mejor producción de biogás comparado con el modelo Chino (7).

Exste una alimentación diaria por gravedad desde una tubería que llega hasta el fondo del reactor lo que ayuda a la mezcla y provoca una salida de un volumen equivalente

de biofertilizante. Esta salida puede ser desde la superficie o desde el fondo del digestor, dependiendo de donde esté posicionada la tubería de descarga. Para la retención de la materia orgánica alimentada existe una pared divisoria la cual evita la expulsión del material entrante (7). En la Figura 2.4 se puede observar el esquema de un biodigestor rural del tipo Hindú, con cada uno de sus componentes (7).

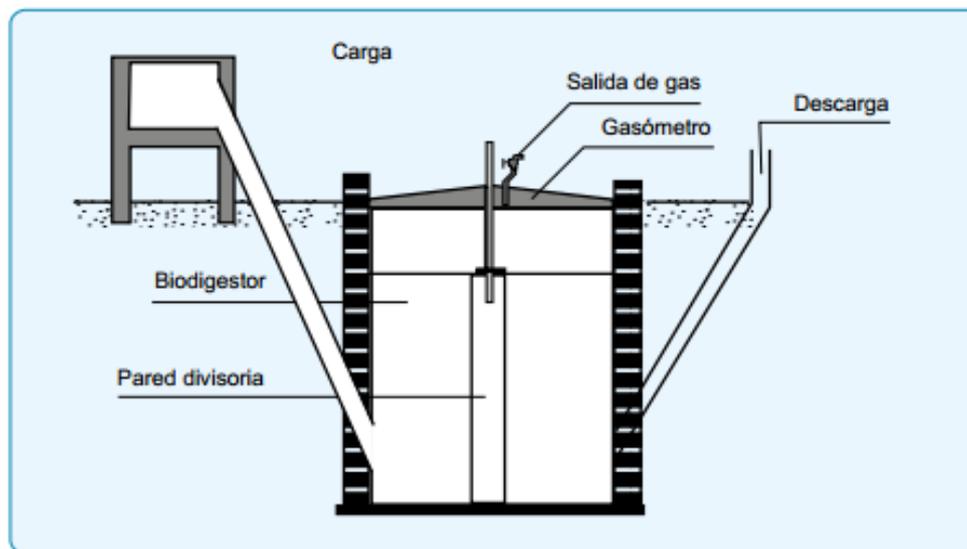


Figura 2.4: Esquema del biodigestor tipo Hindú (7)

El modelo de desplazamiento es un reactor poco profundo, enterrado y alargado horizontalmente con alimentación semi-continua. Por el un extremo se alimenta la materia prima y el biofertilizante es recogido por el extremo opuesto. Se puede considerar un reactor de flujo de pistón ya que existe un movimiento del material a lo largo del digestor. Cabe recalcar que este tipo de reactores son utilizados cuando se trabajan volúmenes mayores a 15m<sup>3</sup> para los cuales no se puede realizar una excavación vertical (14). El digestor posee un gasómetro, que mejora la eficiencia en el proceso productivo de biogás, y una pared divisoria la cual impide la salida del material recientemente alimentado. En la Figura 2.5 se puede observar un esquema del funcionamiento y las partes del biodigestor rural de desplazamiento (7).

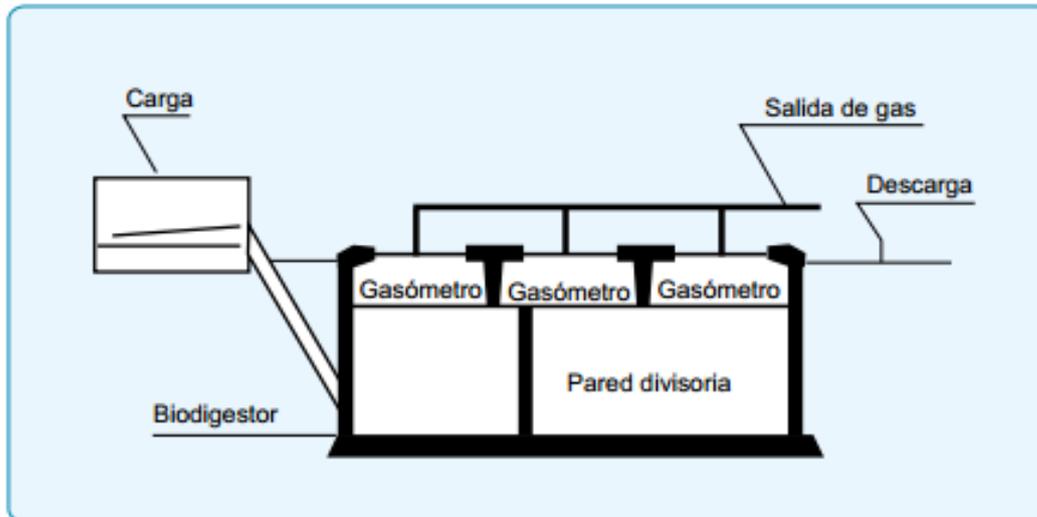


Figura 2.5: Esquema del biodigestor de desplazamiento (7)

### 2.2.2 Digestores a escala industrial

Las plantas de digestión anaeróbica para aprovechamiento eléctrico y térmico se basan en la recolección de estiércol, residuos vegetales y lodos, los cuales están formados de heces y desechos orgánicos acumulados de diferentes granjas o fincas ubicadas alrededor de la planta. La ubicación de la planta es estratégica para alcanzar una reducción en los costos de transporte y tiempo de recolección de la biomasa desde las fuentes hacia la planta. Las plantas de co-digestión utilizan una gran variedad de sustratos entre los que podemos encontrar: residuos de industrias agrícola, alimenticia y pesquera, residuos orgánicos de viviendas y fangos cloacales. Unos de los países que más han implementado y desarrollado la industria de digestión anaerobia es Dinamarca, pero también se ha desarrollado en otras regiones donde existe una gran industria agrícola y ganadera (14).

En las plantas a gran escala como la que se observa en la Figura 2.6 el estiércol es transportado desde los tanques de almacenamiento en camiones al vacío hacia la planta central de biogás donde el estiércol es mezclado con la materia orgánica que servirá como sustrato. Esta mezcla es bombeada al biodigestor. La empresa se encarga tanto de ubicar un contenedor cercano para recoger el estiércol de los agricultores así como de colocar un tanque que los abastezca de biofertilizante para sus cultivos. Éstos contenedores normalmente son compartidos entre varios agricultores.



**Figura 2.6: Planta de co-generación en Dinamarca. Lemvig Biogás. (14)**

El sistema de operación de la planta es continuo y la cantidad de bio-fertilizante extraído es igual a la cantidad de mezcla reactiva alimentada. El producto es bombeado a través de tuberías hacia tanques de almacenamiento temporal donde se tomará una muestra para el análisis de los diferentes parámetros nutricionales. Los agricultores pueden tomar una cantidad de biol igual a la cantidad de estiércol dejado para el proceso y el exceso de biol es vendido para su uso como fertilizante (14). La materia orgánica utilizada para el proceso de digestión se utiliza posteriormente como fertilizante lo que genera un ciclo de reciclaje de nutrientes y carbono.

Como se puede observar en la Figura 2.6 los sistemas de digestión anaerobia a escala industrial no son compuestos de un pequeño biodigestor rural, sino que se componen de una serie de equipos tanto para el pretratamiento de la materia prima así como para el post- tratamiento y almacenamiento del biogás y el bio-fertilizante obtenido. El post-tratamiento del biogás producido en plantas a escala industrial permite que la combustión y la generación eléctrica no se vea afectada por compuestos presentes en el biogás, entre los que se encuentran ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y otras impurezas presentes en el biogás que no ha sido tratado.

Europa es el continente que ha promovido el uso de biomasa como materia prima para la producción de biocombustibles alternativos, pero se puede observar en la Figura 2.7 que existe actualmente una tendencia mundial creciente en el aprovechamiento de energía eléctrica a partir de biocombustibles de segunda generación, es decir a partir de desechos (18).

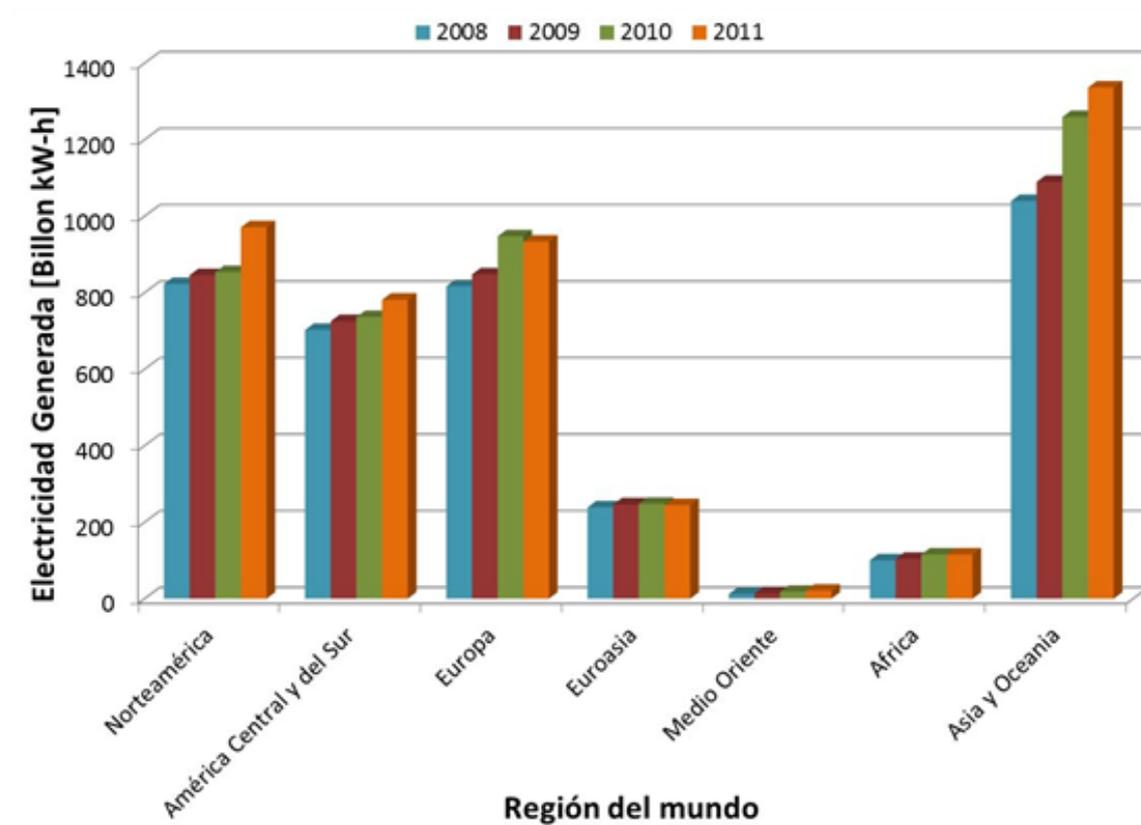


Figura 2.7: Electricidad generada a partir de desechos y biomasa en el mundo (18)

### 2.3 Parámetros de operación de digestores anaerobios

Al ser la digestión anaerobia un proceso biológico se ve influenciado fuertemente por factores ambientales los cuales pueden mejorar o inhibir el desarrollo de la digestión. Factores influyentes se pueden considerar aquellos que modifican la tasa de crecimiento bacteriano, la tasa de degradación de materia orgánica, la producción de biogás o la utilización del sustrato. A continuación se encuentran los principales factores.

#### 2.3.1 Temperatura

Los procesos anaeróbicos son fuertemente dependientes de la temperatura, ya que la velocidad de degradación de la materia orgánica depende, principalmente, de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados dentro del proceso. A medida que existe un aumento en la temperatura aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos dando como resultado una mejor tasa de digestión y, por lo tanto, una mayor producción de biogás (7).

La digestión anaerobia ocurre a varias temperaturas, las cuales han sido subdivididas en tres rangos. El primero se conoce como rango psicrófilico que comprende

temperaturas entre 10 y 25°C. El segundo rango es el mesofílico que comprende temperaturas entre 25°C y 45°C. Finalmente el rango termofílico varía desde 45°C hasta 55°C. Dado que a mayor temperatura la velocidad de degradación aumenta, existirá una relación directa entre la temperatura y el tiempo de retención hidráulico, es decir a mayor temperatura menor será el tiempo que la materia orgánica necesita permanecer en el digestor para ser degradada (14).

El rango mesofílico es el más utilizado, aunque se están realizando estudios para la implementación de tecnologías que operen en el rango termofílico con el fin de disminuir el tiempo de retención hidráulico y así también conseguir una mayor velocidad en el proceso de digestión. El principal problema que se da en el rango termofílico es la inestabilidad en la operación. En este rango el sistema se vuelve más susceptible a cualquier cambio en los parámetros operacionales (7).

La mayor demanda energética al operar en rango termofílico se ve justificada con el incremento en la producción de biogás, pero al ser un sistema menos estable solo soportará cambios de temperatura de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , mientras que al operar en el rango mesofílico no se verán variaciones importantes en la producción de biogás a menos que existan variaciones de temperatura mayores a  $\pm 3^\circ\text{C}$  (14).

Otro de los parámetros que se ven afectados a medida que varía la temperatura es la cantidad de nitrógeno presente en forma de amoníaco encontrado en el reactor. Este parámetro es una medida de la operación del digestor, ya que al aumentar la temperatura disminuirá la solubilidad del radical amonio por lo que el nitrógeno se encontrará en forma de amoníaco (14). Una cantidad de amoníaco considerable dentro del digestor es beneficioso mientras se mantenga por debajo de concentraciones de 200 mg/L ya que a medida que aumenta la concentración el amoníaco se vuelve un fuerte inhibidor especialmente del proceso metanogénico, ya que estas bacterias son sumamente sensibles a altas concentraciones de amoníaco llegando incluso a haber una inhibición del 50% (19).

### 2.3.2 pH

El pH es una medida de la alcalinidad o acidez de una solución y los cambios en este parámetro tienen un efecto adverso en el crecimiento de las bacterias metanogénicas las cuales son las más afectadas dentro de toda la comunidad bacteriana. Varios estudios han mostrado que la generación de biogás se da generalmente en niveles de pH que varían entre 5,5 y 8,0 siendo el rango neutro el óptimo para el proceso metanogénico. Al relacionar los niveles de pH con la temperatura se observa que para el rango mesofílico el pH óptimo se encuentra entre 6,5 a 8 y se considera peligroso para el proceso los cambios de pH menor a 6 o mayor a 8,3 (14).

Los valores de pH ácidos reducen la actividad metanogénica por lo que se produce una acumulación de ácido acético e hidrógeno dentro del digestor. Al aumentar la

cantidad de hidrógeno también aumentará su presión parcial por lo que las bacterias que degradan ácidos grasos de alto peso molecular (AGV) se verán inhibidas lo que llevará a una acumulación de éstos entre los cuales se encuentran el ácido propanoico y butanoico trayendo consigo una disminución abrupta del pH (7).

Una de las primeras opciones para la resolución de la caída en el pH es reducir la carga orgánica alimentada al reactor lo que permitirá que los AGV se consuman en una tasa mayor a la que se generan hasta que la concentración de AGV vuelva al equilibrio y el pH del reactor vuelva a sus condiciones normales donde habrá nuevamente un proceso metanogénico. A medida que el proceso se va estabilizando se puede ir aumentando la carga orgánica hasta completar la capacidad del digester. En casos extremos, en los que no se logra volver a los rangos de pH operacionales mediante la disminución de la carga orgánica, se pueden añadir sustancias básicas que ajusten el pH de la solución (7).

### **2.3.3 Carga orgánica diaria**

La carga orgánica diaria es el volumen de material orgánico alimentado diariamente al biodigestor. Este valor tiene una relación inversa con el tiempo de retención ya que a medida que aumenta la carga orgánica disminuye el tiempo de retención hidráulico en el reactor. Para expresar este parámetro se utilizan diferentes nomenclaturas entre las cuales podemos encontrar kg materia/día, kg materia seca/ día y kg de sólidos volátiles/día, todos expresados por m<sup>3</sup> de biodigestor (17).

En ausencia de sustancias inhibidoras una alta carga orgánica se verá reflejada en una alta producción de biogás aunque al aumentar la carga orgánica también existe un alto riesgo de que exista sobrecarga en el reactor con su consecuente caída del pH (7).

Es importante mencionar que tanto las condiciones de baja carga orgánica como de sobrecarga son peligrosas para el funcionamiento del bioreactor. En la primera al no existir suficiente sustrato los microorganismos no se pueden reproducir adecuadamente por falta de sustrato y no hay suficiente materia para degradar por lo que no existirá una adecuada producción de biogás. Mientras que en el caso de sobrecarga orgánica en el reactor no se dará una degradación completa de la materia orgánica y el equilibrio en la operación puede verse desplazado contribuyendo a la acidificación del biodigestor y su malfuncionamiento.

### **2.3.4 Tiempo de retención hidráulico**

Uno de los parámetros más importantes para el diseño de un biodigestor es el tiempo de retención hidráulico. Este está expresado como el tiempo promedio que permanece el sustrato dentro del digester (14).

Y es importante tomar en cuenta que al incrementar la carga orgánica se reducirá el tiempo de retención hidráulico (TRH) del sustrato en el biorreactor asegurando que la

cantidad de microorganismos dentro se mantenga casi constante lo que implica que el TRH debe ser lo suficientemente extenso para asegurar que la cantidad de microorganismos removidos junto con el biofertilizante sea menor a la cantidad de microorganismos que se reproducen. La tasa de reproducción de los microorganismos se encuentra alrededor de diez días. Lo que indica que un tiempo de retención hidráulico menor provee un buen flujo de sustrato, pero disminuye considerablemente la cantidad de biogás producido (14).

Se debe considerar que el tiempo de retención hidráulico es un parámetro dependiente de la temperatura. Es así que se ha estimado para el rango mesofílico un tiempo de retención hidráulica de 30 a 40 días para regiones que se encuentran en América Central y del Sur aunque este valor varía de acuerdo al tipo de reactor utilizado y al tipo de sustrato ya que sustratos con mayor cantidad de carbono retenido en moléculas resistentes como lo es la celulosa requerirán un tiempo de retención hidráulico mayor (7).

### **2.3.5 Agitación – Mezclado**

Mediante la agitación se busca alcanzar el óptimo funcionamiento del biodigestor. La agitación permite remover los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclar la alimentación con la población bacteriana que la degradará, evitar la formación de sedimento en el fondo del reactor o espuma en la superficie y evitar la creación de volúmenes muertos en los cuales no existe actividad bacteriana y, por ende, reducen el volumen efectivo del digestor (7).

Al elegir el tipo de agitación se debe tomar en cuenta que el proceso de digestión anaerobia requiere un equilibrio entre los procesos metabólicos de varios tipos de microorganismos. Por lo tanto, se debe mantener la proporción entre los metabolitos de algunas bacterias que servirán como sustrato de otras. Se debe evitar la ruptura de ese equilibrio mediante agitación excesiva lo cual conllevará a una disminución de la actividad bacteriana y a una disminución en la producción de biogás. Al tener una adecuada agitación se logrará disminuir el tiempo de retención hidráulico, ya que habrá una distribución uniforme de la temperatura, del sustrato y de los productos dentro del reactor. La agitación adecuada permite tener un mayor contacto entre las bacterias con el sustrato y se evitará la formación de espuma en la superficie de la mezcla reactiva lo que dificulta la salida del biogás (7). En consecuencia el optimizar el mezclado influye en una mayor producción de biogás.

Se pueden diferenciar entre tres tipos de agitación que se pueden aplicar a un sistema de digestión anaerobia. La primera conocida como agitación mecánica se da mediante agitadores manuales o con motores eléctricos. El segundo tipo de agitación es hidráulico y se realiza por recirculación del afluente líquido. En el tercer tipo se agita el contenido del reactor mediante la recirculación del biogás al burbujearlo desde el fondo del reactor (7).

### 2.3.6 Nutrientes y compuestos tóxicos (inhibidores)

Los microelementos como hierro, níquel, cobalto, selenio, entre otros, son igualmente importantes para el crecimiento microbiano dentro del proceso de digestión anaerobia, así como los macronutrientes entre los que se encuentran el carbono, nitrógeno, fósforo y azufre con una relación óptima de disponibilidad de 600:15:5:1. Si no se encuentran tanto los micronutrientes como los macronutrientes disponibles en el sustrato para el metabolismo de los microorganismos el proceso de digestión anaerobia se verá inhibido y, por ende, se afectará la producción de biogás (14).

Otro de los factores inhibidores de la actividad microbiana puede ser la presencia de compuestos tóxicos, los cuales pueden encontrarse en la materia prima o generarse durante el proceso de digestión anaerobia. La concentración excesiva de metales pesados, alcalinos y alcalinotérreos, así como de sulfuros puede ser peligroso para los microorganismos, ya que tienden a bloquear la actividad enzimática de las bacterias al crear enlaces de coordinación con los grupos  $-SH$  presentes en varios aminoácidos lo que ocasiona generalmente la muerte de las colonias bacterianas (14).

La Tabla 2.9 muestra diferentes compuestos inhibidores y las proporciones en las que presentan su efecto inhibidor (17).

**Tabla 2.9: Clases de compuestos inhibidores y su concentración (17)**

<b>Compuesto Inhibidor</b>	<b>Símbolo Químico</b>	<b>Concentración de Inhibición [ppm]</b>
Sulfatos	$SO_4^{2-}$	5000
Cloruro de sodio	$NaCl$	40000
Nitrato	$NO_3^-$	0,05
Cobre	$Cu^{1+}$	100
Cromo	$Cr^{3+}$	200
Níquel	$Ni^{2+}$	200 – 500
Cianuro	$CN^-$	25
Detergente sintético	-	20 – 40
Sodio	$Na^+$	3500 – 5500
Potasio	$K^+$	2500 – 4500
Calcio	$Ca^{2+}$	2500 – 4500
Magnesio	$Mg^{2+}$	1000 – 15000

## 2.4 Sustratos para el proceso de digestión anaerobia

Existen diferentes clases de residuos que se pueden utilizar para el proceso de generación metanogénica en condiciones anaerobias. En la Tabla 2.10 se puede observar que se ha realizado una clasificación de los desechos que participarán en el proceso de acuerdo a su origen: animal o vegetal.

Tabla 2.10: Clasificación y características de los desechos según su origen (7)

Origen	Clasificación	Tipo de residuo
Animal	Animal	Estiércol, orina, residuos de mataderos (sangre y vísceras), residuos de pescado
	Humano	Heces, basura, orina
Vegetal	Vegetal	Maleza, desechos de cosecha
	Agroindustrial	Salvado de arroz, orujos, melazas, residuos de semillas
	Forestal	Hojas, ramas, cortezas
	Cultivos acuáticos	Algas marinas, malezas acuáticas

La propensión a la degradación de los sustratos y su eficiencia al producir biogás depende, principalmente, de la cantidad de componentes primarios que posea este sustrato. Esto es lípidos, proteínas y carbohidratos. Al realizarse varios estudios se ha determinado que el contenido de lípidos es la característica más importante en cuanto a la composición biológica de los sustratos, ya que el rendimiento de producción de biogás a partir de lípidos es mucho mejor que de otros compuestos orgánicos. Pero se debe considerar que la velocidad de hidrólisis de los lípidos es mucho más lenta que de otros compuestos orgánicos y al ser éste el paso determinante de la generación de biogás esto conllevará a la necesidad de un mayor tiempo de retención hidráulico para lograr su degradación (10).

Por otra parte, los sustratos ricos en compuestos de cadena larga como lo son la lignina y la celulosa se consideran ligeramente resistentes a la degradación anaeróbica y su hidrólisis será el paso determinante de la velocidad del proceso. Es así que para aumentar la tasa de degradación hidrolítica se considera etapas previas al proceso de la digestión anaerobia donde las cadenas lignocelulósicas son rotas y convertidas en azúcares fermentables (10).

La composición del sustrato también determina la cantidad de carbono y nitrógeno, y su relación (C/N) indica la disponibilidad tanto de carbono como de nitrógeno para el proceso biológico. Se considera que con una alta relación de C/N no se producirán cantidades significativas de biogás ya que habrá limitación de nitrógeno, uno de los

principales macronutrientes para el crecimiento bacteriano. Por otro lado, cuando la relación C/N es muy baja el proceso de degradación se estancará debido a una excesiva acumulación de amoníaco, un compuesto inhibidor del crecimiento bacteriano. Es por esto que se ha concluido que la relación óptima de C/N se encuentra entre 25 – 30. Por lo tanto, se considera que el proceso debe estar equilibrado entre la alimentación de sustratos con una alta relación de C/N, generalmente de origen vegetal, junto con sustratos con una baja relación de C/N, generalmente de origen animal (7).

Otro de los factores importantes en cuanto al sustrato para la digestión anaerobia es el tamaño de partícula, el cual tendrá un rol importante en la etapa de hidrólisis, ya que a menor tamaño de partícula existirá una mayor área de contacto entre los microorganismos y el sustrato, logrando una mayor tasa de degradación hidrolítica. Incluso se ha considerado que una reducción del tamaño de partícula de 2mm puede llevar a un incremento de hasta el 20% en la tasa de degradación hidrolítica (10).

Finalmente, la composición de sólidos totales es también uno de los factores importantes dentro del proceso de digestión anaerobia, ya que la movilidad de las bacterias dentro del digestor se ve severamente afectada a medida que aumenta la proporción de sólidos dentro de éste lo que se traduce en una afectación en la eficiencia y producción de biogás. En varios experimentos se ha analizado el porcentaje de sólidos totales y se ha concluido que el rango óptimo para este parámetro dentro de reactores continuos o semi-continuos se encuentra entre 8 – 12% mientras que en reactores del tipo batch este parámetro puede alcanzar el 40 – 60% (7). Para alcanzar el rango óptimo de sólidos totales dentro del digestor se debe realizar diluciones de la alimentación tomando en cuenta la carga de sólidos de cada uno de los componentes orgánicos.

#### **2.4.1 Sustratos de origen vegetal**

Como se observa en la Tabla 2.10 existen diferentes tipos de sustratos de origen vegetal de los cuales se han realizado estudios de digestión anaerobia entre los que se encuentran papa, brócoli, remolacha azucarera, desechos de fruta, mezcla de desechos de fruta y vegetales, y lixiviados de fruta (8, 9, 20). El tipo de sustrato de origen vegetal que presenta mayor importancia para este estudio son los desechos de fruta los cuales son caracterizados en la Tabla 2.11 (20).

Tabla 2.11: Características de los desechos de fruta (20)

Parámetro [%]	Tomate	Mango	Naranja	Piña	Banana
Humedad <sup>a</sup>	70,5	73,6	73,4	87,7	88,1
Sólidos Totales <sup>a</sup>	29,5	26,4	26,6	12,3	11,9
Sólidos Volátiles <sup>b</sup>	95,7	96,4	94,2	93,8	95,1
Ceniza <sup>b</sup>	4,3	3,6	5,8	6,2	4,9
Carbono Total <sup>b</sup>	54,9	39,8	42,5	38,9	40,5
Nitrógeno Total <sup>b</sup>	4,2	0,5	1,0	0,9	1,9
Fósforo <sup>b</sup>	0,22	0,56	~0	0,08	0,09
Radio C/N	13,0	76,5	40,5	42,3	21,3

Las letras a o b corresponde a estudios realizados en base húmeda o base seca respectivamente. Para los estudios en base seca la muestra ha sido sometida a un proceso de secado antes de realizar el análisis.

#### 2.4.2 Sustratos de origen animal

Como se observa en la Tabla 2.10 existen diferentes tipos de sustratos de origen animal. Normalmente al considerar sustratos de origen animal se refiere a estiércol de distintos orígenes, entre los más comunes y más analizados se encuentran estiércoles de ganado bovino, equino, porcino, aviar, ovino y caprino. Estos sustratos poseen características bioquímicas que permiten el desarrollo de la actividad microbiana dentro de la digestión anaerobia. Las características de cada uno de estos sustratos se resumen en la Tabla 2.12 (20).

Tabla 2.12: Características de diferentes estiércoles de origen animal (20)

Tipo de Estiércol	Lípidos [%]	Proteínas [%]	Carbohidratos [%]	Radio C/N	Potencial de Producción de Biogás [m <sup>3</sup> /kg húmedo]	Sólidos Totales [%]
Bovino	3,23	9,05	68,06	25:1	0,04	13,4 – 56,2
Porcino	11,5	10,95	53,88	13:1	0,06	15,0 – 49,0
Aviar	2,84	9,56	70,37	19:1	0,08	26,0 – 92,0
Equino	2,70	5,00	75,5	50:1	0,04	19,0 – 42,9
Ovino	6,30	3,75	64,00	35:1	0,05	32,0 – 45,0
Caprino	2,90	4,70	67,00	40:1	0,05	83,0 – 92,0

Como se puede observar, cada uno de los estiércoles tiene diferentes características, donde las más importantes son la cantidad de sólidos y la relación C/N ya que, como se mencionó en secciones anteriores, la primera influirá en la movilización de las bacterias a lo en el volumen del reactor mientras que la segunda indica la disponibilidad tanto de carbono como de nitrógeno para el proceso biológico.

### 3 Métodos Experimentales

Durante el arranque y la operación de la planta semi-industrial de digestión anaerobia ubicada en Latinoamericana de Jugos S.A se deben realizar diferentes análisis de los parámetros operacionales importantes, tales como son el tiempo de retención hidráulica, la cantidad de sólidos totales, el pH, la temperatura y la carga orgánica diaria, tanto de la alimentación como de la mezcla reactiva. Los análisis se realizan con el fin de conocer el estado actual del proceso y de optimizar la producción de biogás y como subproducto importante el bio-fertilizante.

Los análisis necesarios para la caracterización tanto de la materia prima como de los productos obtenidos se detallan a continuación y permitirán conocer el estado del biodigestor y su capacidad de degradación de la materia orgánica.

#### 3.1 *Materia prima*

Debido a que el proyecto de construcción de la planta se realizó enfocándose hacia el tratamiento de desechos de fruta de la planta productora de pulpa de fruta Latinoamericana de Jugos S.A. la materia prima para el proceso de digestión anaerobia estará compuesta principalmente por cáscaras y pepas que se obtienen del proceso de extracción y que no presentan ningún agregado económico importante por lo que son desechadas.

En el caso de la materia orgánica animal se utilizó estiércol bovino basándose en la disponibilidad del mismo y en estudios realizados tanto a escala laboratorio como en la planta piloto de digestión anaerobia ubicada en el LaDEA (21).

Durante el arranque se utilizaron principalmente desechos de naranjilla, tomate de árbol y piña debido a su textura y a la facilidad de trituración que ofrecen. El principal tratamiento que se le da a la materia orgánica vegetal es la reducción del tamaño de partícula. Con este proceso se logran evitar posibles taponamientos en los sistemas de bombeo y transporte de la mezcla de alimentación; y también ayuda a incrementar el área superficial de contacto entre la fruta y los microorganismos, lo que permite una mayor asimilación bacteriana alcanzando una mayor producción de biogás.

Los desechos de fruta utilizados se muestran en la Figura 3.1 y corresponden a desechos del proceso de producción de pulpa de naranjilla.



Figura 3.1: Desechos de naranjilla a procesar en la planta

### 3.2 *Parámetros operacionales y cálculos*

El control de los parámetros operacionales dentro de la planta es uno de los pasos más importantes dentro del arranque, ya que se podrá conocer cómo se está llevando a cabo el proceso y si se están manteniendo los parámetros dentro de las condiciones óptimas para la digestión anaerobia. Los principales parámetros se muestran a continuación.

#### 3.2.1 *Carga orgánica diaria*

La carga orgánica diaria es uno de los parámetros operacionales importantes durante el arranque y la operación regular de la planta; y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$C.O = \frac{\dot{m} * c}{V_R} \left[ \frac{kg DQO}{m^3 d} \right]$$

Ec. 3.1

Dónde:

C.O es la carga orgánica	[kg/d*m <sup>3</sup> ]
$\dot{m}$ masa del sustrato alimentada por unidad de tiempo	[kg/d]
c concentración de demanda química de oxígeno de la materia orgánica DQO/m <sup>3</sup>	[kg
$V_R$ volumen de reacción	[m <sup>3</sup> ]

### 3.2.2 Tiempo de retención hidráulica

Uno de los parámetros más importantes a considerar durante el arranque de la planta es el tiempo de retención hidráulico ya que permite conocer el tiempo que la mezcla reactiva permanece en el digestor. Se puede calcular a partir de la carga orgánica y el volumen de reacción mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{V}{\dot{V}} = \frac{V}{\frac{\dot{m}}{\rho}} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Dónde:

$\tau$ es el tiempo de retención hidráulica	[d]
$\dot{V}$ es la carga orgánica	[m <sup>3</sup> /d]
V volumen del líquido en el digestor	[m <sup>3</sup> ]
$\dot{m}$ masa del sustrato alimentada por unidad de tiempo	[kg/d]
$\rho$ densidad de la alimentación	[kg/m <sup>3</sup> ]

### 3.3 Caracterización de materia prima, mezcla reactiva y productos finales

Así como se lleva un estricto control de los parámetros operacionales del biodigestor es necesario también un control del proceso en general. Es decir, conocer si dentro del

biodigestor se está realizando el proceso de degradación ya que pueden existir diferentes factores que afecten el proceso de digestión anaerobia y por ende dificulten la producción de biogás o a su vez, exista una menor calidad en el mismo.

### 3.3.1 pH

El pH permite caracterizar el estado y funcionamiento del proceso de digestión. Este valor se debe mantener un rango de 6,5 a 7,5 lo que permite un ambiente óptimo para las bacterias metanogénicas. En el caso de que existiera un pH menor indicaría que la proporción de fermentación acidogénica es menor a lo óptimo lo que por ende lleva a un exceso de ácidos grasos a metabolizar por las bacterias metanogénicas generando un descenso en el pH.

Es por esto, que se requiere un estricto control de pH tanto de la alimentación como de la mezcla reactiva dentro del biodigestor por lo que diariamente, como parte de la operación regular de la planta, se toman muestras para medir el pH. La medición de pH se la realizan utilizando un electrodo de pH de la marca Hanna modelo HI 8424 cuya figura se muestra a continuación.



Figura 3.2: Medidor de pH

### 3.3.2 Producción y calidad de biogás

Los valores medidos en el contador de gases muestran la cantidad de gas producida durante el intervalo de tiempo que se ha tomado en cuenta. Adicionalmente, es muy importante la caracterización del mismo, ya que, al ser el metano el componente más importante, debe ser cuantificado para su posible aprovechamiento por lo que se realizan dos pruebas para denotar su presencia.

La primera consiste en una prueba cualitativa donde se expone una muestra de biogás tomado con una jeringuilla a combustión, con lo que si se observara una llama de color azul indicaría la presencia de metano. Este análisis se muestra en la Figura 3.3



Figura 3.3: Prueba cualitativa de biogás

El segundo análisis que se realiza al biogás es un análisis del tipo cuantitativo el que se utiliza para cuantificar el porcentaje de metano en el biogás producido. El método de análisis se detalla en el anexo 8.2.1

Para que un biogás sea considerado un buen combustible debe contener al menos 50% de metano. En la Figura 3.4 se observa cómo se lleva a cabo el experimento para determinar el porcentaje de metano en una muestra de biogás.



Figura 3.4: Prueba cuantitativa de metano

### 3.3.3 Demanda Química de Oxígeno

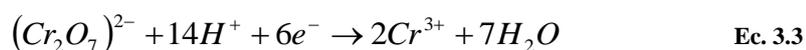
La demanda química de oxígeno (DQO) es una medida de la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación de materiales orgánicos e inorgánicos presentes en un fluido y se expresa en [mg/L] (22). Es así que en fluidos donde no se tenga presente gran cantidad de compuestos inorgánicos oxidables, la DQO puede utilizarse como un parámetro para medir la cantidad de materia orgánica degradable dentro de una muestra líquida.

Utilizando el manual de procedimiento incluido en el colorímetro marca Hach se logra determinar la DQO al utilizar un agente fuertemente oxidante como lo es el dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) en un medio ácido durante dos horas a una temperatura de  $150^{\circ}C$ . El dicromato oxidará toda la materia orgánica y este cambio se medirá mediante el cambio en la absorbancia del dicromato medido en un colorímetro que automáticamente relaciona el cambio en la absorbancia con la DQO.



Figura 3.5: (a) Digestor Hach. (b) Colorímetro Hach

La ecuación iónica neta para la reacción de oxidación de dicromato en medio ácido está descrita a continuación:



Al utilizar este parámetro se puede fácilmente calcular la cantidad de materia orgánica degradada durante el proceso de digestión anaerobia. Para este fin, se tomaron muestras diarias tanto de la alimentación como de la mezcla reactiva dentro del digestor para determinar la cantidad de materia orgánica que se degrada diariamente en  $[mg_{DQO}/L]$ . Es importante mencionar que el parámetro, si bien indica la degradación de materia orgánica, no indica si la materia orgánica degradada sirvió exclusivamente para la generación de biogás. El procedimiento de análisis de DQO utilizando el colorímetro Hach se muestra en el Anexo 8.2.1.

### 3.3.4 Sólidos Totales (TS)

La medida de sólidos totales permite conocer la cantidad de sólidos presentes en un afluente líquido. Dentro del biodigestor el porcentaje de sólidos se debe encontrar entre 7 al 9% debido a la gran cantidad de sólidos en las materias primas y también se establece que el estiércol alimentado se debe encontrar en un rango de 2 al 10% de sólidos totales (23). Debido a esto se ve la necesidad de diluir tanto fruta como estiércol para posicionar la materia prima a ser alimentada dentro de los parámetros óptimos de sólidos totales.

Al poseer menor cantidad de sólidos totales se tendrá una mayor área de contacto entre la superficie de la materia orgánica y las bacterias. Se ha analizado que la

cantidad óptima de sólidos llevará a la maximización en la producción de biogás. Otra de las razones por las que no se desea mantener un porcentaje de sólidos alto es debido a que se puede producir taponamiento en todo el sistema de transporte del fluido dentro del proceso, por lo que se prefiere trabajar en el rango de operación ya mencionado.

Para el análisis del porcentaje de sólidos totales se utiliza el método descrito en el Anexo 8.2.3.

### 3.3.5 Sólidos Orgánicos totales (OTS)

La estimación del valor de sólidos orgánicos totales se la hace con el fin de determinar dentro de los sólidos totales, qué porcentaje corresponde a materia orgánica, la cual puede ser accesible a degradación bacteriana.

Tomando en cuenta que no todos los sólidos son orgánicos es importante conocer el porcentaje de sólidos totales con el fin de entender qué cantidad de los sólidos presentes en una muestra pueden actuar dentro del proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás. Una muestra en la que la mayor cantidad de sólidos presentes corresponda a sólidos orgánicos indica que la mayoría de estos pueden ser degradados y así existiría una mayor producción de biogás comparada con una muestra que contenga bajo contenido de sólidos orgánicos totales.

El procedimiento de análisis de sólidos orgánicos totales se muestra en el Anexo 8.2.3 y los equipos utilizados para el análisis se muestran en la Figura 3.6



Figura 3.6: (a) Estufa (b) Mufla

### **3.3.6 Sólidos totales suspendidos (TSS) y sólidos volátiles suspendidos (VSS)**

Los sólidos totales suspendidos indican la cantidad de sólidos retenidos al utilizar un filtro de fibra de vidrio (23). En la práctica, para este análisis, se toma un volumen de muestra determinado, se lo centrifuga y se toma solamente el sobrenadante que se obtiene. Después de secar el sobrenadante se obtiene en [mg/L] el valor de los sólidos totales suspendidos.

Al tomar en cuenta que no todos los sólidos suspendidos corresponden a materia orgánica, es importante el análisis de los sólidos volátiles suspendidos en el proceso de digestión anaerobia ya que corresponden a la fracción orgánica de sólidos suspendidos y nos permiten conocer la cantidad de biomasa presente dentro del reactor, es decir cómo varía la formación de colonias bacterianas en el digestor (24).

El método explícito de análisis se muestra en el anexo 8.2.4. Para el análisis de sólidos, cualquiera que sea el caso, se utilizaba una estufa de marca Presicion a 105°C y una mufla de marca Thermo Scientific a 550°C, equipos que se muestran en la Figura 3.6.

### **3.3.7 Alcalinidad**

Si bien dentro de la operación regular de la planta se mide pH como indicador de los iones hidronio presentes en las muestras tomadas, este análisis no es suficiente, ya que no indica una medida de los demás iones alcalinos presentes dentro de la muestra, es por esto que se debe medir también la alcalinidad.

La alcalinidad está definida como la capacidad que tiene una muestra líquida para aceptar protones o también se la puede definir como la capacidad de un fluido de neutralizar ácidos presentes. Los bicarbonatos y carbonatos son los principales iones tomados en cuenta dentro de este análisis ya que actúan dentro de los efluentes como buffer regulando los cambios de pH dentro de la muestra (24).

Si existe una alcalinidad menor a 80ppm la capacidad buffer dentro del reactor será pequeña, por lo que existirán grandes fluctuaciones de pH (24). Es así, que una cantidad de alcalinidad considerable es importante en el reactor para prevenir los cambios bruscos de pH, los cuales pueden afectar fuertemente el comportamiento y metabolismo bacteriano lo cual influye en la cantidad y calidad del biogás obtenido.

El método para el análisis de alcalinidad se muestra en el Anexo 8.2.5

### 3.3.8 Ácidos grasos volátiles (AGV)

La estabilidad del proceso de digestión anaerobia se ve reflejada en la concentración de productos intermedios del metabolismo bacteriano como los son los ácidos grasos volátiles. Los AGV comprenden compuestos tales como ácido acético, propionico, butírico, láctico, entre otros; los cuales son cadenas de ácidos orgánicos de dos a seis carbonos y se producen durante la etapa de acidogénesis dentro del proceso de digestión. El término “volátil” se refiere a que son fácilmente recuperables mediante destilación atmosférica sin recurrir a altas temperaturas (7).

En muchos de los casos, cuando la relación simbiótica entre acidogénesis y metanogénesis se rompe existe inestabilidad en el proceso de digestión lo que ocasiona una acumulación de AGVs dentro del digestor y por ende, al ser ácidos, producen una caída en el pH. Es importante tomar en cuenta, que debido a la capacidad buffer del digestor puede existir cierta acumulación de AGVs sin que exista mayor problema en cuanto al descenso de pH. Es por esto que se ha tomado en consideración que para que se pueda detectar una acumulación de AGVs mostrado por un descenso significativo de pH debe existir una concentración muy alta de estos compuestos lo que indicará que el proceso metanogénico ya se vio inhibido fuertemente mucho antes que se mostrara un descenso de pH (14).

Para que un sistema anaeróbico actúe en condiciones óptimas se ha mostrado que el valor de AGV debe ser bajo, oscilando generalmente en el rango de 50 a 250 [mg<sub>AGV</sub>/L], es por esto que el control de este parámetro es muy importante para denotar un procedimiento óptimo de digestión o corregir posibles problemas que puedan estar llevando a la baja producción de biogás debido a la acumulación de AGVs. El procedimiento para determinar la cantidad de Ácidos Grasos Volátiles se muestra en el Anexo 8.2.6.

La relación óptima entre alcalinidad y AGVs debe encontrarse entre 1 y 2. Si existen valores mayores habrá un ascenso en el pH del reactor mientras que valores menores indican que habrá acumulación de AGVs produciendo un descenso en el pH del digestor (21).

## **4 Diseño del Proceso de digestión anaerobia de desechos de fruta en Latinoamericana de Jugos S.A.**

El proceso de digestión anaerobia de desechos de fruta en Latinoamericana de Jugos S.A. consta de cuatro etapas. La primera etapa es la preparación de la alimentación que es preparada mediante la adición de fruta y estiércol triturados con agua para después ser tamizada. La segunda etapa es la digestión donde se alimenta al reactor el cual se mantiene caliente mediante el intercambiador de calor. La tercera etapa es el post- tratamiento del biogás generado y la cuarta fase es el post- tratamiento del biol generado. El proceso se puede observar en la Figura 4.1.

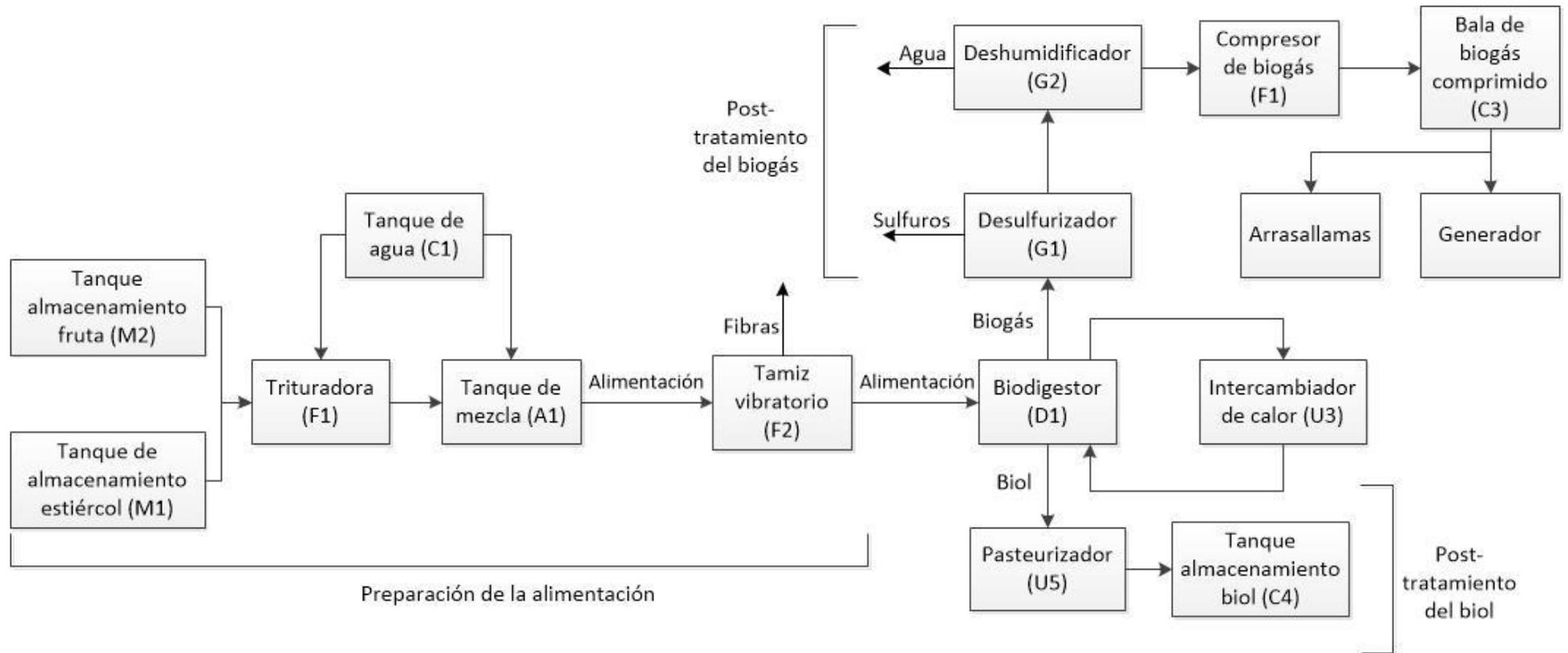


Figura 4.1: Diagrama de bloque de la planta de digestión anaerobia

#### **4.1 Biodigestor a escala semi-industrial ubicado en Latinoamericana de Jugos S.A**

Este proyecto de tesis consiste en el acompañamiento durante el arranque de la planta de digestión anaerobia ubicada en el predio de Latinoamericana de Jugos S.A. El biodigestor es el corazón del proceso de digestión anaerobio y debe cumplir con los requerimientos principales para el óptimo funcionamiento de un biodigestor anaerobio, las cuales implican hermeticidad para evitar el ingreso de oxígeno y su afectación al proceso metanogénico. El biogás y bio-fertilizante producidos serán utilizados, caracterizados y comercializados dentro de la empresa.

El biodigestor utilizado para el primer periodo de estudio fue construido en el año 2012 y fue instalado durante el mes de agosto del año en mención. Posteriormente, el segundo periodo de estudio que inicia en el mes de mayo de 2013 se utilizó un segundo biodigestor que se construyó debido a fallas en el primero, cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 4.1

**Tabla 4.1: Características de ambos biodigestores**

<b>Característica</b>	<b>Medida</b>
Altura total (sin patas)	5,30 m
Diámetro	2,7 m
Diámetro de manholes	0,5 m
Volumen total	30,3 m <sup>3</sup>

Las diferencias principales entre los dos biodigestores radican en que el segundo fue construido en lámina de acero inoxidable AISI 304 de 3,5mm mientras que el primero fue construido en lámina de acero inoxidable AISI 304 de 3mm. Otra característica diferente fue la implementación de un costillar de refuerzo en acero inoxidable cada 60 cm en el segundo reactor. Finalmente la forma de las tapas se varió de cónica en el primero a torresférica en el segundo, dando así mayor resistencia a cambios de presión en el segundo biodigestor.

El biodigestor ubicado en Latinoamericana de Jugos S.A trabaja con un sistema de carga semi-continua, es decir se alimenta y descarga diariamente un volumen similar de alimentación y producto, respectivamente. Lo que garantiza que el volumen de líquido dentro del mismo se mantenga constante y a niveles de operación.

El volumen total del biodigestor es 30,3 m<sup>3</sup>. Pero se debe tomar en cuenta que para garantizar la existencia de un espacio de almacenamiento y retención de biogás, se trabaja un volumen de mezcla reactiva 22 a 25 m<sup>3</sup>. La alimentación del biodigestor se da mediante un anillo perimetral alrededor del cilindro con seis entradas, lo cual permite una alimentación homogénea. La salida del biodigestor se encuentra lateral a

una altura aproximada de 4m desde la base del cilindro. La salida de biogás está construida en la parte superior y se conecta a un sistema de almacenamiento y post-tratamiento del biogás. El reactor posee una chaqueta de aislamiento que evita pérdidas significativas de calor en el proceso y esta consiste en una capa de aproximadamente 3mm de poliuretano.

En cuanto al manejo de la biomasa alimentada se puede clasificar al digestor como de filtro anaeróbico de flujo ascendente, donde la alimentación ingresa por la zona inferior y atraviesa una estructura fija de relleno que puede constar de varios materiales entre los que se encuentran plástico, pedazos de cerámica, entre otros. En el caso del reactor utilizado para este estudio, se utilizaron conos de PVC que se muestran en la Figura 4.2. La implementación de un lecho permite mejorar el área superficial de contacto lo que favorece el crecimiento de la película bacteriana, la cual será más resistente a tóxicos debido a la formación de flóculos bacterianos y también permitirá el procesamiento de una mayor carga orgánica (7).



Figura 4.2: Relleno del biodigestor

## **4.2 Proceso de operación de la planta semi-industrial de digestión anaerobia ubicada en “Latinoamericana de Jugos S.A”**

### **4.2.1 Almacenamiento de la materia prima y reducción de tamaño**

Para la reducción de tamaño de partícula se toman los desechos de fruta tal cual salen del proceso de producción de pulpa y se los almacena en el tanque de almacenamiento de fruta, donde posteriormente pasan por un proceso de trituración alimentándose mediante un tornillo sinfín, los cuales se muestran en la Figura 4.3.



**Figura 4.3: (a) Tanque de almacenamiento de fruta y estércol. (b) Tornillo sinfín de transporte**

La reducción de tamaño de partícula se da en la trituradora y en el picador que se muestran en la Figura 4.4. El ingreso del material a triturarse es por la parte superior y es alimentado directamente desde el tornillo transportador que mueve la fruta ubicada en el tanque de almacenamiento de fruta y las bases inclinadas permiten que el material se deslice directamente en las muelas del triturador, las cuales giran sobre dos ejes de rotación. Posteriormente el material pasa a una picadora la cual consta de cuatro cuchillas que rotan verticalmente separadas a una distancia de 2mm. En la Figura 4.4 (a) se muestra el equipo completo de reducción de tamaño de partícula y en la misma figura en la sección (b) se muestra el triturador.



**Figura 4.4: (a) Equipo completo de reducción de tamaño (b) triturador**

Los motores tanto para la trituradora como para la picadora son motores de 4 polos trifásicos de 60Hz marca VOGES modelo 100La con una potencia de 4HP y que rinden el 83%, los cuales se muestran en la Figura 4.5.



**Figura 4.5: Motor VOGES para trituradora y picador**

En el caso del estiércol, también es depositado en un tanque de almacenamiento y, posteriormente, transportado a través del tornillo para caer directamente en las muelas de la trituradora. Es importante mencionar que el estiércol que va a ser alimentado al proceso de digestión anaerobia debe ser fresco con el fin de evitar la pérdida de nutrientes debido a evaporación.

Fruta y estiércol triturados pasan a un tanque de homogeneización, donde se adiciona un volumen de agua determinado, con el fin de diluir las dos materias primas y conseguir una mezcla de alimentación homogénea.

Es importante recalcar que el proceso de alimentación al reactor se ha dado de manera sistemática. Es decir para el proceso de operación regular de la planta se determinó, mediante estudios previos y análisis bibliográfico que la relación entre fruta y estiércol debe ser 4 a 1. La fracción volumétrica de agua debe mantenerse menor a 0,5 en la mezcla de alimentación.

#### **4.2.2 Proceso de alimentación**

El proceso de alimentación comienza con la mezcla homogénea entre fruta y estiércol triturados y diluidos con agua. Este proceso se realiza en un tanque de homogeneización construido en acero inoxidable lámina AISI 304 de 3mm, con un volumen de  $2,9\text{m}^3$  y tapa para evitar malos olores y contaminación. El tanque de alimentación se muestra en la Figura 4.6 (a).

Además, posee un agitador interno que gira mediante un motor a 900 rpm. El agitador consta de una serie de paletas que, al tener cierto ángulo, crearán un efecto embudo evitando la sedimentación de partículas en el fondo del tanque durante el proceso de alimentación, este se muestra en la Figura 4.6 (b).



**Figura 4.6: (a) Tanque de homogeneización (b) Agitador**

Dentro del tanque de alimentación se tomará una muestra y se medirá el pH, esto con el fin de decidir si se agrega algún tipo de aditivo para mantener el rango de pH dentro del digestor.

Una vez homogeneizada la muestra, medido el pH y colocado el aditivo, en caso de ser necesario, se procede al bombeo de la mezcla de alimentación hacia el tanque tamizador. Este proceso se lo realiza mediante una bomba sumergible para lodos marca Goulds serie WS\_BHF con potencia de 2 HP que gira a 3500 rpm construida en hierro fundido que se muestra en la Figura 4.7.



**Figura 4.7: Bomba sumergible GOULDS**

La mezcla de alimentación homogénea es bombeada hacia un tamiz vibratorio ubicado en el extremo superior de un tanque de recolección de filtrado, mediante una tubería de 2" utilizando una ducha en forma de mano. La ducha permite el flujo de la mezcla a lo largo del tamiz ayudándose por la vibración del mismo. La vibración se obtiene al utilizar un motor excéntrico con capacidad de 4HP y los sólidos que no pasen el tamiz serán recogidos por gravedad en un tanque adicional o de forma manual por el extremo superior del tamiz vibratorio que se muestra en la Figura 4.8



**Figura 4.8: Tamiz vibratorio**

Después de tamizada la mezcla esta es almacenada en un tanque cilíndrico construido en acero inoxidable lámina AISI 304 de 3mm de espesor con capacidad de 2.1 m<sup>3</sup> con base cónica que evita la acumulación de sólidos como se muestra en la Figura 4.9.



**Figura 4.9: Tamiz vibratorio con tanque**

La alimentación ya filtrada se transporta hacia el biodigestor. Para este proceso se usa una bomba sumergible para lodos marca Goulds serie WS\_BHF con potencia de 1 HP que gira a 3500 rpm construida en hierro fundido la cual transportará el contenido del tanque hacia el reactor mediante un sistema de válvulas y tuberías que evitan el regreso del volumen alimentado del digestor hacia el tanque producido por efectos de gravedad.

Tomando en cuenta el volumen total que ingresa al digestor, se debe extraer previamente el mismo volumen de biol del sistema. Este proceso es realizado con el fin de mantener el nivel dentro del reactor constante evitando problemas en el proceso de recirculación. El proceso de extracción del biol se realiza por la salida inferior del biodigestor, la cual consta de una tubería de 4 pulgadas y pasa hacia una bomba reciprocante de desplazamiento positivo de accionar neumático marca Versa-Matic, la cual transportará el biol a través del estabilizador y será almacenado en el tanque de almacenamiento de biol, el cual se muestra en la Figura 4.10.



**Figura 4.10: Tanque almacenamiento de biol**

Una vez extraído el volumen de biol e introducida la mezcla de alimentación se procede a recircular el líquido dentro del digestor. Para este proceso se utiliza una bomba recíproca de desplazamiento positivo de diafragma marca Versa-Matic, la cual es accionada neumáticamente utilizando aire comprimido. La capacidad de la bomba es 2HP y la velocidad de flujo es regulada mediante una válvula que controla el flujo de aire hacia la bomba como se muestra en la Figura 4.11



**Figura 4.11: Bomba de diafragma para recirculación**

El sistema de recirculación bombea desde la salida superior de la mezcla reactiva en el biodigestor atravesando la bomba hacia un intercambiador de calor que permitirá el control de temperatura dentro del reactor y regresando por la alimentación a través del anillo perimetral con 6 entradas, como se muestra en la Figura 4.12.



**Figura 4.12: Anillo perimetral de alimentación**

Una vez concluido el proceso de alimentación se debe tomar el valor del contador de gas, el cual indicará la producción en cierto intervalo de tiempo de biogás, el intervalo de toma del valor del contador se fijó en un día por lo que la medición de este valor se realizaba a la misma hora durante el estudio.

### 4.2.3 Tratamiento del biogás

El biogás generado en el proceso de digestión anaerobia debe aprovecharse energéticamente, ya que es el producto principal de la digestión anaerobia. Es por esto que se requiere que éste tenga una buena calidad lo que garantiza un óptimo funcionamiento de los equipos del sistema de gas. Uno de los parámetros más importantes de calidad del biogás es la cantidad de metano, ya que este es el recurso energéticamente valioso.

Para la salida y recolección de biogás en la planta existe una tubería de salida en la tapa superior del biodigestor por donde el biogás circula a través de una tubería para su posterior almacenamiento o tratamiento. Al principio de la tubería de salida del biogás existe una válvula de bola la cual permite comprobar la producción de biogás, ya que al cerrarla se acumulará el biogás y subirá la presión dentro del biodigestor y se mide con un manómetro que se encuentra instalado en la tapa superior del reactor.



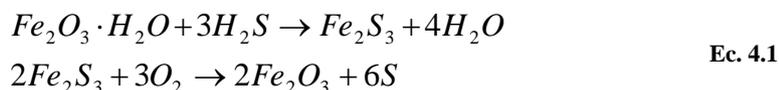
**Figura 4.13: Salida de biogás.**

El biogás generado en el digestor debe pasar por dos procesos de post- tratamiento antes de pasar por el contador de gas el cual servirá para cuantificar la cantidad de gas producido durante el periodo de tiempo de 24 horas.

Los dos procesos de post – tratamiento que se deben realizar al biogás son la remoción de ácido sulfhídrico y la remoción de agua, ambos procesos con el fin de evitar corrosión en los equipos y tuberías por las que circule el biogás.

Como se menciona previamente, el ácido sulfhídrico se debe remover para prevenir la corrosión en equipos donde se utilice biogás como combustible ya que este compuesto es venenoso, tiene mal olor y es un poderoso agente corrosivo (7). Para la eliminación de este compuesto en la planta semi-industrial de digestión anaerobia ubicada en Latinoamericana de Jugos S.A se utiliza un filtro de flujo descendente relleno con limalla de hierro. El filtro está construido en acero inoxidable lámina AISI 304 de 3mm de espesor y tiene un diámetro de 20 cm con una altura de 60 cm.

El hierro se ve sometido a un proceso de oxidación mediante las reacciones que se muestran a continuación



El biogás que sale del digestor está saturado con vapor de agua por lo que al enfriarse y condensarse en las tuberías puede ocasionar taponamiento.

Es por esto, que se ha visto la necesidad de instalar las tuberías con una pendiente de al menos 1° y que conduzca hacia un recipiente conocido como trampa de agua donde ésta es almacenada y eliminada del proceso.

El carbón activado dentro de un segundo filtro de flujo ascendente también ayuda a que las moléculas de ácido que no fueron removidas en el proceso de remoción de ácido sulfhídrico se adhieran a la superficie del carbón y así también ayudar a la desodorización del biogás. El segundo filtro tiene un diámetro de 20 cm y una altura de 50 cm, está construido en acero inoxidable lámina AISI 304 DE 3mm de espesor.

En la figura siguiente se observa el sistema completo de pre-tratamiento del biogás generado en el proceso y también el contador de gas.



**Figura 4.14: Sistema de pre-tratamiento de biogás**

Después del proceso de tratamiento de biogás y antes de su almacenamiento pasa por el contador de gas de marca Keuk Dong Ki Jeon modelo G1.6 el cual está diseñado para trabajar con gas licuado de petróleo así como con gas natural soporta una presión máxima de 10 kPa con un caudal máximo es 2,5 m<sup>3</sup>/h y mínimo de 0,016 m<sup>3</sup>/h (25). Mediante el uso de este instrumento que se muestra en la Figura 4.15 se logra tener un dato exacto de la cantidad de biogás producido en un día.



**Figura 4.15: Contador de gases (25)**

Para el almacenamiento del gas generado se utilizan dos sistemas. El primero consiste en un gasómetro el cual se encuentra dentro de un tanque pulmón de acero inoxidable

lámina AISI 304 de 3mm de espesor el cual posee una serie de sensores que accionan dos válvulas automáticas: la primera que obstruye el paso de biogás hacia el gasómetro y la segunda, que habilita el paso del biogás hacia el compresor. El tanque pulmón se muestra en la Figura 4.16.



**Figura 4.16:** Tanque pulmón de almacenamiento de biogás

El gasómetro que se encuentra dentro del tanque pulmón está construido en poliuretano y se lo puede observar en la Figura 4.17.



**Figura 4.17:** Gasómetro lleno

Después de ser comprimido el biogás se almacena en una bala de almacenamiento de gas, la cual está construida en acero inoxidable de lámina AISI 304 de 4mm de espesor con tapas semiesféricas y un manómetro que permite la medición de la

presión con lo cual se logra cuantificar la cantidad de biogás ingresada. El volumen del recipiente es de 8.3 m<sup>3</sup> y se lo puede observar en la Figura 4.18.



**Figura 4.18: Bala de almacenamiento de biogás a presión**

Debido al potencial energético del metano presente en el biogás se lo utiliza para la generación de energía. En el caso de la planta de digestión anaerobia ubicada en Latinoamérica de Jugos S.A el biogás generado tiene dos fines principales. El primero es la generación eléctrica para sustentar las necesidades energéticas propias de la planta, por lo que se instaló un generador de marca Eastern Tools & Equipment, Inc. (ETQ) modelo PG30P11 que funciona con biogás a presiones entre 0,2 y 0,7 MPa. El generador tiene un motor de una fase con una frecuencia de 60 Hz y puede generar una corriente de hasta 20 Amperios a 120 V, el generador se muestra en la figura siguiente.



Figura 4.19: Generador eléctrico

El segundo uso que se le puede dar al biogás producido es en el sistema de calentamiento ya que se puede utilizar el gas como combustible para calentar el agua que posteriormente fluirá por el intercambiador de calor utilizando el calefón y el calderín y para mantener la temperatura requerida en el digester así como también para estabilizar el biol generado. Es así, que el biogás se utiliza como fuente de energía térmica para el proceso de digestión anaerobia.

#### 4.2.4 Tratamiento del bio - fertilizante

Bajo condiciones anaerobias no existe presencia de bacterias patógenas como lo son *Escherichia Coli* o cualquier tipo de coliformes, con lo que se garantizaría que la calidad del biol fresco sea óptima para su uso en cultivos. Sin embargo, si no se puede garantizar una digestión anaerobia completa y al tener la necesidad de almacenar el biol obtenido para su utilización posterior, es necesario un proceso de estabilización con calor para evitar la formación de colonias bacterianas patógenas.

Según EPA, existen dos clasificaciones principales de bio-fertilizantes de acuerdo al uso que se va a dar: el fertilizante de clase A que se utiliza para jardines y pastos el cual debe tener una cantidad de coliformes fecales menor a 1000 UFC (Unidades Formadoras de colonias)/g mientras que en el caso del fertilizante de clase B que se usa principalmente para bosques y tierras de cultivo se permite una cantidad de coliformes que no exceda  $2 \cdot 10^6$  UFC/g (26).

Para la estabilización del biol generado se lo hace pasar por un intercambiador de calor de tubo y carcasa. Dentro de este equipo la temperatura debe llegar a  $70^{\circ}\text{C}$  con lo que se garantiza la eliminación de las colonias bacterianas patógenas las cuales son muy sensibles a las altas temperaturas sin que exista afectación alguna en las

propiedades del biol. La Figura 4.20 muestra el intercambiador de calor de tubo y carcasa utilizado para la estabilización del biol.



**Figura 4.20: Estabilizador de biol**

Por otra parte, para evitar la contaminación del biol estabilizado es necesario seguir ciertas normas de aseo entre las que se encuentra la exclusividad en el uso de los utensilios para el manejo del biol. Otro factor importante es la limpieza de los recipientes en los que se almacene biol, ya que puede existir contaminación cruzada. Es importante manejar recipientes exclusivos para biol, los cuales no hayan tenido contacto con estiércol bovino. Los recipientes de almacenamiento de biol serán canecas de diferentes volúmenes de acuerdo al uso que se quiera dar al biofertilizante.

### **4.3 Control de la operación de la planta**

Durante el proceso de digestión anaerobia se deben controlar diferentes parámetros para la optimización del proceso de generación metanogénica. Los parámetros más importantes que se deben controlar son la temperatura, el pH, el nivel en los tanques y la presión.

### 4.3.1 Control de temperatura

Debido a los procesos metabólicos de las bacterias presentes en el digester la temperatura adecuada beneficia la degradación de los sustratos tanto animal como vegetal. Pero mantener temperaturas altas genera un costo energético importante, por lo que se decide trabajar en el rango mesofílico, es decir entre 25 y 45°C. La temperatura debe mantenerse durante la operación lo más estable posible favoreciendo así la actividad bacteriana y la producción de biogás. Si no se mantiene el valor de temperatura estable los microorganismos no podrán degradar apropiadamente la materia orgánica disponible para la generación metanogénica (7).

Dentro de la planta semi – industrial ubicada en Latinoamérica de Jugos S.A existe un intercambiador de calor el cual regula la temperatura a 35°C dentro del digester. Este intercambiador es del tipo tubo y carcasa, en el cual por la tubería interna circula el material a calentarse y por la tubería exterior circula agua caliente que proveerá calor a la mezcla recirculada.



Figura 4.21: Intercambiador de calor

Para el proceso de calentamiento del agua para el intercambiador de calor se utiliza un sistema de calefón y calderín el cual se operó con gas licuado de petróleo, durante el arranque. Esto permite el calentamiento del agua que pasará a través de la carcasa del intercambiador transfiriendo energía térmica al fluido del digester que atraviesa los tubos internos. En la Figura 4.22 se puede observar el sistema, el cual es accionado mediante un switch que encenderá la chispa de la llama del calderín y un segundo switch que encenderá la bomba de agua de desplazamiento positivo con una potencia

de ½ HP la cual permitirá la circulación de agua caliente por la carcasa del intercambiador de calor.



**Figura 4.22: Calefón y calderín**

Es importante tomar en cuenta que las tuberías por donde circule el agua caliente y el intercambiador de calor deben ser aisladas, para lo que se utilizó mantas de lana de vidrio que minimizan la pérdida de calor del sistema hacia los alrededores.

Los segmentos de la planta que requieren estricto control de temperatura están equipados con medidores de temperatura analógicos o digitales para controlar que no existan fluctuaciones en la temperatura dentro del proceso. Las secciones que están equipadas con un medidor de temperatura son: el calderín, la tubería de retorno del agua desde el intercambiador de calor hacia el calefón, el biodigestor y el estabilizador de biol. El medidor de temperatura analógico que se encuentra instalado se muestra en la Figura 4.23.



**Figura 4.23: Medidor de temperatura analógico**

Solamente en el digestor, aparte del medidor de temperatura analógico, se encuentra instalado un sensor que permite que cuando hayan temperaturas bajas dentro del reactor se inicie el ciclo de calentamiento e intercambio de calor para contrarrestar la caída de temperatura que se ha dado.

#### **4.3.2 Control de nivel**

Otro parámetro importante que se debe medir y vigilar durante la operación regular de la planta es el nivel de líquido en los diferentes tanques ya que permite conocer los volúmenes que se manejan en la operación.

La medición de nivel dentro del digestor se realiza, tanto de manera automática como de manera manual. El control de nivel automático consta de un sensor de nivel ultrasónico de marca Flowline modelo LU30 ubicado en la tapa superior del biodigestor y permite una visualización de la distancia que existe entre la base del sensor y la altura del líquido con lo que, tomando en cuenta la altura total y el diámetro del reactor, se puede fácilmente obtener el volumen y el nivel de líquido dentro del mismo. El sensor de nivel se muestra en la Figura 4.24.



**Figura 4.24: Sensor de nivel Flowline**

Adicionalmente, el digester consta de un sistema de tubos comunicantes en los que se ha instalado un medidor de nivel visual, que permite observar mediante una manguera translúcida claramente si el nivel de líquido dentro del biodigestor se encuentra dentro de las condiciones de operación óptimas o se encuentra bajo o alto, lo que permite fácilmente la regulación por parte del operador del nivel del digester. En la Figura 4.25 se observa el medidor de nivel visual.



**Figura 4.25: Medidor de nivel visual**

Existen varios otros tanques donde se encuentran instalados sensores de nivel que permiten el control de volumen en los tanques. Entre los que encontramos el tanque de homogenización (A1) donde el control de nivel permite conocer el volumen de estiércol, fruta y agua que se alimenta. En el tanque donde se encuentra el tamiz vibratorio (F2) también hay un sensor de nivel que permite saber el volumen real de alimentación sin fibras al digestor. El tanque de almacenamiento de biol (C4) también posee un sensor, que permite saber la cantidad de fertilizante que se removi6 del digestor y que debe ser igual al volumen de alimentación. En el tanque pulm6n tambi6n es importante el control de nivel ya que ah6 se almacenar6 el biog6s generado y cuando el nivel es m6nimo existe una electrov6lvula que permite la entrada del biog6s al tanque pulm6n, espec6ficamente al gas6metro. Y cuando el nivel es m6ximo se acciona otra electrov6lvula que permite el paso del gas hacia el compresor y posteriormente hacia la bala de almacenamiento de biog6s comprimido.

### **4.3.3 Control de presi6n**

La digesti6n anaerobia es un proceso que requiere de tanques herm6ticos para evitar la presencia de ox6geno en el digestor, por lo que la medici6n de presi6n es uno de los par6metros m6s importantes ya que ayuda a evitar problemas de deformaciones en los recipientes cerrados.

Es por esto que se han colocado medidores de presi6n anal6gicos en el reactor, el calder6n y la bala de almacenamiento de biog6s comprimido, ya que son secciones muy susceptibles a variaciones de presi6n. Los medidores de presi6n anal6gicos que se han instalado se muestran en la Figura 4.26.



**Figura 4.26: Medidor de presión analógico**

Asimismo, en el reactor se instaló un sensor de presión que envía datos continuos al sistema de control para poder evitar fluctuaciones de presión dentro del reactor que podrían dar lugar a deformaciones en este tanque.

#### **4.3.4 Control de pH**

Para la regulación del pH dentro del digestor existe un sistema de control automático que está constituido por un electrodo de pH ubicado en la línea de recirculación y dos bombas: una para solución ácida y otra para solución básica. Cuando el electrodo envía la señal que el pH se encuentra sobre el nivel establecido (6.5 - 7.5) se activa el sistema de bombeo de solución ácida, mientras que en el caso que el pH se encuentre por debajo del rango operacional se encenderá la bomba de solución básica que estabilice el nivel de pH dentro del digestor. El sistema de control de pH se muestra en la Figura 4.27.



**Figura 4.27: Sistema de control automático de pH**

Es importante mencionar que la materia orgánica vegetal utilizada para este proceso es fruta, la cual posee un pH ácido, mientras que el estiércol que es la materia orgánica animal posee un pH ligeramente básico, lo que permitiría suponer que al alimentar una proporción mayor de fruta con respecto al estiércol existirá un descenso de pH dentro del digestor, lo cual es en sí uno de los parámetros que más control requiere dentro del proceso.

La actividad bacteriana en sí permite la regulación del pH dentro del digestor ya que el dióxido de carbono actúa como buffer dentro del mismo. Pero al existir cargas orgánicas altas, la capacidad tamponante del reactor no es suficiente, por lo que se requiere un sistema de control automático de pH o, a su vez, la adición de agentes que regulen el pH.

Debido a que generalmente los problemas de pH se basan en un pH ácido se agregan soluciones de hidróxido de sodio, o sino cal viva o apagada, las cuales son polvos blancos que contienen hidróxido de calcio o carbonato de calcio. La presencia de iones hidróxido o carbonato ayuda al consumo de iones hidronio y por ende ayuda al aumento del pH en la solución. La adición de soluciones sólidas a la alimentación del digestor debe realizarse con precaución, ya que si se agrega en exceso se aumentará el porcentaje de sólidos totales dentro del digestor y por ende puede ocasionar problemas de taponamiento en los sistemas de transporte y también afecta la capacidad de generación de biogás.

#### 4.4 Operación automática y manual de la planta

La planta puede operar en dos modalidades: automática y manual. Para cualquiera de las dos modalidades se utiliza un panel de control que se muestra en la Figura 4.28.



Figura 4.28: Panel de control

Cada uno de los selectores acciona algún proceso dentro de los equipos de la planta. En la tabla se especifica el nombre de cada uno de los botones que controlan los diferentes equipos.

Tabla 4.2: Selectores en el panel de control

Item	Equipo
1	Bomba de agua (B-1)
2	Trituradora
3	Pulidor/Picador
4	Tornillo Fruta
5	Tornillo Estiércol
6	Homogeneizador
7	Bomba inmersión (B-2) homogeneizador
8	Tamiz vibratorio
9	Bomba inmersión (B-3) tamiz vibratorio
10	Bomba agua caliente (B-6)
11	Bomba agua caliente (B-7)
12	Bomba de dosificación base
13	Bomba de dosificación ácido
14	Compresor de biogás
15	Compresor de aire

#### 4.4.1 Operación manual de la planta

Para la operación manual de la planta de digestión anaerobia se posicionará el selector de control en posición manual. Posteriormente se encenderá cada uno de los selectores de equipos y bombas de acuerdo a las necesidades de operación de la planta en ese momento controlando los medidores de diferentes parámetros de manera manual y contrarrestando cualquier cambio o problema que hubiera dentro de la operación.

Para la operación regular de la planta sería necesario accionar los selectores de la siguiente manera:

1. Encender el selector de la bomba de agua B1
2. Girar el selector para encender el motor del pulidor/picador
3. Encender el motor de la trituradora
4. Girar el selector para encender motor de tornillo de estiércol
5. Encender el motor del tornillo de fruta
6. Encender el motor del agitador del tanque de homogeneización A1
7. Encender el motor del tamiz vibratorio
8. Girar el selector para encender la bomba del tanque de homogeneización
9. Encender la bomba del tanque tamiz

Debido a que las bombas dosificadoras de ácido y base no se encuentran en correcto funcionamiento no se las ha tomado en cuenta para el proceso. Por lo que para la regulación del pH se agrega cal en la mezcla alimentada al digestor.

Para la descarga del biol, que ayuda a mantener el nivel dentro del reactor, se debe accionar la bomba de diafragma B5 que es una bomba neumática por lo que su acción es solamente controlada de manera manual y el operario debe asegurarse que el volumen de biol descargado sea igual al volumen de alimentación.

#### **4.4.2 Operación automática de la planta**

Para la operación automática de la planta se utiliza un equipo conocido como PLC, controlador lógico programable, que permite mediante una programación de varias señales de entrada dar respuesta mediante diferentes señales de salida. En la planta de digestión anaerobia el PLC permite controlar bombas y motores mediante variables de presión, temperatura o volumen que se miden con los sensores ya descritos en secciones anteriores.

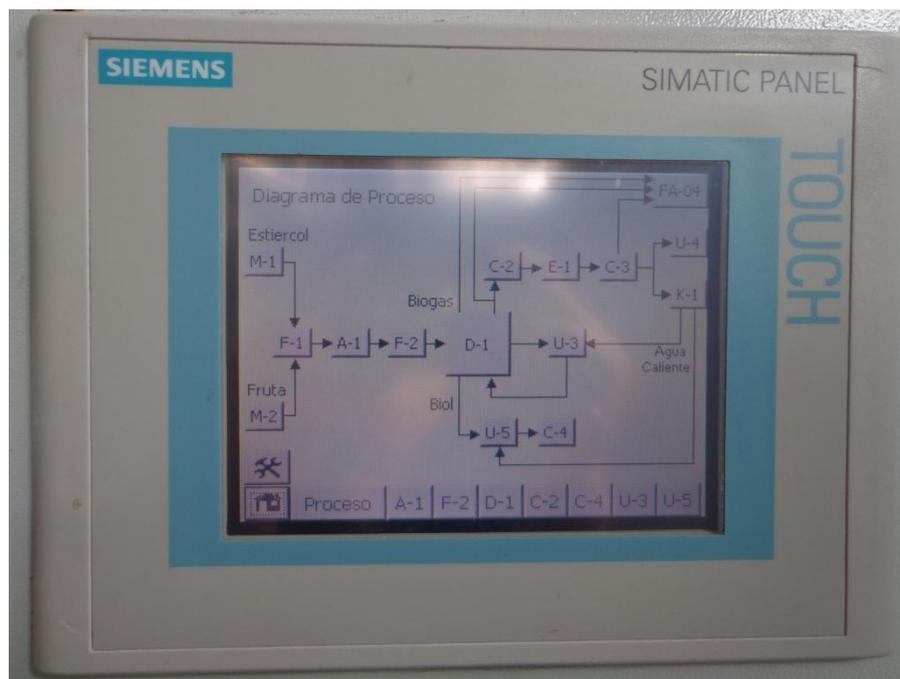
La operación automática de la planta se da cuando la alimentación hacia el reactor se realiza con una serie de comandos y programación que se detallan a continuación:

- Después de haber colocado fruta y estiércol en los tanques de almacenamiento M1 y M2 mediante un transductor de peso se registra la cantidad de material para el proceso de trituración.
- Cuando la cantidad de fruta y estiércol se encuentran en un rango mayor al mínimo programado se encienden los tornillos de alimentación así como también el motor del picador/pulidor y del triturador.
- Cuando el sensor de nivel del tanque homogeneizador registra una cantidad mayor al mínimo se enciende el motor del agitador que permite la homogeneización de la alimentación.
- El sensor de nivel en el tanque homogeneizador A1 registra la cantidad de alimentación que pasará hacia el tamiz por lo que cuando el nivel se encuentra en un rango programado para la operación se enciende la bomba B2 que permite el flujo entre el tanque homogeneizador y el tamiz vibratorio. Es importante mencionar que el operador debe abrir la válvula de mariposa que permite el flujo entre A1 y F2.
- Cuando se inicia el ciclo de bombeo de alimentación automática también se enciende el motor del tamiz vibratorio que permite eliminar fibras en la alimentación.
- Cuando el nivel medido en el tanque de tamizado es el programado para la operación se enciende la bomba B3 que inicia el flujo de la alimentación hacia el biodigestor.

Como se describió anteriormente existe una serie de sensores instalados en diferentes equipos que permiten el control de las condiciones de operación de la planta. Para la

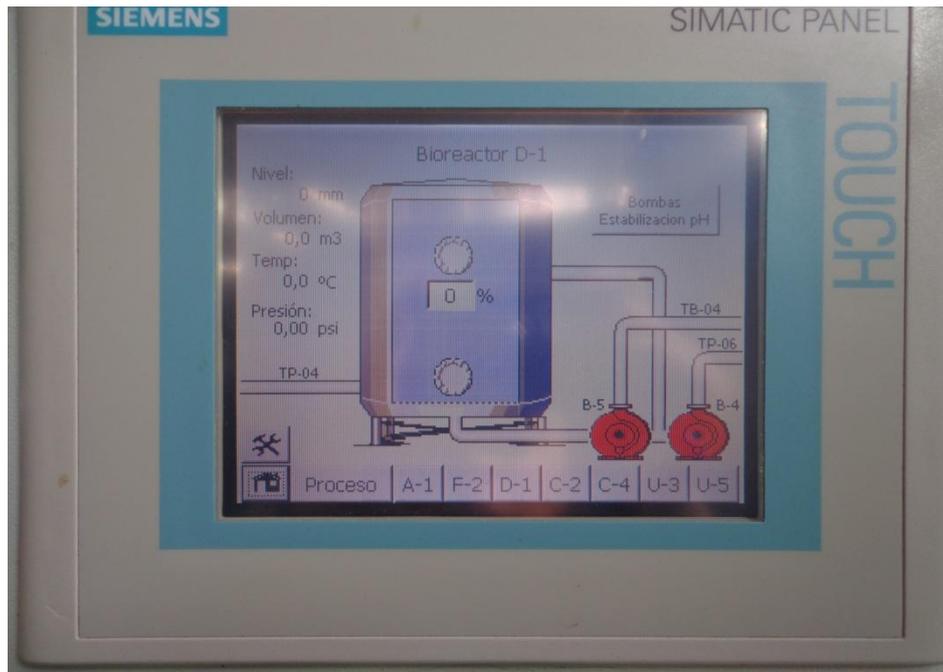
visualización de las diferentes condiciones que proporcionan una idea del estado del proceso biológico y permiten el control y prevención de desequilibrios se ha instalado una pantalla táctil donde se muestran las diferentes etapas del proceso junto con las condiciones de operación normales y extremas para cada sección.

Al inicial la pantalla táctil se observa un diagrama de flujo del proceso que ayuda a la interfaz entre la pantalla de inicio con las diferentes etapas del proceso. El diagrama de flujo del proceso programado en la touch se muestra en la Figura 4.29.



**Figura 4.29: Diagrama del proceso en la pantalla táctil**

En la interfase también se programó el diagrama de cada tanque junto con los sensores que poseía. Por ejemplo en el caso del biodigestor se puede observar en la Figura 4.30 que la pantalla táctil muestra todos los parámetros operacionales, entre los que se encuentran la temperatura, la presión y el nivel con lo que se observa también el volumen. Para el control de los diferentes parámetros operacionales se programó un esquema de colores que permiten visualizar el nivel normal de operación (azul), alto (amarillo) y críticamente alto (rojo) con lo que el operador puede contrarrestar cambios bruscos en la operación del reactor y así evitar fallas en la digestión anaerobia.



**Figura 4.30: Biodigestor en la pantalla táctil**

## 5 Resultados y Discusiones

### 5.1 Sustitución del digestor

El digestor construido inicialmente tuvo que ser sustituido debido a que durante la descarga del biol ocurría una deformación del recipiente, incluso a velocidades bajas de descarga lo que llevó a la planificación de una serie de mejoras para el nuevo reactor. Entre las mejoras planificadas se encontraba: construir un nuevo tanque de lámina más gruesa. Cambiar de la forma de la tapa cónica a una tapa esférica y reforzada. Soldar cinturones alrededor del digestor, los que estarían ubicados cada 60 centímetros. Además, se colocó el aislamiento térmico en todo el perímetro del reactor.

Las dimensiones del nuevo reactor se detallan en la sección 4.1

#### 5.1.1 Cálculo del espesor óptimo de la lámina de construcción del digestor

El cálculo del espesor de lámina necesario para evitar deformaciones se realizó utilizando la fórmula que se muestra a continuación, la cual toma en cuenta la relación entre diámetro externo e interno, y también la forma del recipiente.

Para recipientes cilíndricos con relación de  $d_a/d_i$  menor o igual a 1,20 se tiene

$$t = \frac{P \cdot L \cdot 0,5}{2S \cdot E + 0,2P} \quad (27) \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde

$t$ es el espesor mínimo del tanque	[mm]
$L$ diámetro interno del tanque	[mm]
$P$ presión de operación	[N/mm <sup>2</sup> ]
$S$ esfuerzo permitido	[N/mm <sup>2</sup> ]
$E$ eficiencia conjunta	[-]

Se realizó pruebas de deformación al digestor antiguo donde se aumentaba la velocidad de la bomba de descarga de biol y se observaba a qué velocidad se

producían las deformaciones, con esto se obtuvo la presión mínima con la que el digestor sufría fallas, siendo este valor 1075 KPa. Con el fin de determinar el espesor mínimo del reactor se utilizó el valor del esfuerzo permisible del material 252 MPa (28). Se obtiene los valores que se muestran en la Tabla 5.1

**Tabla 5.1: Datos de diseño del reactor**

<b>Dato</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
t	3,2	mm
L	2700	mm
P	1,075	N/mm <sup>2</sup>
S	252	N/mm <sup>2</sup>
E	0,9	-

Se puede observar que el espesor mínimo necesario para operar a la presión con la cual se deformó el reactor anterior es 3,2 mm por lo que se puede concluir que el espesor de lámina utilizado es adecuado para la operación.

En la Figura 5.1 se observan las imágenes de los dos biodigestores utilizados para la operación de la planta de digestión anaerobia.



Figura 5.1: (a) Primer Biodigestor. (b) Segundo Biodigestor

## 5.2 Arranque de la planta de digestión anaerobia

El arranque e inicio de la operación regular de la planta de digestión anaerobia en Latinoamericana de Jugos S.A. inició en el mes de enero de 2013. El periodo de seguimiento en el marco de esta tesis fue de 220 días y dividido en dos fases. La primera fase que duró aproximadamente 46 días consistió del llenado del reactor hasta que presentó problemas y tuvo que ser sustituido. Posteriormente hubo un periodo de stand-by de 60 días mientras se construía el segundo digester modificado. A partir del día 108 hasta el 222 se realizó la segunda fase de operación con el reactor modificado. La presentación de resultados se basará en esta división de etapas de la operación.

En la Tabla 5.2 se muestra las condiciones iniciales de operación del digester anaerobio.

Tabla 5.2: Condiciones iniciales de operación

Parámetro	Valor
pH	4,23
DQO	1900 mg/L
TS	6537 mg/L
OTS	3908,3 mg/L

El primer paso del arranque de una planta es el llenado del biodigestor. Para este paso se comenzó alimentando fruta que se obtenía de las pruebas de trituración y filtrado por lo que el pH dentro del digestor se encontraba en un rango ácido que caracteriza a la fruta. Para el equilibrio de pH del reactor se completó la etapa de llenado añadiendo estiércol disuelto en un metro cúbico de agua de manera intermitente durante aproximadamente 40 días hasta lograr llegar al volumen óptimo de operación del reactor de 22m<sup>3</sup> y un pH superior a 6 para el final de la etapa de llenado. La válvula de salida de biogás se mantuvo siempre abierta, porque a pesar de que no se estuviera generando biogás era necesaria la salida del aire que se encontraba dentro del digestor.

Durante la fase de llenado comenzaron a ocurrir los problemas en el reactor que se mencionaron en la sección 4.1 por lo que el día 46 se suspendió la operación de la planta mientras se construía el nuevo biodigestor. La para duró dos meses desde el 20 de febrero hasta el 22 de abril (día 108) donde se reinició la operación de la planta.

Para la segunda fase del arranque se trasvasó la mezcla reactiva al nuevo reactor y se completó el llenado del nuevo digestor de manera paulatina, añadiendo ya no solo estiércol sino también fruta. Las condiciones del inicio de la operación en el segundo reactor se muestran en la Tabla 5.3.

**Tabla 5.3: Condiciones iniciales en el segundo reactor**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
pH	6,46
DQO	3380 mg/L
TS	3900 mg/L
OTS	2700 mg/L

Al iniciar la operación en el segundo reactor se comenzó a añadir fruta y estiércol en relación 1:1 además de agua por 7 días. A partir del octavo día de operación con el nuevo reactor y hasta el final de la experimentación se recirculó biol en vez de agua ya que se determinó que la mezcla reactiva dentro del biodigestor se encontraba muy diluida.

A partir del día 125 y por un periodo de 50 días se alimentó fruta y estiércol en una proporción 2:1 ya que el pH alcanzó el nivel óptimo. Al observar que no existía una mayor producción de biogás se descubrió la existencia de una fuga en el sistema de transporte del gas que evitaba cuantificar la cantidad de biogás producido en el contador de gases. A partir del día 175 se comenzó a alimentar fruta y estiércol en

relación 3:1, ya que la fruta provee de materia orgánica degradable a las bacterias. Este proceso que se mantuvo por siete días. Finalmente se alimentó fruta y estiércol en la proporción óptima de 4:1 durante los últimos 40 días de la experimentación, ya que el pH dentro del reactor se encontraba estabilizado y dentro del rango normal de operación, por lo que se decidió utilizar la proporción óptima de fruta y estiércol.

Es importante mencionar que durante el arranque en un principio se añadía una cantidad considerable de agua para fluidizar los desechos y hacerlos transportables por las tuberías, pero posteriormente la cantidad de agua se mantuvo en niveles mínimos y se utilizó la propia mezcla reactiva para fluidizar los desechos alimentados.

Los parámetros más importantes durante el estudio fueron la producción de biogás y los análisis de pH, DQO, sólidos, AGVs y alcalinidad.

### **5.3 Resultados de la operación durante el arranque de la planta**

Durante el arranque de la planta de digestión anaerobia se realizaron los análisis pertinentes para poder evaluar el estado del proceso y poder determinar las siguientes medidas hasta alcanzar una operación estable. Entre los parámetros de operación que se determinaron se encuentran: pH, carga orgánica alimentada, tiempo de residencia hidráulico, entre otros.

Algunos de estos parámetros, como el pH y la producción de biogás son resultado del estado y funcionamiento del digestor, mientras que otros como la carga orgánica o la cantidad de aditivo pueden modificar las condiciones operativas del reactor.

#### **5.3.1 Volumen y composición de la alimentación**

La alimentación es uno de los parámetros que rigen el proceso de digestión anaerobia. El análisis del volumen de alimentación se ha dividido en tres periodos: el primero comprende la experimentación con el primer digestor, el segundo el periodo de stand-by y finalmente el tiempo de operación con el segundo reactor.

En la Figura 5.2 se observa el volumen de alimentación diario durante el periodo de operación.

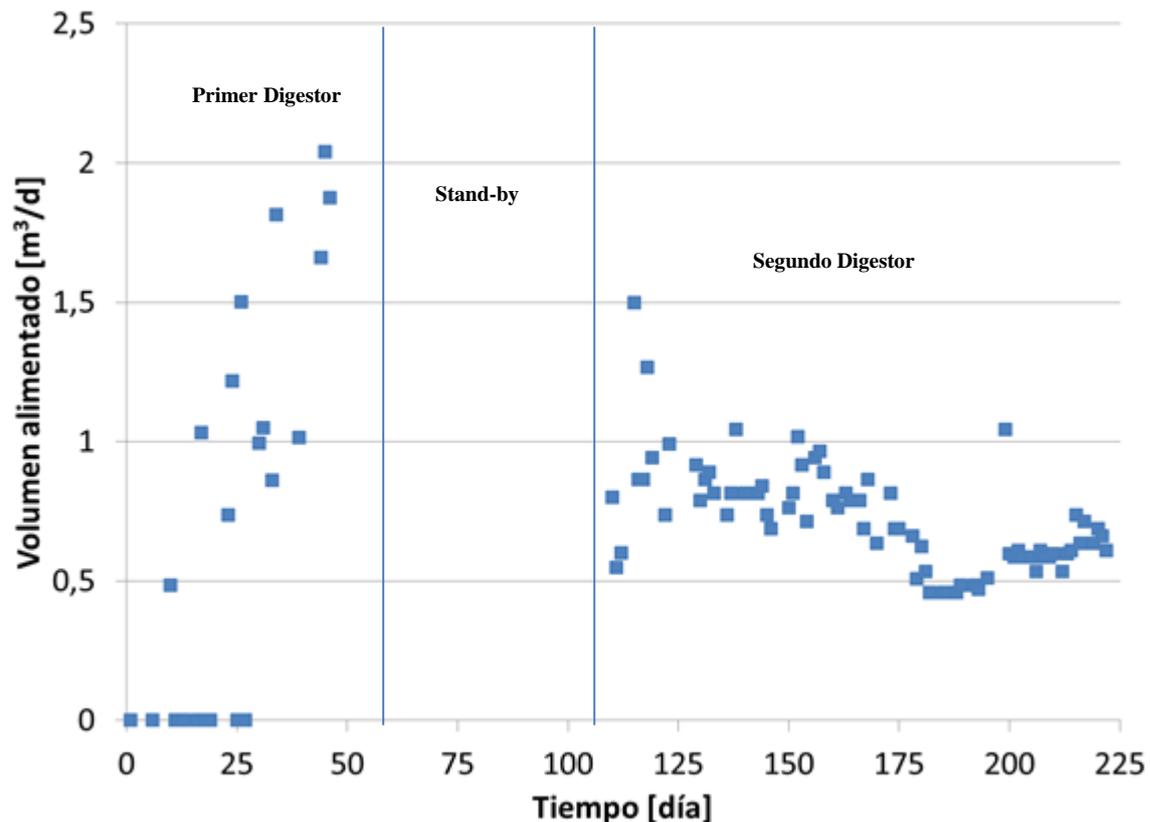


Figura 5.2: Variación de la alimentación durante el periodo de estudio

Como se puede observar la alimentación a lo largo del periodo de estudio ha sido muy variable y ha dependido, principalmente, de dos factores; el primero la disponibilidad de un sustrato que sea digerible sin la necesidad de una reducción de tamaño y también de la disponibilidad de estiércol para el proceso.

Se ha necesitado buscar un sustrato que se pueda manejar sin reducir su tamaño debido a que había varios problemas con el proceso de trituración sin lograr obtener resultados favorables hasta el momento donde se terminó el seguimiento. Por otra parte, la disponibilidad de estiércol para el proceso en un inicio fue un factor decisivo al momento de analizar la alimentación ya que provenía de fuentes externas a Latinoamericana de Jugos S.A. por lo que era necesaria una planificación y recolección previa de estiércol para garantizar la alimentación de este sustrato.

Durante la operación con el primer biodigestor se observa que existe un creciente aumento en el volumen alimentado debido a la necesidad de llenado del reactor, alcanzando el máximo el día que se decidió detener la planta para realizar la construcción e instalación del segundo reactor, el cual corresponde al día 46. Por otra parte, durante la operación realizada en el segundo biodigestor la alimentación diaria se mantiene en un rango de 0,5 a 1 m<sup>3</sup>/d con pocas excepciones.

Es importante tomar en cuenta que la alimentación es uno de los factores primordiales durante el proceso de la digestión, ya que si la alimentación es muy baja las bacterias morirán debido a la falta de sustrato disponible, mientras que si la alimentación es demasiado abundante puede romperse el equilibrio de la metanogénesis.

Como se observa en la Figura 5.2, también es importante conocer la composición de la alimentación diaria. Por lo que se muestra en la Figura 5.3 la cantidad de fruta y estiércol alimentados durante el periodo de estudio.

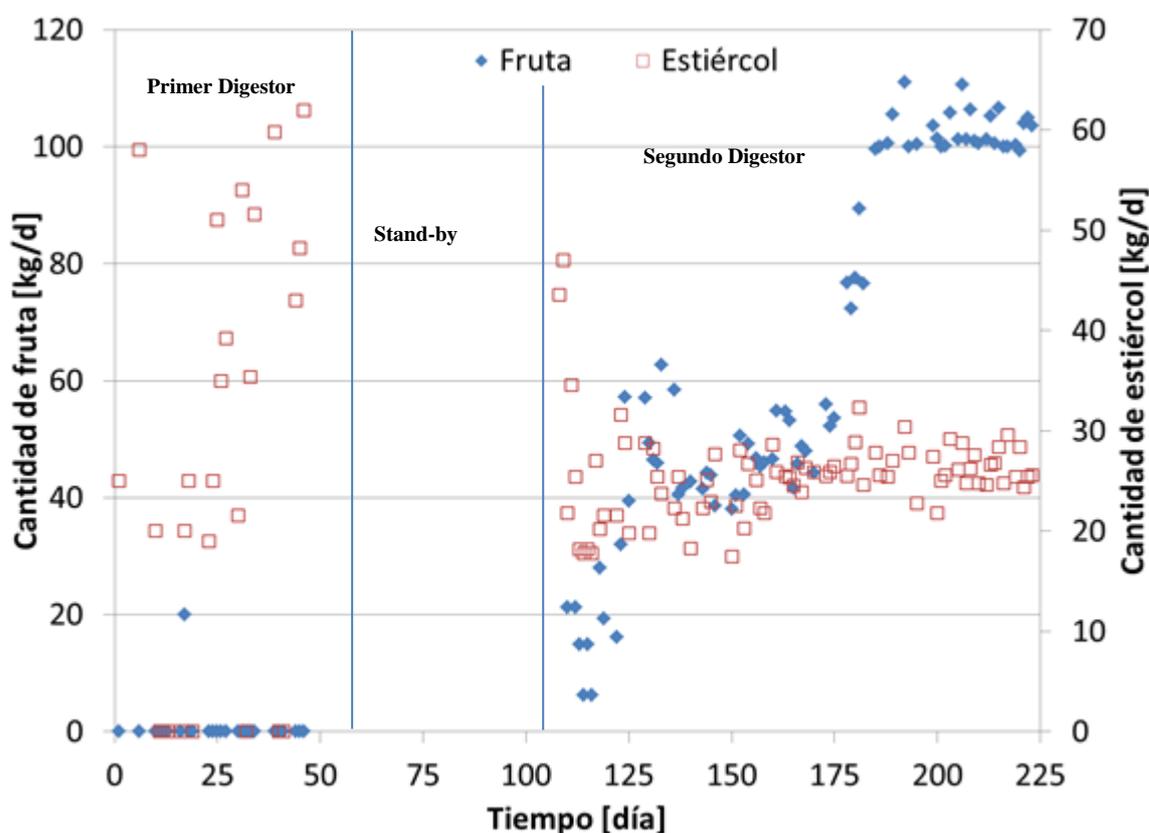


Figura 5.3: Desecho de fruta y estiércol alimentados

Se puede observar que en el primer periodo no había alimentación de fruta debido a la necesidad de incrementar el pH dentro del digestor, por lo que era necesario alimentar solamente con estiércol, que es la fuente de los cultivos bacterianos para el proceso y ayuda a regular el pH. En el periodo de operación con el nuevo digestor se puede observar que en un principio se maneja una alimentación de aproximadamente 25 kg de fruta, luego se alimentan aproximadamente 50 kg de fruta y finalmente, se alimentan 100 kg de fruta con lo que se llega a la relación de operación de trabajo óptima que es 4:1 fruta y estiércol.

En el caso del estiércol alimentado al biodigestor se puede observar que existe una clara división entre los dos periodos de estudio. En el primer periodo existe una variación muy significativa entre la cantidad diaria de estiércol alimentado, lo que

indica inestabilidad en el proceso y también se puede observar que hubieron varios días donde no se alimenta el digestor, lo cual es una característica del periodo de arranque y llenado del reactor y se debió principalmente a la falta de estiércol disponible. Para la segunda fase se puede observar que la alimentación se estabiliza alrededor de 30kd de estiércol diarios con lo que se lograría tener un control de la relación de fruta y estiércol dentro de la alimentación y así maximizar la producción de biogás. La Figura 5.4 muestra cómo fue variando la relación entre fruta y estiércol durante las fases de operación.

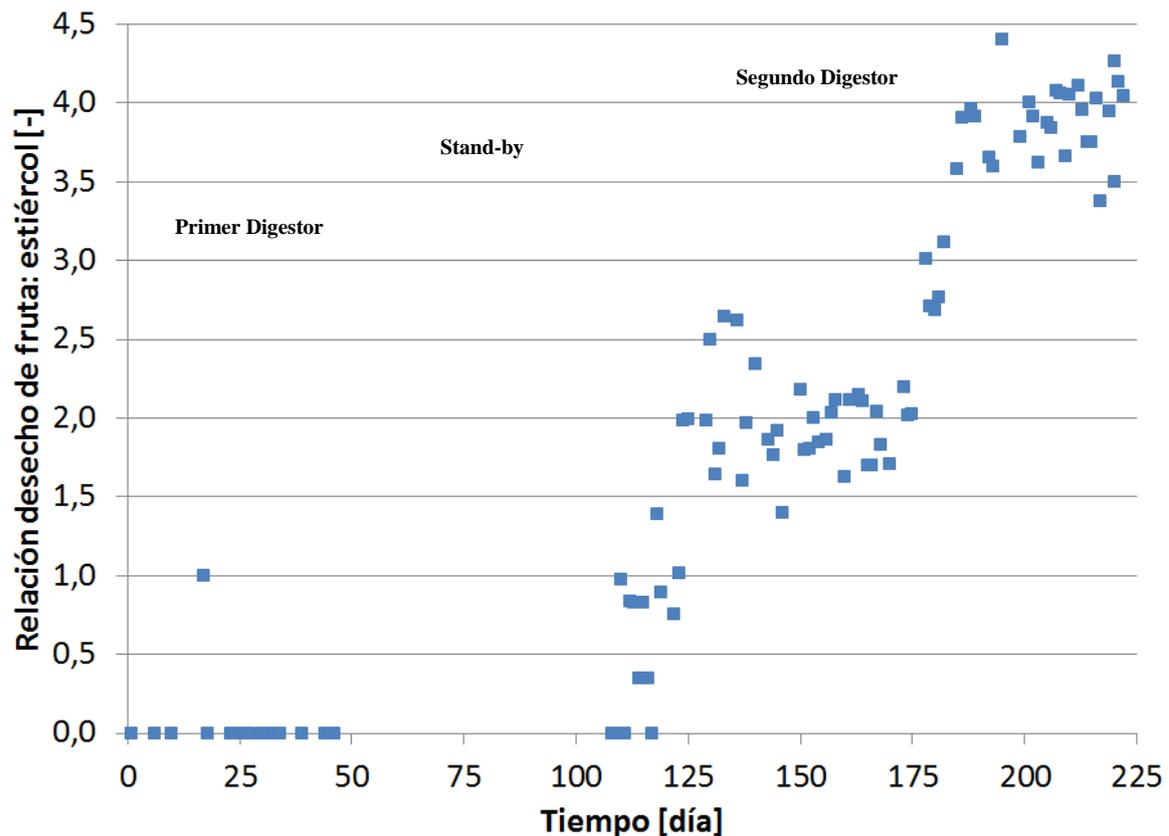


Figura 5.4: Relación desecho de fruta: estiércol

Para la primera fase debido a que todo el desecho de fruta utilizado para las pruebas de trituración fue cargado al reactor la mezcla reactiva se encontraba a un pH muy bajo por lo que se comenzó el llenado del reactor solamente alimentando estiércol lo que resultaría en una relación fruta y estiércol nula. Después en la segunda fase se inició la operación con una relación 1:1 entre fruta y estiércol, ya que el pH del reactor todavía se encontraba muy por debajo del rango normal de operación, pero a medida que el pH se iba estabilizando se fue aumentando la relación entre desecho de fruta y estiércol hasta llegar a la relación óptima de operación que es 4:1 en el día 185.

Como parte de la composición de la alimentación también es importante analizar la cantidad de agua alimentada junto con la cantidad de biol recirculado del biodigestor. La relación y la cantidad de estos parámetros se muestra en la Figura 5.5.

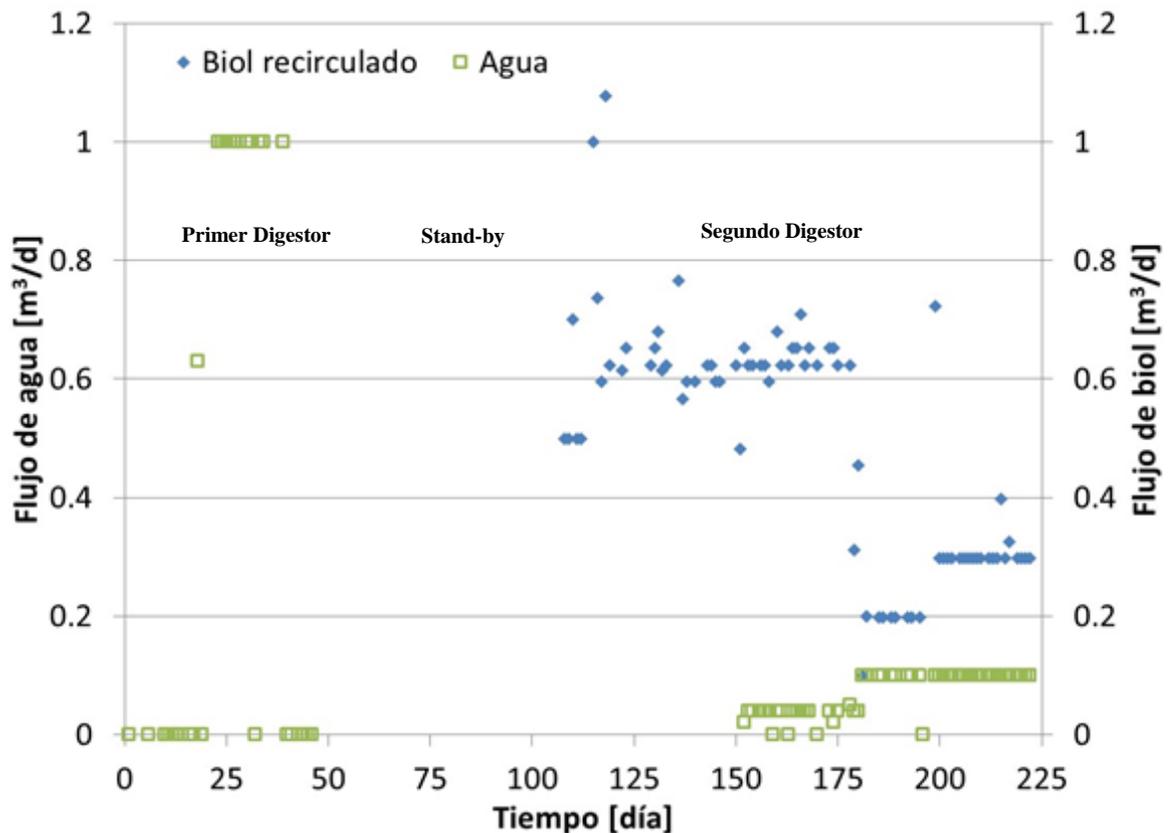


Figura 5.5: Volumen de biol recirculado y agua alimentada

Como se puede observar el volumen de agua alimentado durante el arranque de la planta de digestión anaerobia fue muy variable, pero se pueden observar ciertas tendencias importantes. Al inicio del primer periodo de operación no se añadió agua, pero luego se comenzó a añadir  $1\text{m}^3$  diarios ya que se encontraba en un proceso de llenado. Cuando se decidió detener la operación de la planta para construir el nuevo reactor, el volumen dentro del biodigestor era de  $18\text{m}^3$ , lo que muestra que todavía se debía llenar el reactor para llegar al rango normal de operación. En el periodo de estudio con el segundo digestor la cantidad de agua añadida fue nula o muy baja lo que se debe, principalmente, a que se utilizaba el biol del digestor para el proceso de alimentación con el fin de aumentar la cantidad de sustrato disponible para las bacterias ya que, en un inicio, la mezcla reactiva se encontraba muy diluida.

A partir de la segunda fase de operación, dentro de la alimentación se comenzó a añadir una cantidad importante de biol para lograr la concentración del sustrato que ingresa y no colocar más agua logrando tener una mayor cantidad de sustrato disponible para las bacterias. Y se puede observar que dentro de esta fase existe una clara división entre dos etapas de adición: en la primera se puede observar que se añadía aproximadamente  $0,5\text{m}^3$  de biol diarios, mientras que en el segundo se añaden volúmenes que oscilan entre  $0,2$  y  $0,3 \text{m}^3$  habiendo ciertas excepciones y que

representan una fracción de la cantidad de biol extraída del reactor, lo cual permite mantener constante el nivel de mezcla reactiva dentro del biodigestor.

Si se realiza una comparación entre la Figura 5.2 y la Figura 5.5 se puede observar que la mayor parte del volumen de alimentación corresponde a la cantidad de biol, o a su vez agua, que se añaden al proceso por lo que el volumen representado por la cantidad de fruta y estiércol es muy pequeño.

### 5.3.2 Carga orgánica diaria

Dentro de la misma tendencia que el volumen de alimentación se encuentra la carga orgánica diaria, pero la diferencia radica en que el volumen nos muestra una cantidad global mientras que la carga orgánica muestra la cantidad de materia orgánica que es añadida diariamente y debe ser degradada por la acción de los microorganismos.

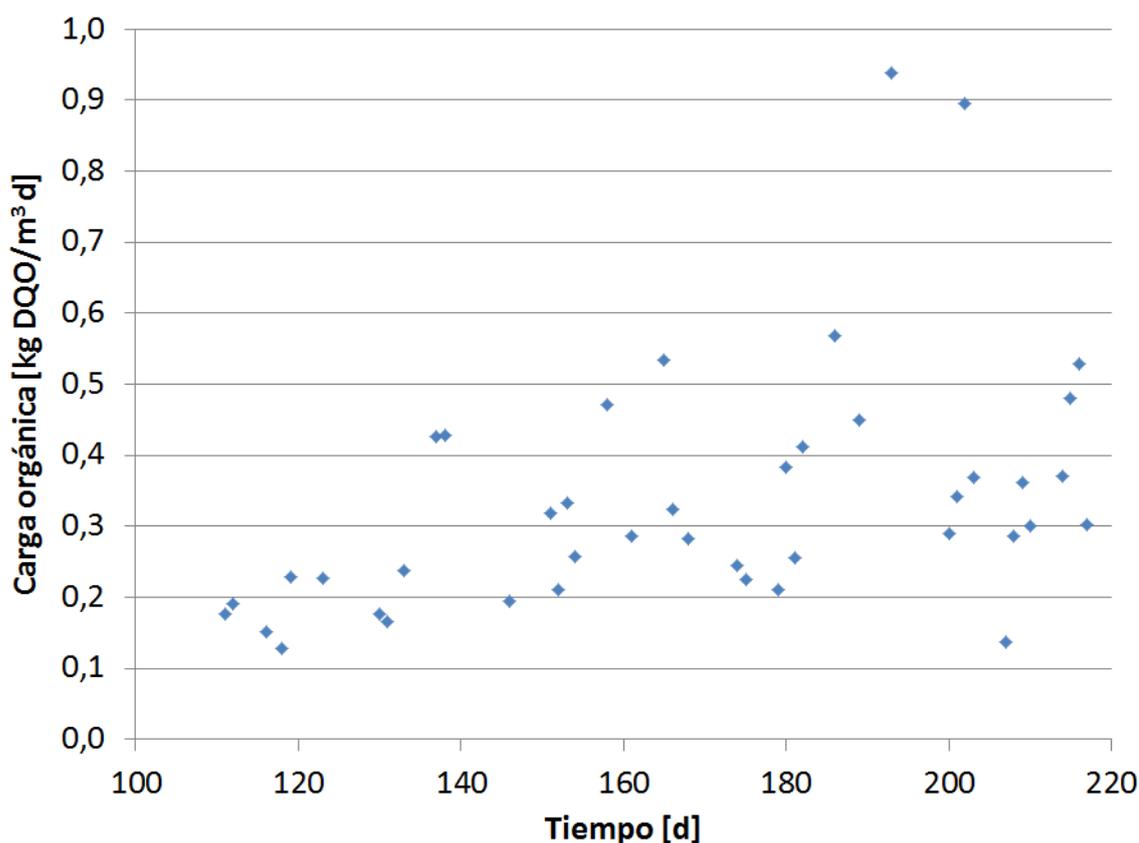


Figura 5.6: Carga orgánica

En la Figura 5.6 se puede observar la carga orgánica alimentada diariamente al digestor por unidad de volumen y es importante tomar en cuenta que solamente se muestran los valores para la segunda fase de operación con el segundo digestor. Se observa que la carga orgánica se mantuvo oscilando entre 0,2 a 0,5 kg DQO/m<sup>3</sup> d lo que se debe a que se encontraba a lo largo de un proceso de estabilización del reactor

donde se intentaba mantener las condiciones de operación para caracterizar su funcionamiento bajo parámetros establecidos.

Hubieron dos días donde la carga orgánica alimentada fue superior a la establecida. Esto ocurre en los días 193 y 202 de operación. Esto se debe a que la cantidad de DQO alimentado ese día fue mucho mayor a la cantidad normal de DQO en la alimentación lo que pudo deberse a un incorrecto muestreo para el análisis o también a un incremento considerable en la cantidad de desecho de fruta alimentada la cual es la principal fuente de DQO para la alimentación

### 5.3.3 Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico es uno de los parámetros más importantes dentro de las condiciones de operación del digestor ya que indica el tiempo en el que el sustrato se encontrará dentro del digestor. Los valores de este parámetro se encuentran graficados a continuación.

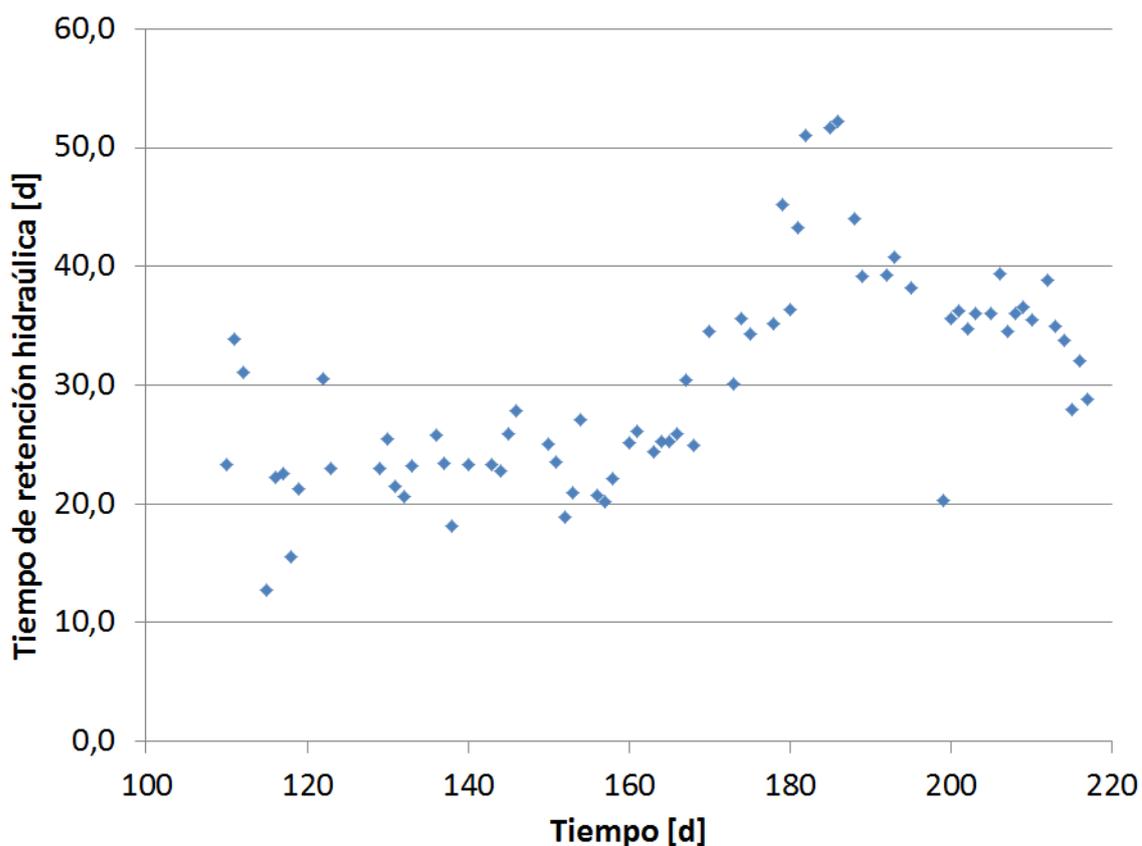


Figura 5.7: Tiempo de retención hidráulico

Es importante notar que para este cálculo solamente se consideraron los tiempo de retención hidráulicos en el periodo de trabajo con el segundo digester, ya que antes de esto la alimentación era muy poca e intermitente lo que hubiera llevado a fluctuaciones dentro del TRH. Se puede observar que en un principio el TRH se encuentra dentro del rango entre 20 y 30 días y después aumenta hasta llegar incluso a 51 días en el día 185 de experimentación. Esta subida del TRH indica ineficiencia en la digestión ya que se considera eficiente a un TRH entre 20 y 30 días.

El aumento del tiempo de retención se da debido a que en un inicio el flujo de alimentación se encontraba entre 0,75 a 1m<sup>3</sup> diarios mientras que a partir del día 160 de experimentación el flujo de alimentación se redujo a un valor constante de aproximadamente 0,5 m<sup>3</sup> diarios mientras el volumen del reactor se mantenía constante. Para la solución del aumento en el TRH se debería aumentar el flujo de alimentación para evitar una ineficiencia en el proceso de digestión anaerobia.

#### **5.3.4 Producción diaria de biogás**

Los parámetros calculados y analizados anteriormente fueron controlados con el objetivo de tener un biodigestor que opere en condiciones óptimas para la máxima generación de biogás. Es por esto, que mientras la operación del digester no sea óptima no podrá existir una cantidad considerable de biogás. En la Figura 5.8 se observa la producción diaria de biogás junto con el porcentaje de metano.

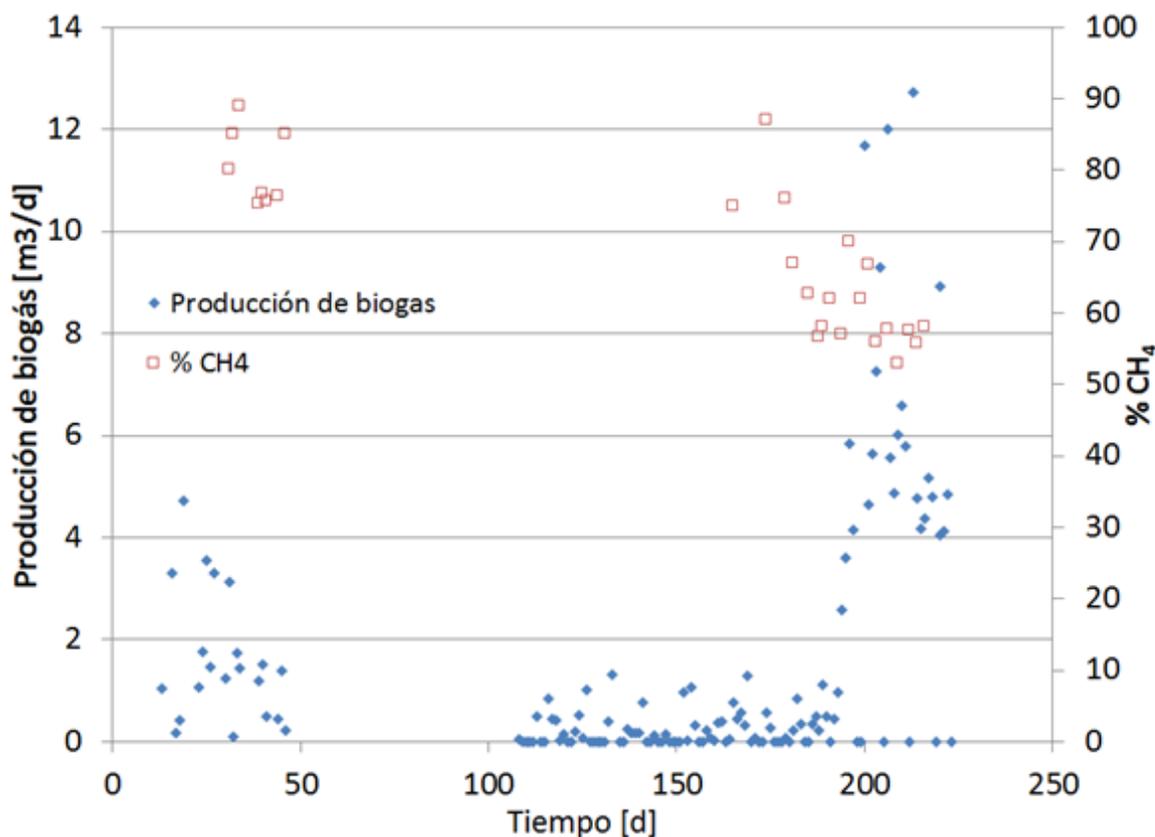


Figura 5.8: Producción diaria de biogás y % de CH<sub>4</sub>

Durante la primera fase de operación se puede observar que la cantidad de biogás producida comienza a crecer, pero posteriormente desciende nuevamente, lo que es una indicación de fugas en el sistema de biogás al inicio en la operación. En el caso del porcentaje de metano en el biogás se puede observar valores altos lo que indicarían un biogás de excelente calidad, pero se debe analizar que en este caso los valores altos de porcentaje de metano se deben a la presencia de aire en el gas ya que por el proceso de llenado el aire dentro del biodigestor fluía por las tuberías de gas y era confundido con la presencia de metano en el análisis.

En la segunda fase de operación no se registra al inicio una producción significativa de biogás lo que se dio debido a una fuga grande que existía en el tramo de conexión entre el biodigestor y el contador de gases. Pero, después de corregida la falla, se puede observar un incremento considerable en la cantidad de biogás generado llegando a tener un máximo de 7,5 m<sup>3</sup>/d. En el caso del porcentaje de metano en el biogás durante el tiempo donde había una fuga no se puede tomar como valores reales los obtenidos debido a que la mayoría de los análisis fueron realizados con una mezcla de gases que contenía baja cantidad de biogás.

Cuando la fuga de biogás se corrigió se comenzaron a obtener porcentajes de metano que oscilaban entre 50 y 70% lo que indica que el biogás obtenido puede ser utilizado para generación energética.

En la Figura 5.9 se muestra la relación que existe entre el flujo de alimentación y el volumen de biogás producido diario.

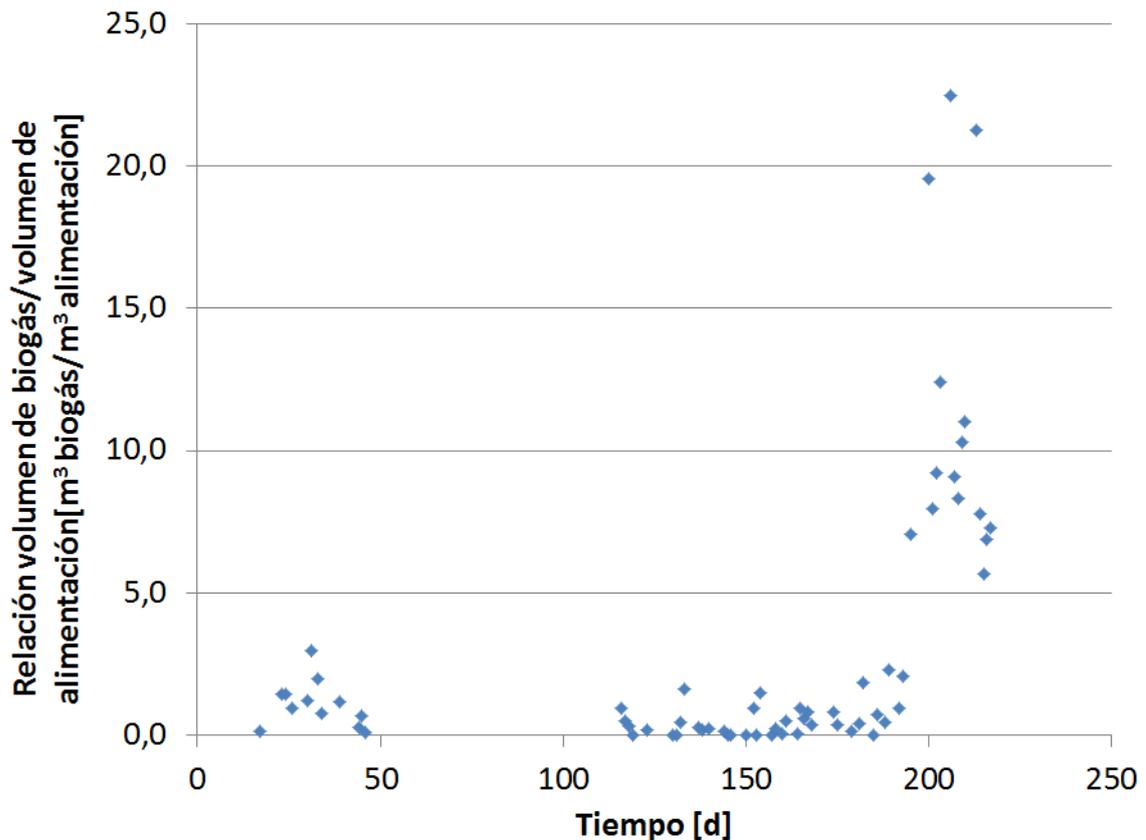


Figura 5.9: Relación entre la cantidad de biogás producida y la alimentación

Se puede observar que para la primera fase de la operación la relación es baja lo que indica la intermitencia e inestabilidad en la operación debido a que se estaba llenando el reactor y las condiciones de operación no se encontraban definidas. Para la segunda fase de operación se puede observar que en el periodo donde existió la fuga en la tubería de biogás la relación es muy pequeña e incluso nula. Pero, cuando se arregló la fuga, la relación aumentó considerablemente a medida que transcurrían los días de operación llegando a un promedio de  $10 \text{ m}^3$  de biogás/ $\text{m}^3$  de alimentación lo que indica un aumento de la generación de biogás llegando a un máximo de  $22,5 \text{ m}^3$  de biogás/ $\text{m}^3$  de alimentación en el día 206 de experimentación y se debió a la regulación del pH y la optimización de la relación entre fruta y estiércol alimentados que aumentaban la disponibilidad de materia orgánica para las bacterias y por ende una mayor generación de gas.

### 5.3.5 Temperatura en el biodigestor

La temperatura es uno de los factores más importantes dentro de la digestión anaerobia ya que está estrechamente ligada con la velocidad de degradación de la materia orgánica y también con el tiempo de residencia óptimo para la degradación. A temperaturas mayores la velocidad de degradación es mayor y por ende el tiempo de residencia óptimo para el proceso es mucho menor. La temperatura en el reactor ubicado en Latinoamericana de Jugos S.A. se muestra en la siguiente figura.

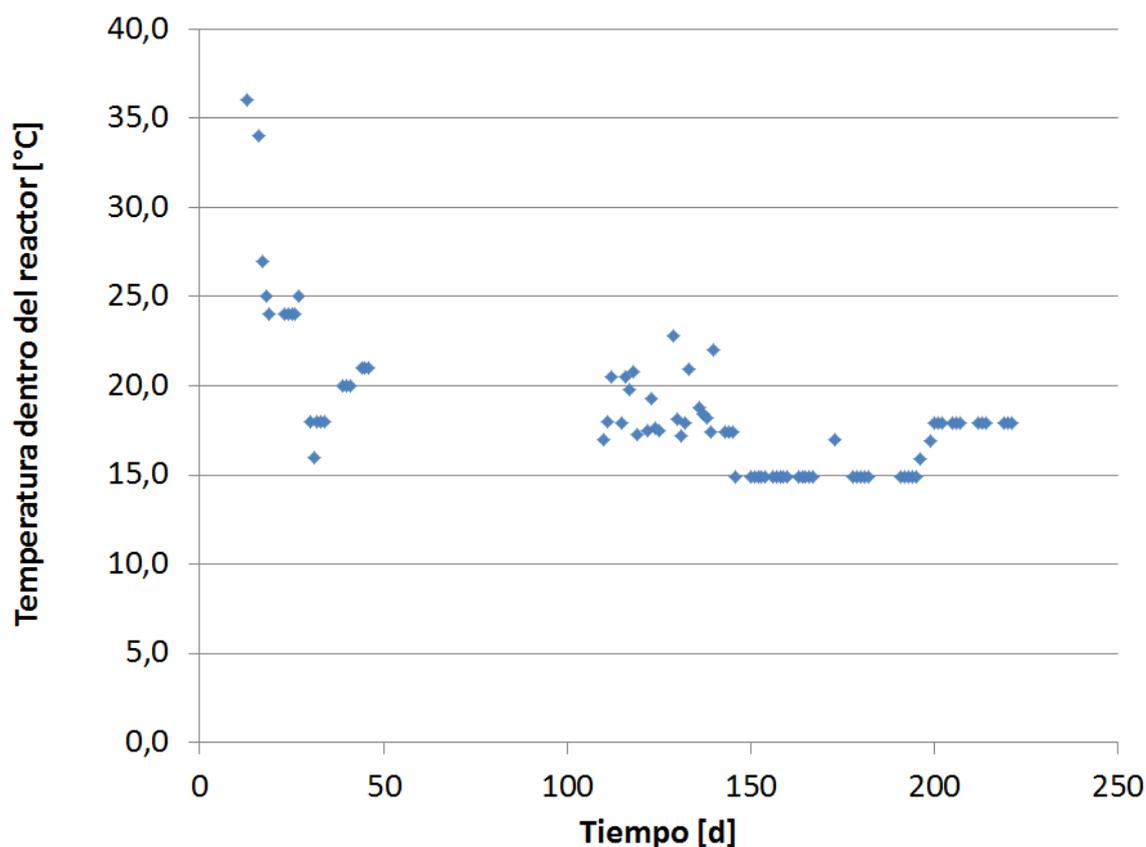


Figura 5.10: Temperatura en el biodigestor

La planta de digestión anaerobia fue diseñada para un rango de temperatura de operación mesofílico donde el biodigestor se mantiene entre 25 a 45°C pero se puede observar en la Figura 5.10 que el rango de temperatura predominante en la operación fue el rango psicrófilico donde la temperatura se mantiene entre 10 a 25°C. El problema que conlleva la caída en la temperatura es la disminución de la velocidad en la degradación de la materia orgánica por lo que es necesario tener tiempos de residencia mayores para evitar obtener un biol sin degradar y también lleva a una menor producción de biogás. La temperatura se mantuvo en un rango tan bajo debido a que hubieron varios problemas en el sistema de intercambio de calor que impedía que la mezcla reactiva dentro del biodigestor se mantuviera en el rango de temperatura óptimo.

## 5.4 Caracterización de alimentación, mezcla reactiva y biol

Para la caracterización de la alimentación, la mezcla reactiva y el biol se realizaron diferentes análisis entre los que se encuentran pH, DQO, sólidos, alcalinidad y ácidos grasos volátiles. Estos análisis se realizan con el fin de conocer el estado de degradación del digestor, es decir saber qué cantidad de materia orgánica está siendo convertida en biogás.

### 5.4.1 pH y adición de cal

El biodigestor que se encuentra en la planta semi- industrial de digestión anaerobia ubicada en Latinoamericana de Jugos S.A inició su operación con un pH de 4,23 el cual fue ocasionado por la alimentación de desechos de fruta triturados provenientes de las pruebas de pretratamiento bajo condiciones aeróbicas. Como ya se mencionó anteriormente la operación fue dividida en dos fases; la primera con el primer reactor y la segunda operando con el nuevo biodigestor lo cual se muestra en la Figura 5.11.

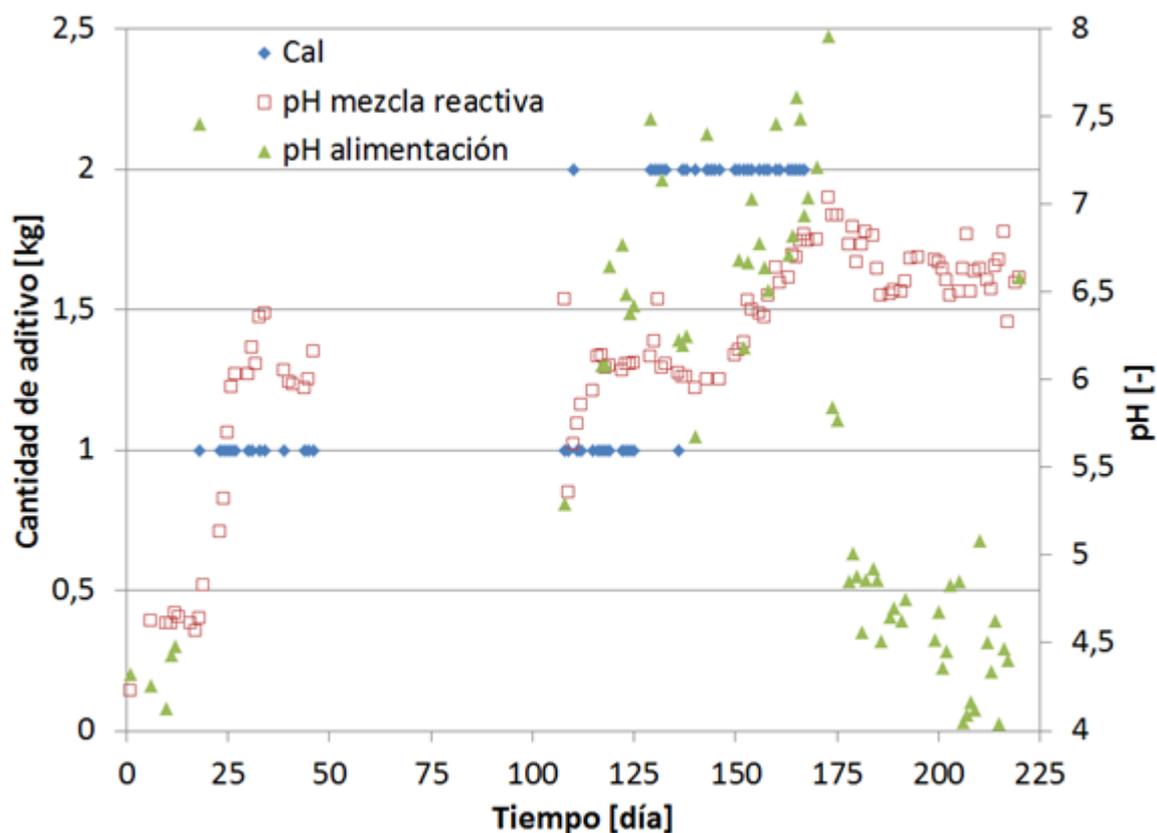


Figura 5.11: Variación de pH de la alimentación y la mezcla reactiva. Cantidad de aditivo

Se puede observar claramente que en la primera fase el pH de la mezcla reactiva se encuentra en un rango muy por debajo de lo óptimo, lo que es una característica del arranque de la planta y se dio debido a la alimentación al inicio de solo fruta, la cual tiene pH ácido. Por otra parte, se puede observar que a partir del día 30 comienza a

subir el pH de manera acelerada lo que se debe primordialmente a la alimentación de estiércol, el cual es ligeramente básico, así como de la adición de cal como regulador de pH, suceso que se analizará posteriormente.

Al comenzar la operación con el segundo biodigestor se puede observar que, en un principio, el pH oscila entre 5 y 5,5 lo cual se debe a la acumulación de ácidos grasos dentro del reactor ya que la mezcla reactiva se mantuvo almacenada en el reactor antiguo sin agitación. Así mismo, durante la instalación del nuevo biodigestor este se llenó con la mezcla reactiva del reactor antiguo perdiendo las condiciones anaerobias y desequilibrando el proceso de generación metanogénica. En un segundo periodo que corresponde a los días 130 a 160 de operación se puede observar que existen tanto alzas como bajas en el pH lo que se debe principalmente a la adición de cal a la alimentación con el fin de estabilizar el pH. Finalmente, se puede observar que a partir del día 170 de operación los valores de pH comienzan a posicionarse en el rango de operación óptimo y se mantienen dentro del rango hasta finalizar el seguimiento, esto indicaría el equilibrio del proceso de digestión anaerobia.

Los parámetros más importantes que influirán en el pH de la alimentación al reactor serán la composición de la alimentación y su volumen. Se puede observar en la Figura 5.11 que existe una relación directa entre el pH de la alimentación con el pH del reactor y la cantidad de aditivo añadido durante la alimentación. Se observa que existió una carga continua de aditivo durante el arranque. Al inicio de la primera fase no se cargaba aditivo a pesar de que el pH era bajo. Posteriormente a partir del día 18 se comenzó a añadir 1 kg de aditivo junto a la alimentación diaria lo que llevó a un considerable incremento en el pH, pero nunca llegó a estabilizarse en los valores óptimos. Esto indica que a pesar de que se añadiera aditivo la capacidad buffer del digestor no lograba controlar las fluctuaciones de pH. En la segunda fase se continuó añadiendo 1kg de aditivo diario, pero al observar que los valores de pH seguían por debajo de lo óptimo se decidió añadir, a partir del día 129, 2kg de cal diario junto con la alimentación con lo cual se observó que desde el día 158 se consiguió llegar al nivel de pH mínimo para un óptimo funcionamiento en el digestor y se mantuvo hasta el final del estudio. Desde el día 168 se detuvo la adición de aditivo junto con la alimentación ya que se había logrado la estabilización del pH dentro del digestor por lo que ya no era necesaria la adición de cal.

#### **5.4.2 Demanda Química de Oxígeno**

El análisis de DQO se realizó tanto a la alimentación como a la mezcla reactiva dentro del digestor y se registra en la Figura 5.12.

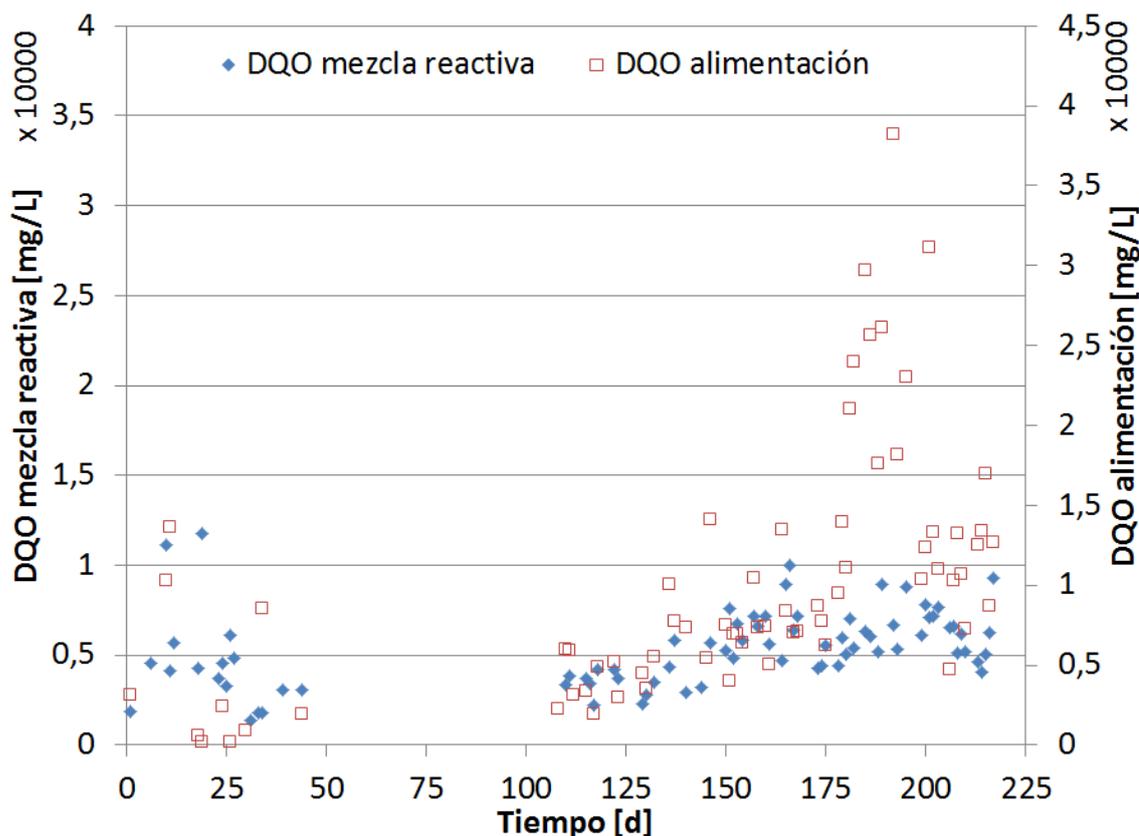


Figura 5.12: DQO alimentación y mezcla reactiva

La DQO de la alimentación depende solamente del tipo de sustrato que se utilice dentro del proceso lo que hace su análisis fácil, mientras que en el caso del DQO de la mezcla reactiva resulta más complicado ya que depende del complejo equilibrio del proceso de digestión. Se puede observar que en la primera fase la DQO de la mezcla reactiva tiende a ser mayor que el de la alimentación lo que indica malfuncionamiento en el digestor porque al romperse el equilibrio en el proceso de digestión la tasa de degradación bajará dando lugar a una acumulación de materia orgánica dentro del digestor o también puede deberse a la acumulación de materia orgánica degradable que se dio durante la puesta en marcha al alimentar fruta sin estiércol.

En la segunda fase se puede observar que la DQO de la alimentación es mucho más alta que la de la mezcla reactiva lo que indica que se está dando el proceso de degradación dentro del digestor, lo que coincide con un valor óptimo de pH lo cual evitó la inhibición de los microorganismos metanogénicos.

### 5.4.3 Sólidos Totales (TS)

Otro de los análisis realizados durante toda la etapa de arranque fue el de sólidos totales. En la Figura 5.13 se muestran los resultados del análisis para el biol extraído y para la alimentación.

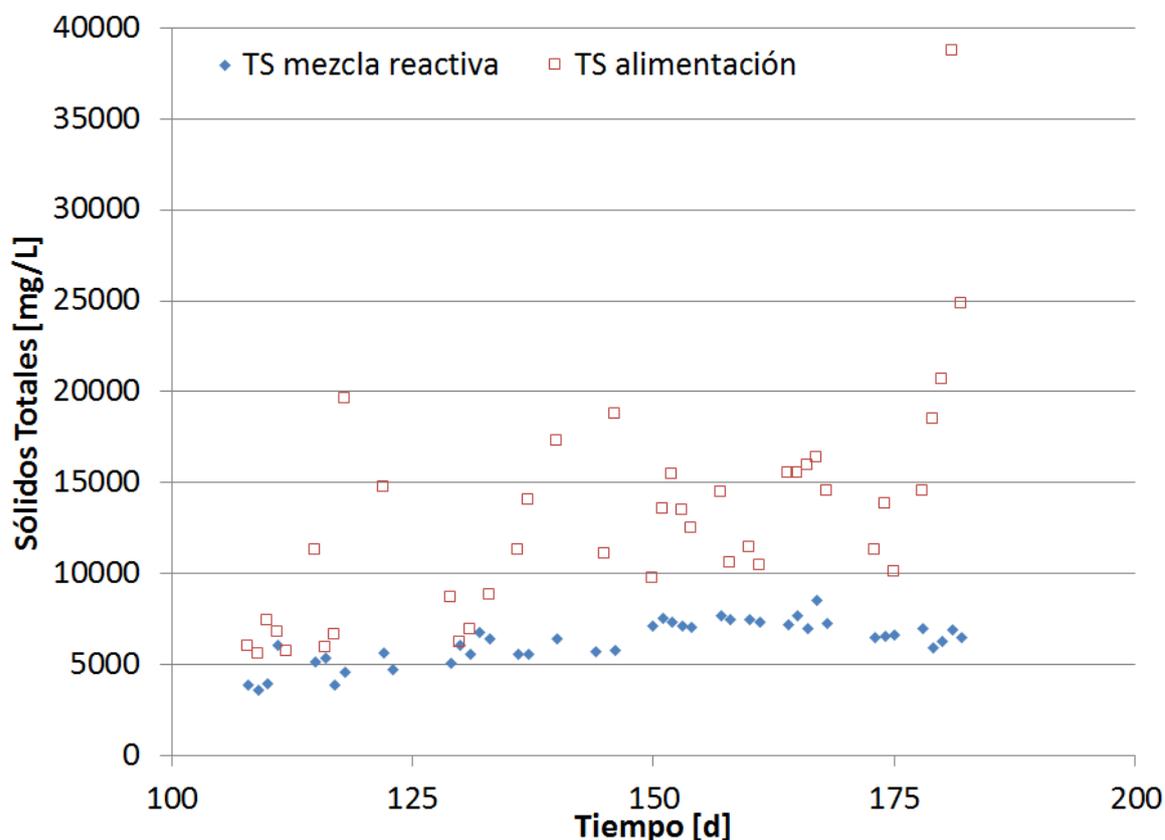


Figura 5.13: TS alimentación y biol

Se puede observar que los TS de la mezcla reactiva se mantuvieron en un valor constante, que oscila entre 5000 a 7000 mg/L que equivalen al 23 y 32% respectivamente pero la alimentación si tuvo fluctuaciones importantes en los TS ya que se comenzó con un valor de 5000 y finalmente se obtuvo valores de hasta 39000 mg/L. El valor máximo de operación del digestor es 5000mg/L de sólidos totales con el fin de evitar problemas de taponamiento de las tuberías y de baja movilidad de los microorganismos lo que no se ha logrado durante la operación ya que se ha llegado a tener 8000 mg/L de sólidos totales lo cual afectaría el funcionamiento del digestor y la producción de biogás. La razón principal de valores tan elevados de TS se da debido a un malfuncionamiento en el sistema de reducción de tamaño de partícula lo que lleva a problemas operacionales entre los que se encuentran: taponamiento en bombas y tuberías de transporte de fluidos, una disminución en la velocidad de digestión

anaerobia, pérdida de movilidad de los microorganismos dentro del biodigestor y la sedimentación de sólidos en la base del reactor impidiendo su degradación.

#### 5.4.4 Sólidos Orgánicos Totales (OTS)

Otro de los parámetros importantes es la cantidad de sólidos orgánicos totales que se encuentran en la muestra ya que advierten la cantidad de materia que puede ser degradada bajo la acción de los microorganismos. El análisis de OTS junto con el porcentaje de OTS en los TS para la alimentación y la mezcla reactiva se muestran en la Figura 5.14.

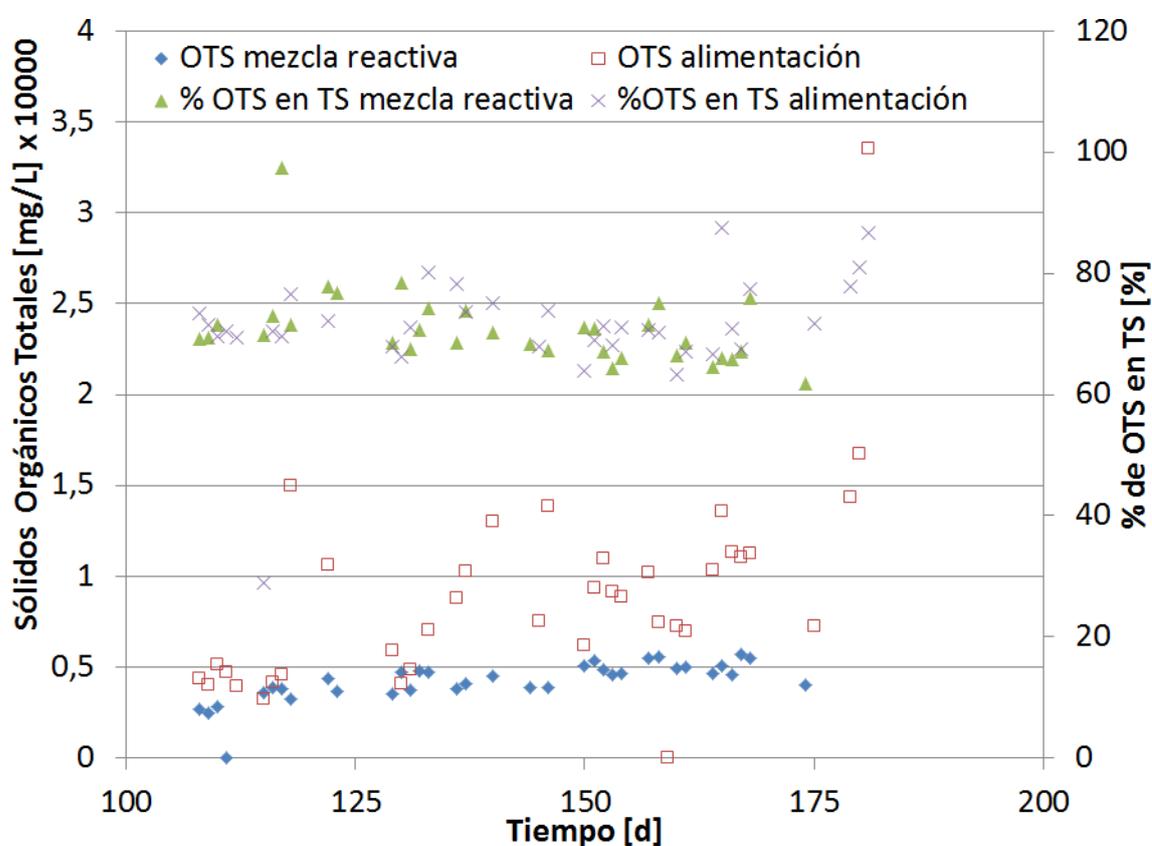


Figura 5.14: OTS mezcla reactiva y alimentación

Se puede observar que el porcentaje de OTS dentro de TS es alto para la alimentación y la mezcla reactiva oscilando entre el 60 y 80% lo que ofrece una ventaja ya que la mayoría de los sólidos que ingresan corresponden a materia orgánica, la cual puede ser degradada. Por otra parte, la alta cantidad de sólidos sean orgánicos o inorgánicos traerán la desventaja de dificultar el transporte de fluidos en las tuberías.

### 5.4.5 Sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles

Un análisis importante que fue realizado solamente a la mezcla reactiva cuando el proceso alcanzó la estabilidad es el de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles. El primer parámetro indica la cantidad de sólidos totales que pueden ser removidos mediante filtración al vacío o centrifugación. El segundo indica la cantidad de sólidos orgánicos que pueden ser removidos mediante los ya detallados métodos mecánicos. Los resultados se muestran en la Figura 5.15 junto con el porcentaje de sólidos volátiles suspendidos dentro de los sólidos suspendidos totales.

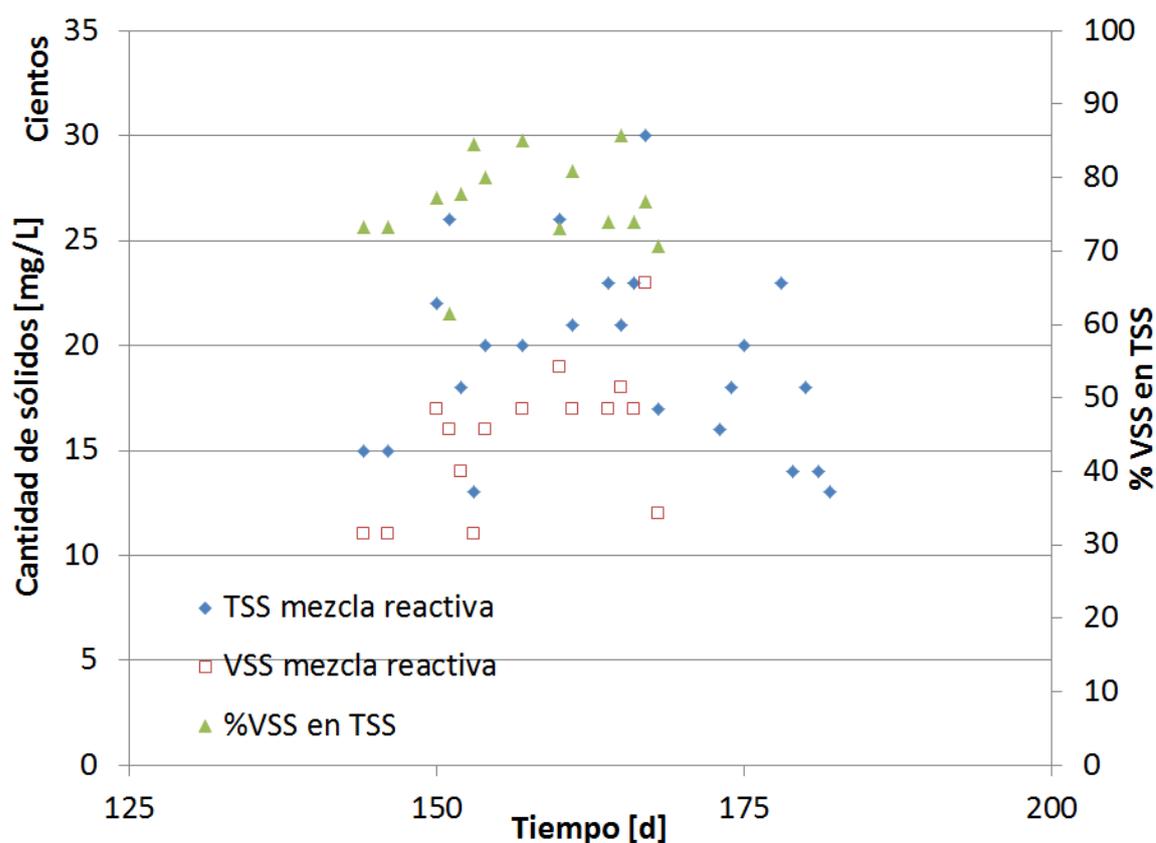


Figura 5.15: TSS y VSS de la mezcla reactiva

Como se puede observar la cantidad de sólidos totales suspendidos alcanza valores de máximo 3600 mg/L de los cuales la mayoría está constituido por sólidos suspendidos orgánicos. Esto se observa al analizar los porcentajes de VSS en TSS con valores que oscilan entre 60 y 90% lo que indica que dentro de los TSS la mayoría corresponde a la materia orgánica suspendida que representa la biomasa presente en el digestor y permite el análisis del desarrollo de las colonias bacterianas durante la operación.

### 5.4.6 Análisis de Ácidos Grasos Volátiles y Alcalinidad

Finalmente, para la caracterización completa de la mezcla reactiva se determinó la alcalinidad y la concentración de ácidos grasos volátiles. El primer parámetro está relacionado a la capacidad tamponante del digestor. Es decir a cómo reaccionará el sistema a los cambios de pH los que se dan principalmente por acumulaciones pequeñas en la cantidad de AGVs que son controladas por la alcalinidad. Y, el segundo indica si está o no en equilibrio el proceso de digestión anaerobia ya que cuando se rompe este equilibrio existe una acumulación de ácidos grasos volátiles dentro del digestor y su malfuncionamiento. Los resultados de los dos parámetros se muestran en la Figura 5.16.

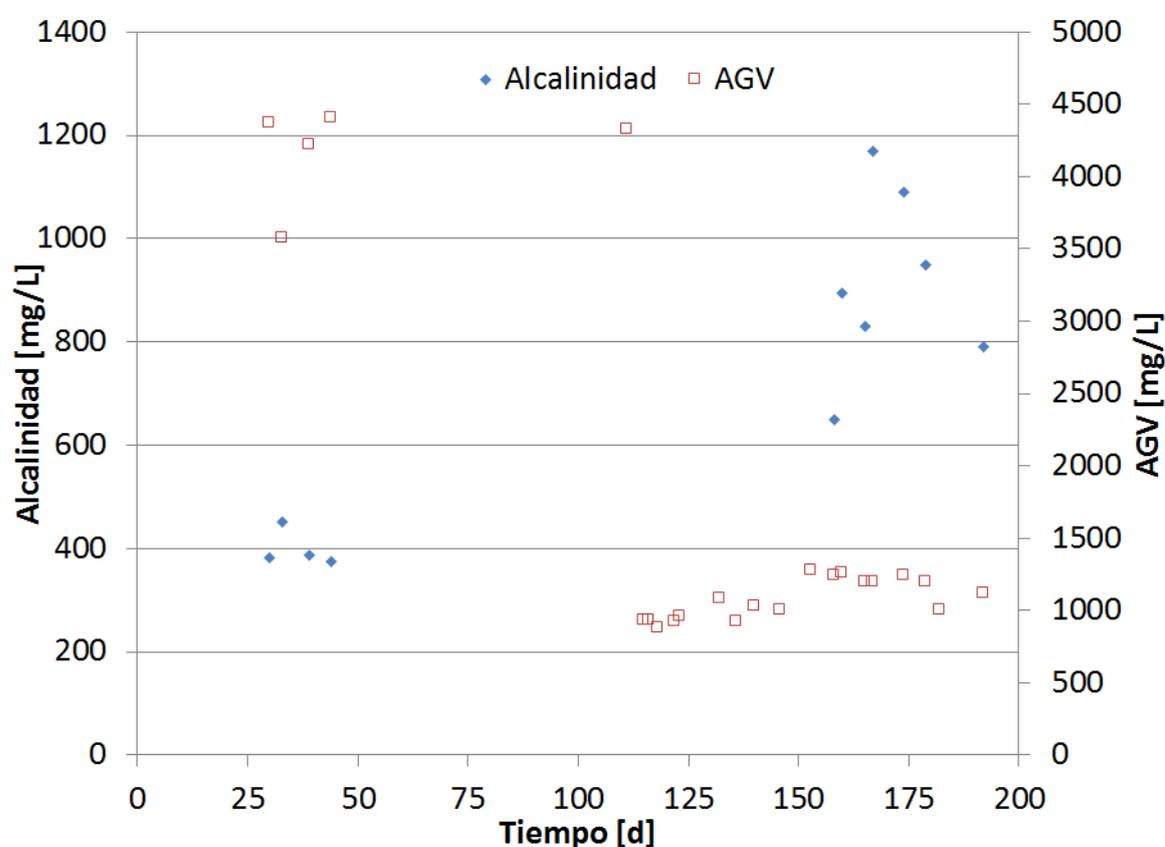


Figura 5.16: AGV/ Alcalinidad de la mezcla reactiva

Se puede observar que la concentración de AGV en el primer periodo donde se trabajó con el primer digestor es muy alta lo que está estrechamente relacionado con el descenso de pH a rangos inhibitorios para las bacterias metanogénicas llegando a valores de 4500 mg Ac/L. En el segundo periodo donde se trabajó con el segundo digestor se observó una caída muy importante en los valores de AGV que llegaron a 1200 mg<sub>Ac</sub>/L lo cual indica que el equilibrio de la degradación metanogénica se está reestableciendo y que existe una mínima acumulación de AGV.

En el caso de la alcalinidad se puede observar que para el primer periodo los valores se encuentran en un rango de máximo 500 mg<sub>CO3</sub>/L lo que indica que el digestor no alcanza a regular los cambios de pH, es decir su capacidad buffer se ha visto afectada. En el segundo periodo la alcalinidad toma valores mayores y los AGV descienden lo que indica que el digestor está ejerciendo un efecto buffer para evitar fluctuaciones abruptas de pH con su consecuente inhibición de los microorganismos.

### 5.5 Balance de masa dentro del reactor

El balance de masa dentro del reactor permite conocer la cantidad de materia orgánica que ingresa al proceso, la que es transformada a biogás, y la que no pudo ser transformada y se acumula dentro del reactor.

En general, en un balance de masa se toman en consideración los siguientes parámetros: el flujo de entrada, el flujo de salida, la cantidad de materia consumida y la cantidad acumulada, de la siguiente manera.

$$A = E - S - \frac{G}{C} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Dónde:

A: cantidad de materia orgánica acumulada  $\left[ \frac{kg_{DQO}}{d} \right]$

E: cantidad de materia orgánica que entra  $\left[ \frac{kg_{DQO}}{d} \right]$

S: cantidad de materia orgánica que sale  $\left[ \frac{kg_{DQO}}{d} \right]$

$\frac{G}{C}$ : generación o consumo de materia orgánica  $\left[ \frac{kg_{DQO}}{d} \right]$

Para realizar el balance de masa solamente se toma en cuenta la segunda fase de operación con el nuevo biodigestor ya que en esta fase se logró la estabilización de los parámetros operacionales para el proceso.

Para el cálculo del consumo de materia orgánica se utiliza la ecuación cinética de degradación de desechos de fruta en la digestión anaerobia. La ecuación se muestra a continuación (29)

$$-R_A = k_A C_A^{3.3} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Donde

$$R_A: \text{velocidad de producción de biogás} \quad \left[ \frac{\text{kg}_{DQO} \text{ deg radado}}{\text{m}^3 \text{ d}} \right]$$

$$k: \text{constante cinética de velocidad} \quad \left[ \text{d}^{-1} \right]$$

$$C_A: \text{concentración de DQO dentro del reactor} \quad \left[ \frac{\text{kg}_{DQO}}{\text{m}^3} \right]$$

Los resultados obtenidos del balance de masa se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 5.4: Balance de masa para el reactor**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tiempo de operación [d]	120
Volumen de alimentación [m <sup>3</sup> /d]	0,73
Producción de biogás [m <sup>3</sup> /d]	4
Carga orgánica [kg <sub>DQO</sub> /m <sup>3</sup> d]	0,35
Entrada [kg <sub>DQO</sub> /d]	8,15
Salida [kg <sub>DQO</sub> /d]	0
Consumo [kg <sub>DQO</sub> /d]	0,39
Acumulación [kg <sub>DQO</sub> /d]	7,76

Se puede observar que la cantidad de materia orgánica consumida durante el proceso de digestión anaerobia es bastante baja, lo que indica una ineficiencia en el proceso. Esto se debe principalmente a la inexistente reducción de tamaño de partícula del sustrato alimentado lo que minimiza el área de contacto entre los microorganismos y el sustrato volviendo el proceso de degradación muy lento.

## **5.6 Problemas presentados durante el arranque**

Durante el arranque de la planta de digestión anaerobia hubieron una serie de problemas operacionales y de equipos los cuales se detallan a continuación.

### **5.6.1 Sistema de pre-tratamiento**

Dentro del sistema de pre-tratamiento se encuentra el sistema de almacenamiento y transporte de desechos de fruta y estiércol, el sistema de reducción de tamaño de

partícula para la materia prima, el sistema de homogeneización de la alimentación y el sistema de filtración de la alimentación.

Dentro del sistema de transporte y almacenamiento de materias primas se ha observado que los tanques de almacenamiento se encuentran sobredimensionados para la cantidad de desechos de fruta y estiércol que se considera alimentar diariamente. Por otra parte, los tanques poseen orificios muy pequeños para el abastecimiento de los tornillos sin fin de transporte de los sustratos lo que dificulta la recogida de la materia prima por el tornillo y es necesario una ayuda mecánica externa para lograr un proceso eficiente.

Por otra parte, los tornillos sin fin de transporte no funcionan para materias primas diluidas y generalmente el estiércol alimentado se encontraba diluido por lo que era imposible su transporte por medio del tornillo y era necesario colocar el estiércol directamente en la trituradora. Por otra parte, cuando dentro de la materia prima se encontraba alguna impureza en forma de piedras o residuos sólidos duros se corría el riesgo de que los tornillos se atascaran.

El sistema de reducción de tamaño de partícula era el que más problemas presentaba ya que no se lograba una reducción óptima del tamaño de partícula. Por otra parte, la cámara donde caía el producto después de pasar por las mandíbulas hacia el pulidor/picador se llenaba de residuos por lo que después de dos o tres procesos de alimentación la trituradora se taponaba y la solución era el desarmado total del equipo lo que vuelve el proceso totalmente ineficiente mientras que la reducción de tamaño es casi nula.

El sistema de homogeneización de la alimentación no presentaba mayores problemas que no fueran causados por la ineficiencia en el proceso de reducción de tamaño de partícula que conllevaba al eventual taponamiento de la bomba de transporte entre el tanque de homogeneización y el tanque del tamiz vibratorio.

En cuanto al tamiz vibratorio los problemas principales son que debido a la falta de reducción de tamaño óptima, las fibras que llegan al tamiz son muy grandes taponando eventualmente los orificios del tamiz. Por otra parte, el sistema de vibración es ineficiente ya que el objetivo principal es que las fibras recorran el tamiz hacia el tanque de acumulación de fibras mientras el líquido es mantenido en este proceso.

La bomba de transporte de la alimentación hacia el biorreactor no sufre mayores inconvenientes, pero muy pocas veces se observó un taponamiento debido a la presencia de sólidos con un tamaño de partícula muy grande debido a la ineficiencia en el proceso de trituración.

En general, los problemas que se pueden observar durante el pre-tratamiento de las materias primas para el proceso de digestión anaerobia se deben a la ineficiente

reducción de tamaño de partícula, por lo que una mejora en este sistema lograría una enorme mejora en el sistema de pre-tratamiento en general.

### **5.6.2 Sistema de post- tratamiento**

El sistema de post-tratamiento se divide en dos tipos: el post-tratamiento del biol producido y el proceso para el biogás producido.

El post-tratamiento del biol consiste en la estabilización con calor a 70°C para eliminar bacterias que se puedan encontrar dentro del biol y así evitar contaminación logrando un biol de calidad comercial. El principal problema que se encuentra en este sistema es que no se logra llegar a 70°C dentro del estabilizador lo que impide la eliminación de bacterias en el biol obtenido.

El sistema de post-tratamiento de biogás consiste en un filtro desulfurizador, un filtro deshumidificador y el sistema de almacenamiento y compresión del biogás. El principal problema que presenta este sistema es que no se logra controlar las fugas en el gasómetro a pesar de las pruebas y los arreglos que se hicieron. Posteriormente, se construyó un nuevo gasómetro en poliuretano presentándose problemas de porosidad en el material, lo que hacía que el biogás almacenado se pierda.

Son muy importantes los sistemas de post-tratamiento de biol y biogás ya que para el biol garantizan la calidad del producto final comercial mientras que para el biogás permiten su aprovechamiento energético dentro de la planta.

### **5.6.3 Sistema de calentamiento**

Para el control de la temperatura en el biodigestor se utiliza un intercambiador de calor de tubo y carcasa, y un sistema de calentamiento del agua que pasará por el intercambiador de calor que se compone de un calefón y el calderín.

El principal problema que se presenta es la falta de aislamiento en los sistemas de transporte de agua caliente, lo que volvía al sistema de calentamiento muy ineficiente ya que cuando fluía el agua caliente por las tuberías se pierde energía térmica y hasta llegar al intercambiador de calor. La solución a este problema se da al realizar el aislamiento de todas las tuberías por las que circula fluido caliente, pero no se pudieron observar los resultados de esta mejora técnica ya que el tiempo de experimentación ya se había terminado cuando se realizó el aislamiento.

Otro de los problemas importantes dentro del sistema de calentamiento es que el agua que se calienta en el calefón y calderín debe abastecer las necesidades térmicas tanto del intercambiador de calor como del estabilizador. Pero se observó en algunas pruebas que, a pesar de que el agua de calentamiento lograba llegar a temperaturas de

74°C en el transcurso de cuatro horas a partir del encendido del calefón y calderín, no se tenía un intercambio de calor eficiente que permita la regulación de la temperatura en la mezcla reactiva dentro del biodigestor. Así como tampoco se lograba la estabilización del biol obtenido.

El control de temperatura dentro del biodigestor es una de las etapas cruciales dentro de la digestión anaerobia ya que la temperatura está estrechamente ligada con la velocidad de degradación del sustrato que ingresa durante la alimentación. La planta de digestión anaerobia ubicada en Latinoamericana de Jugo S.A. está diseñada para trabajar en el rango mesofílico (25°C-45°C) por lo que al tener temperaturas de operación más bajas que en ese rango, automáticamente se necesita un TRH mayor para lograr una degradación eficiente de los desechos.

## 6 Conclusiones y Recomendaciones

Durante este estudio se realizó el arranque de la planta semi-industrial de digestión anaerobia ubicada en Latinoamericana de Jugos S.A con el fin de lograr una operación estable y analizar los parámetros de riesgo durante el estudio que duró 223 días iniciando el 5 de enero de 2013 y terminando el 16 de agosto del mismo año.

Para la operación se trabajó con dos reactores, el primero construido en lámina de acero inoxidable AISI 304 de 3mm de espesor el cual debido a deformaciones que sufría al ser expuesto a presión debió ser reemplazado por otro que soporte el esfuerzo producido. Se calculó que el espesor mínimo que soportaría la operación sería 3,2 mm por lo que el nuevo digestor se encuentra dentro de un espesor apropiado para la operación bajo esas condiciones.

Para la alimentación del biodigestor se utilizó una mezcla de desecho orgánico vegetal y animal triturado. El desecho vegetal consistía de desechos de fruta generados durante la producción de pulpa de fruta dentro de la planta. El desecho orgánico animal consistía, por su parte, principalmente de estiércol bovino filtrado y diluido.

Durante el estudio se midieron y controlaron varios parámetros dentro de cada uno de los dos periodos de operación. Es importante mencionar que durante el tiempo de construcción e instalación del segundo reactor hubo un paro en la operación de 61 días los cuales no se consideraron para análisis y cálculos.

Dentro de los parámetros de control se encuentran pH de la alimentación y de la mezcla reactiva, tiempo de residencia hidráulico, volumen de alimentación, carga orgánica diaria, DQO de la alimentación y mezcla reactiva, cantidad de aditivos, sólidos totales, sólidos orgánicos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos volátiles totales, alcalinidad, concentración de ácidos grasos volátiles y biogás generado.

Todos estos parámetros fueron analizados con el fin de encontrar un método de operación que optimice el proceso de digestión anaerobia dentro de la planta. Mientras se obtiene los diferentes parámetros que afectan el funcionamiento y la eficiencia de la degradación de materia orgánica para convertirla en biogás dentro del digestor

El pH es uno de los parámetros más importante para el óptimo funcionamiento del reactor, ya que se encuentra directamente relacionado con el complejo equilibrio del sistema biológico de degradación. Ya que, a pH muy bajos existirá una notable inhibición de las bacterias metanogénicas traduciéndose en una baja producción de biogás. Es por esto, que se debe mantener el pH dentro del rango de operación óptima (6,5 – 7,5) para evitar un malfuncionamiento del sistema de digestión.

Durante el arranque de la planta se comenzó a regular los parámetros de manera gradual hasta llegar a valores óptimos de operación. Con la regulación gradual se

evita que los microorganismos mueran debido al estrés de un cambio brusco de condiciones y el sistema colapse.

La adición de cal se dio debido a la necesidad de regular el pH dentro del reactor. Por lo que, desde la primera fase de experimentación se añadió el aditivo para controlar de manera gradual que el pH se encuentre en el rango óptimo de operación.

Debido a la regulación de pH utilizando cal se concluyó que se tiene un aditivo que ayuda a la óptima operación y que además es de fácil adquisición y aplicación. Es así, que durante la primera fase de experimentación se utilizó de manera intermitente cal para la regulación de pH. Mientras que, en la segunda fase la adición de 2 kg cal al proceso era continúa.

En cuanto al tiempo de residencia hidráulico es importante mencionar que sólo se tomó en cuenta el periodo de operación con el segundo reactor debido a la baja o nula alimentación que hubo en el primer periodo y se concluyó que el proceso de digestión anaerobia no estaba siendo eficiente ya que existen valores de TRH que llegan hasta 51 días mientras que el rango óptimo es 20 a 30 días.

El volumen de alimentación hacia el reactor se mantuvo casi constante durante la operación, pero se puede observar que se fue cambiando paulatinamente las relaciones fruta y estiércol hasta llegar a una relación 4:1, la cual se considera óptima.

Es importante rescatar que durante la operación con el segundo reactor se utilizó una mínima cantidad de agua en la alimentación, debido a que la mezcla reactiva se encontraba muy diluida por lo que se utilizaba el propio biol recirculado el que reingresaba con la alimentación.

En cuanto a la carga orgánica de alimentada se mantuvo en un rango entre 0,2 y 0,5 [ $\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3 \text{ d}$ ] lo cual es característico de los procesos de arranque ya que se busca mantener algunos parámetros constantes y observar la variabilidad de otros.

La cantidad de biogás producida durante el periodo de operación fue muy fluctuante, pero se puede observar que a partir del día 194 de operación donde ya se había tapado una fuga importante de biogás se logró un aumento considerable en la producción diaria, lo que indica que sí existía un proceso de conversión de la materia orgánica en biogás.

En cuanto al DQO de la alimentación y de la mezcla reactiva se pudo observar que en un principio no existía una degradación significativa mientras que en el segundo periodo se observó un cambio en la tendencia y comenzó a degradarse el DQO alimentado.

En el caso de los sólidos, en general, se pudo observar que no cumplen el valor para la operación óptima del digestor lo que se debe principalmente a problemas en el sistema de reducción de tamaño.

En base a lo estudiado durante la tesis es posible realizar las siguientes recomendaciones para el arranque y puesta en marcha de la planta:

- Se debe mejorar el sistema de control de temperatura ya que este parámetro limita la velocidad de degradación de la materia orgánica para producir biogás.
- Se debe instalar un sistema de reducción de tamaño de partícula eficiente que ayude a evitar problemas de obstrucción en las bombas y tuberías de fluidos a la vez que aumenta el área de contacto entre los microorganismos y el sustrato mejorando la digestión anaerobia.
- Se debe mejorar el sistema de estabilización de biol ya que ayudaría a la eliminación de agentes patógenos en el biol a comercializarse.
- Es importante el arreglo y puesta en funcionamiento del sistema de almacenamiento y post-tratamiento del biogás para poder aprovecharlo energéticamente.

## 7 Referencias Bibliográficas

1. **Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.** ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO. [En línea] <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/55.pdf>.
2. **Universidad Nacional de Educación a Distancia.** Los residuos urbanos y su problemática. [En línea] [Citado el: 10 de 08 de 2013.] <http://www.uned.es/biblioteca/rsu/pagina1.htm>.
3. **BLANCO COBIÁN, DANIEL.** TRATAMIENTO BIOLÓGICO AEROBIOANAEROBIO-AEROBIO DE RESIDUOS GANADEROS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS Y COMPOST. [En línea] [Citado el: 10 de 04 de 2013.] <https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/1066/Tesis.pdf?sequence=1>.
4. **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD IZTAPALAPA.** DEGRADACIÓN Y ESTABILIZACIÓN ACELERADA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) POR TRATAMIENTOS AEROBIOS Y ANAEROBIOS. [En línea] 11 de 2007. [Citado el: 10 de 04 de 2013.] [http://www2.ine.gob.mx/dgcenica/descargas/informe\\_tecnico\\_dgcenica\\_2007\\_08.pdf](http://www2.ine.gob.mx/dgcenica/descargas/informe_tecnico_dgcenica_2007_08.pdf).
5. **Agencia Andaluza de la Energía.** Estudio Basico del Biogas. [En línea] 09 de 2011. [Citado el: 10 de 04 de 2013.] [http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/estudio\\_basico\\_del\\_biogas\\_0.pdf](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/estudio_basico_del_biogas_0.pdf).
6. **Ministerio de Coordinación de la Producción, Empleo y Competitividad .** InnovaEcuador. *Quienes somos.* [En línea] <http://www.innovaecuador.gob.ec/index.php?module=Pagesetter&func=viewpub&tid=2&pid=4#sthash.GZBJ1PmQ.dpuf>.
7. **OLADE .** *Manual del Biogás.* Santiago de Chile : s.n., 2011.
8. *Anerobic Digestion of Biomass for Methane Production: A Review.* **Gunaseelan, Nallathambi.** Coimbatore : Biomass and Bioenergy, 1997, Vol. 13.
9. *Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant.* **Scanoa, Efisio Antonio , y otros, y otros.** Cagliari : Energy Conversion and Managment, 2013, Vol. 77.
10. **Satoto, Ender Nayono.** *Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste for Energy Production.* Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2010.

11. **van Haandel, Adrianus y van der Lubbe, Jeroen.** *Handbook Biological Wastewater Treatment.* Leidschendam : Uitgeverij Quist, 2007.
12. **Kaparaju, Prasad y Rintala, Jukka.** *Generation of heat and power from Biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells.* Tampere : Woodhead Publishing Limited, 2013.
13. **Aparcana Robles, Sandra.** *Estudio sobre el Valor Fertilizante de los Productos del Proceso de "Fermentación Anaeróbica" para la producción de Biogás.* Lima : s.n., 2008.
14. **Al Seadi, Teodorita , y otros, y otros.** *Biogas Handbook.* Esbjerg : s.n., 2008.
15. **Varnero Moreno, María Teresa.** *Manual del Biogás.* Santiago de Chile : s.n., 2011.
16. **Sistema Biobolsa. Interior de la República Mexicana.** *Manual de Biol.* México D.F. : s.n.
17. **Instituto de Ingeniería Rural (INTA).** *Manual para la Producción de Biogás.* Buenos Aires : s.n., 2010.
18. **US Energy Information Administratio.** International Energy Statistics. [En línea] [Citado el: 7 de 04 de 2014.] <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=6&pid=29&aid=12>.
19. *Inhibition of anaerobic digestion process: A review.* **Chen, Ye, Cheng, Jay J. y Creamer, Kurt S.** North Carolina : Elsevier, 2007, Vol. 99.
20. *Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Processing Wastes for Biogas Production.* **Viswanath, Prema, Devi, Sumita y Nand, Krishna.** 40, Mysore : Bioresouce Technology, 1992.
21. **Puente Alarcón, Pedro.** *Estudio de la Digestión Anaeróbica de Desechos de Fruta en la Planta Piloto del Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas .* Quito : Tesis, 2013.
22. **Lee, C. C.** *Environmental Engineering Dictionary.* Oxford : Scarecrow Press Inc., 2005.
23. *Effect of Total Solids Concentration of Municipal Solid Waste on the Biogas Produced in an Anaerobic Continuous Digester.* **Hilkiah Igoni, A., y otros, y otros.** Port Harcourt : Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, 2008, Vol. X.
24. **Spellman, Frank R.** *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations.* Boca Raton : CRC Press, 2009.

25. **Keuk Dong Ki Jeon.** Product Specifications. [En línea] [Citado el: 15 de 04 de 2014.] [http://www.gas-meter.com/new/english/sub2\\_01\\_1a.htm](http://www.gas-meter.com/new/english/sub2_01_1a.htm).
26. **United States Environmental Protection Agency EPA.** Environmental Regulations and Technology. *Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*. [En línea] 07 de 2003. [Citado el: 15 de 04 de 2014.] <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r92013/625R92013.pdf>.
27. **M.M.J. .** Diseño de una Columna de DME. Cartagena : s.n., 2005.
28. *Análisis de la deformabilidad del acero inoxidable AISI 304 DDQ en condiciones multiaxiales de embutición. Evaluación de la influencia de la acritud inicial.* **Coello, J., y otros, y otros.** 5, Castilla : Revista de Metalurgia, 2010, Vol. 46. 0034-8570.
29. **Cabrera, Karla.** *Estudio Cinético de la Digestión Anaerobia de Mezclas de Desechos de Fruta.* Quito : s.n., 2010.
30. **Serrano, Javier.** *La Jugosa.*

## **8 Anexos**

### 8.1 Análisis de Biol llevado a cabo en el INIAP



**INIAP**

INSTITUTO NACIONAL AUTÓNOMO DE INVESTIGACIONES AGRICOLAS  
 ESTACION EXPERIMENTAL SANTA CATALINA  
 DEPARTAMENTO DE NUTRICION Y CALIDAD  
 LABORATORIO DE SERVICIO DE ANALISIS E INVESTIGACION EN ALIMENTOS  
 Pucallanca Sur Km. 1, Callaguala/Tr. 200009-3007134 Fax 3007134  
 Callao postal 11-01-340



**L.S.A.I.A.**

**NOMBRE PETICIONARIO:** Ing. Daniela Almeida  
**DIRECCION:** Universidad Los Chiles  
**FECHA DE EMISION:** 24 de septiembre del 2013  
**FECHA DE ANALISIS:** 20 de septiembre del 2013

**INFORME DE ENSAYO No. 13-380**  
**INSTITUCION:** Universidad San Francisco  
**ATENCIÓN:** Sra. Ana Helen Cueva  
**FECHA DE RECEPCION:** 12 de septiembre del 2013  
**HORA DE RECEPCION:** 14h40  
**ANALISIS SOLICITADO:** Mirasoles, Azúfre

ANALISIS	Ca	P	Mg	K	Na	IDENTIFICACION
METODO	MO-LSAIA-03-01-02	MO-LSAIA-03-01-02	MO-LSAIA-03-01-02	MO-LSAIA-03-01-02	MO-LSAIA-03-01-02	
METODO REF.	U. FLORIDA 1980					
UNIDAD	mg/100ml	mg/100ml	mg/100ml	mg/100ml	mg/100ml	
13-1815	57.57	1.09	0.93	42.81	4.87	Biol-Esteroid de vicia más desecho de fruta
ANALISIS	Cu	Fe	Mn	Zn	AZUFRE	
METODO	MO-LSAIA-03-02	MO-LSAIA-03-03	MO-LSAIA-03-03	MO-LSAIA-03-03	MO-LSAIA-03	
METODO REF.	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	U. FLORIDA 1980	AOAC 1975	
UNIDAD	ppm/100ml	ppm/100ml	ppm/100ml	ppm/100ml	ppm/100ml	
13-1815	36	153	150	78	N.D.	

Los ensayos marcados con D se reportan en base seca  
**OBSERVACIONES:** Muestra entregada por el cliente  
 N.D. No Detectada

RESPONSABLES DEL INFORME

  
**Dr. Amintador Rubio**  
 RESPONSABLE DE CALIDAD

  
**Dr. MSc. Man Samartigo**  
 RESPONSABLE TECNICO



Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.  
 Los resultados serán válidos solo según reportados con el objeto de ensayo.  
 NOTA DE CIRCUNSTANCIA: La información contenida en este informe de ensayo es de carácter confidencial, así elegido únicamente al laboratorio de la misma y solo podrá ser usada por ella. Si el lector de este informe electrónico o ha no es el laboratorio del mismo, se le notifica que cualquier copia o distribución de este se encuentra totalmente prohibido. Si usted ha recibido esta informe de ensayo por error, por favor notificar inmediatamente al laboratorio por email, teléfono, fax y eliminar la información.

## **8.2 *Procedimientos de Análisis***

**8.2.1 Determinación del porcentaje de metano en biogás**

**8.2.2 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno**

**8.2.3 Sólidos Totales y Sólidos Orgánicos totales**

**8.2.4 Sólidos Totales suspendidos y sólidos volátiles suspendidos**

**8.2.5 Alcalinidad**

**8.2.6 Ácidos Grasos Volátiles**

### Porcentaje de metano en el biogás

Este análisis se encuentra estrechamente ligado con la calidad del biogás obtenido. El metano es el gas importante dentro de la composición del biogás ya que permite su combustión y su aprovechamiento energético.

#### Materiales

Jeringuilla de plástico de 60 ml

Probeta graduada de 100ml

Recipiente hondo para análisis

#### Reactivos

Solución de NaOH al 4%

#### Procedimiento

1. Armar el equipo de desplazamiento de gases en líquidos.
2. Tomar una muestra de 60 ml de biogás en la jeringuilla.
3. Permitir el desplazamiento del biogás a través de la solución de hidróxido de sodio.
4. Medir la cantidad de líquido desplazado por el metano presente en el biogás.

El porcentaje de metano presente en el biogás se calculará de la siguiente manera

$$\%CH_4 = \frac{V_L}{V_B} * 100$$

Donde

$V_L$  volumen de líquido desplazado por el metano en el biogás [ml]

$V_B$  volumen de la muestra de biogás tomada para el análisis [ml]

## **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Esta medida se encuentra estrechamente relacionada con la cantidad de materia orgánica disponible dentro de la muestra y que puede ser degradada por las bacterias que participan dentro del proceso de digestión anaerobia. La materia orgánica será convertida principalmente metano, uno de los componentes principales del biogás.

El análisis detallado a continuación debe ser realizado para la mezcla reactiva así como para la alimentación que consiste en estiércol, fruta y agua, con el fin de analizar la cantidad de materia orgánica que ha sido consumida por los microorganismos dentro del proceso.

### **Materiales**

Viales de borosilicato

Gradilla

Probeta de 10 ml

Vasos de precipitación

Balón de aforación de 100ml

### **Equipos**

Reactor Digital Hach DRB 200

Colorímetro Hach DR 890

### **Reactivos**

Muestra a analizar

Agua destilada

Ácido sulfúrico para análisis (97%)

Solución Digestora de Dicromato de Potasio

### **Procedimiento**

1. Realizar una dilución 1:20 de la muestra con agua destilada en un balón aforado de 100ml.
2. Dejar reposar la muestra diluida durante 10 minutos.
3. Encender el Reactor Hach DRB 200 y fijar la temperatura en 150°C durante dos horas. Esto se logra eligiendo el programa automático del reactor llamado “COD” y presionando Iniciar.
4. En un vial colocar 3.5 ml de ácido sulfúrico concentrado.
5. En el mismo vial colocar 1.5ml de solución digestora de dicromato de potasio.
6. Colocar 2.5 ml de la muestra diluida en la sección media superior del balón aforado.
7. Dentro de un nuevo vial, colocar los reactivos ya descritos pero, en vez de colocar la muestra diluida se debe colocar 2.5 ml de agua destilada. Este vial se conoce como “blanco”.
8. Cerrar bien los viales y agitarlos teniendo precaución con la naturaleza exotérmica de la reacción.
9. Colocar los viales en el reactor Hach DRB 200 cuando haya sonado una alarma que posee para indicar que se encuentra listo y presionar Iniciar. Verificar que aparezca un contador que diga 120’.
10. Una vez terminado el procedimiento sonará una alarma tres veces. Dejar enfriar los viales hasta 120°C dentro del reactor.
11. Retirar el vial del reactor y dejarlo enfriar a temperatura ambiente.
12. Colocar el adaptador para viales en el colorímetro Hach. Encenderlo y verificar que se encuentre seleccionado el programa “PRG 101” que contiene la curva de calibración para análisis de DQO.
13. Colocar el “blanco” en el colorímetro y taparlo. Presionar el botón “0/Zero” y esperar que se muestre en la pantalla 0 mg/L.
14. Colocar el vial con la muestra dentro del colorímetro y taparlo. Presionar el botón “Read”.
15. Documentar el valor obtenido de la lectura de la muestra en mg DQO/L.

## **Sólidos Totales (TS)**

La determinación de la cantidad de sólidos totales es uno de los parámetros más importantes dentro de la caracterización del funcionamiento del digester. Una excesiva cantidad de sólidos acarreará problemas en los sistemas de transporte de biol, mezcla reactiva y alimentación, así como problemas de movilidad de las bacterias dentro del reactor.

Se debe controlar los TS para la alimentación y el biol extraído del biodigestor.

### **Materiales**

Crisol de 30 ml.

Probeta de 10ml.

Pinzas para crisol.

### **Equipos**

Balanza analítica

Estufa

Desecador.

### **Reactivos**

Muestra para análisis

**Procedimiento**

1. Encender la estufa y permitir que se caliente hasta 105°C.
2. Colocar los crisoles limpios dentro de la estufa durante treinta minutos a una hora.
3. Dejar enfriar los crisoles a temperatura ambiente en el desecador, pesarlos y documentar el valor.
4. Medir 10 ml de muestra en la probeta.
5. Trasvasar los 10ml de muestra al crisol.
6. Colocar el crisol en la estufa a 105°C durante 24 horas. Sacarlo y dejarlo enfriar a temperatura ambiente.
7. Pesar el crisol con la muestra seca y registrar este valor. No desechar la muestra.

La cantidad de sólidos totales se calcula así:

$$g \text{ Sólidos Totales} / L = \frac{(A - B) * 1000}{\text{Volumen de muestra [ml]}}$$
$$\% \text{ Sólidos Totales} = \frac{(A - B)}{C} * 100$$

Donde

A peso del crisol + muestra seca. [g]

B peso del crisol seco y limpio. [g]

C peso de la muestra inicial. [g]

### **Sólidos Totales Orgánicos (OTS)**

Los sólidos totales orgánicos indican la cantidad de sólidos totales que corresponden a materia orgánica. Al tratarse de materia orgánica puede ser degradada por la acción bacteriana para la generación de biogás.

Este procedimiento debe ser realizado a la mezcla reactiva y a la alimentación diaria al reactor.

#### **Materiales**

Crisol de 30 ml.

Pinzas para crisol.

#### **Equipos**

Mufla

Balanza analítica.

Desecador.

#### **Reactivos**

Muestra seca de la estufa.

**Procedimiento**

1. Encender la mufla y permitir que se caliente hasta 550 °C.
2. Tomar el crisol secado de la estufa y colocarlo en la mufla caliente durante 8 horas.
3. Sacar el crisol y dejar que se enfríe a temperatura ambiente dentro del desecador.
4. Pesar el crisol con la muestra calcinada y documentar el valor.

La cantidad de sólidos totales orgánicos se obtiene así:

$$g \text{ Sólidos Totales Orgánicos} / L = \frac{(A - B) * 1000}{\text{Volumen de muestra [ml]}}$$

Donde

A peso del crisol + muestra seca. [g]

B peso del crisol + muestra calcinada. [g]

## **Sólidos Totales Suspendidos (TSS)**

Los sólidos totales suspendidos indican la cantidad de biomasa bacteriana presente en la muestra. Para este fin se toma la fracción de la muestra que puede ser removida utilizando métodos físicos como lo son la centrifugación y la microfiltración.

Se debe realizar este análisis al biol extraído del biodigestor.

### **Materiales**

Crisol de 30ml.

Probeta de 10ml.

Pinzas para crisol.

Vial de borosilicato.

### **Equipos**

Balanza analítica.

Estufa.

Centrífuga.

Desecador.

### **Reactivos**

Muestra para análisis.

Agua destilada.

**Procedimiento**

1. Encender la estufa y permitir que se caliente hasta 105°C.
2. Colocar los crisoles limpios dentro de la estufa durante treinta minutos a una hora.
3. Dejar enfriar los crisoles a temperatura ambiente en el desecador, pesarlos y documentar el valor.
1. Medir 10 ml de muestra en la probeta.
2. Transferir 10 ml de muestra en los viales y centrifugarlos a 3400 rpm durante 30 minutos.
3. Desechar el sobrenadante.
4. Utilizando chorros de agua destilada transferir el sólido que se encuentra en la base hacia el crisol.
5. Colocar el crisol dentro de la estufa durante 24 horas.
6. Sacar el crisol de la estufa y dejar enfriar a temperatura ambiente en el desecador.
7. Pesar el crisol y documentar el valor obtenido.

La cantidad de sólidos totales suspendidos se calcula así:

$$g \text{ Sólidos Totales Suspendidos} / L = \frac{(A - B) * 1000}{\text{Volumen de muestra [ml]}}$$
$$\% TSS = \frac{(A - B)}{C} * 100$$

Donde

A peso del crisol + muestra seca. [g]

B peso del crisol seco y limpio. [g]

C peso de la muestra inicial. [g]

### **Sólidos Suspendidos Volátiles (VSS)**

Los sólidos suspendidos volátiles corresponden a la cantidad de materia orgánica presente dentro de los sólidos volátiles totales. Los dos parámetros, TSS y VSS, deben ser utilizados para la caracterización de la cantidad de biomasa presente dentro de la muestra.

El análisis de VSS debe ser realizado solamente al biol extraído del reactor.

#### **Materiales**

Crisol de 30 ml.

Pinzas para crisol.

#### **Equipos**

Balanza analítica.

Mufla.

Desecador.

#### **Reactivos**

Muestra seca de TSS.

**Procedimiento**

1. Encender la mufla y permitir que se caliente hasta 550 °C.
2. Tomar el crisol secado de la estufa y colocarlo en la mufla caliente durante 8 horas.
3. Sacar el crisol y dejar que se enfríe a temperatura ambiente dentro del desecador.
4. Pesar el crisol con la muestra calcinada y documentar el valor.

La cantidad de sólidos suspendidos volátiles se obtienen así:

$$g\ VSS / L = \frac{(A - B) * 1000}{Volumen\ de\ muestra\ [ml]}$$

Donde

A peso del crisol + muestra seca. [g]

B peso del crisol + muestra calcinada. [g]

## **Alcalinidad**

La alcalinidad está definida como la capacidad que tiene una muestra líquida para aceptar protones o también se la puede definir como la capacidad de un fluido de neutralizar ácidos presentes. Es así, que una cantidad de alcalinidad considerable es importante en el reactor ya que previene los cambios bruscos de pH los cuales pueden afectar fuertemente el comportamiento y metabolismo bacteriano.

Este procedimiento se debe realizar para el biol extraído del reactor.

### **Materiales**

Vaso de precipitación de 150ml.

Probeta de 50ml.

Viales de borosilicato.

Soporte Universal.

Pinza para bureta.

Bureta de 25ml.

### **Equipos**

Centrífuga.

Medidor de pH.

### **Reactivos**

Solución de ácido sulfúrico 0.05 M.

Muestra a analizar.

**Procedimiento**

1. Colocar la muestra en viales de borosilicato.
2. Centrifugar a 3400 rpm durante 30 minutos hasta obtener un volumen de sobrenadante de 50 ml.
3. Colocar los 50 ml dentro de un vaso de precipitación de 150ml.
4. Montar el equipo de titulación llenando la bureta con la solución de ácidos sulfúrico y colocándolos en la pinza para bureta.
5. Colocar el medidor de pH dentro del vaso que contiene la muestra.
6. Comenzar a titular agitando constantemente la mezcla.
7. Titular hasta un pH de 5,75.
8. Medir y documentar el volumen de ácido sulfúrico utilizado para la titulación.

La alcalinidad se calcula así:

$$Alc [mg CaCO_3 / L] = \frac{V_{AC} * C_{AC} * 100000}{V_{centrifugado} [ml]}$$

Donde

$V_{AC}$  volumen de ácido sulfúrico utilizado. [ml]

$C_{AC}$  concentración de la solución de ácido sulfúrico. [mol/L]