

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÓNOMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE UNA MEZCLA DE ALPERUJO CON  
RESIDUOS DE HORTALIZAS, A TRAVÉS DE UN PROCESO DE  
FERMENTACIÓN METÁNICA**

**DARÍO GUSTAVO ANDRÉS GUERRERO BENAVENTE**

Santiago, Chile  
2012

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**Memoria de Título**

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE UNA MEZCLA DE ALPERUJO CON  
RESIDUOS DE HORTALIZAS, A TRAVÉS DE UN PROCESO DE  
FERMENTACIÓN METÁNICA**

**BIOGAS PRODUCTION FROM A MIXTURE OF ALPERUJO AND VEGETAL  
RESIDUES THROUGH A PROCESS OF METHANE FERMENTATION**

**DARÍO GUSTAVO ANDRÉS GUERRERO BENAVENTE**

**SANTIAGO, CHILE  
2012**

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÓNOMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE UNA MEZCLA DE ALPERUJO CON  
RESIDUOS DE HORTALIZAS, A TRAVÉS DE UN PROCESO DE  
FERMENTACIÓN METÁNICA**

Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo

Mención: Manejo de Suelos y Aguas

DARÍO GUSTAVO ANDRÉS GUERRERO BENAVENTE

	Calificaciones
Profesor Guía María Teresa Varnero, Lic.	6,0
Profesores Evaluadores Ian Homer Banister Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,0
Marco Mora Ingeniero Agrónomo, Dr.	7,0

Santiago, Chile  
2012

## **DEDICATORIA**

Durante estos largos años de estudio, quiero dedicar a mi familia y amigos esta memoria de título, especialmente a mis padres y hermana, quienes me apoyaron en todo momento de flaqueza, en ellos encontré siempre una palabra de aliento, cariño y seguridad. También a mi hija, Camila, la fuente de energía que me permitió seguir luchando día a día para terminar mi carrera profesional.

Por último, quiero dar un reconocimiento por el apoyo de los profesores de la Facultad de Ciencias Agronómica de la Universidad de Chile, de mi departamento de Ingeniería y Suelo. En forma particular quiero agradecer al profesor Oscar Seguel por su buena voluntad a responder todas las consultas, su dedicación y sus oportunos consejos durante mi desarrollo como alumno, profesional y persona. También a la profesora María Teresa Varnero que me dio su confianza para desarrollar una tesis de grandes desafíos y, a la vez, ser un aporte a la investigación vinculada al tema de la energía renovable en Chile.

## INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
Palabras claves.....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
Keywords.....	2
<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>3</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>6</b>
Objetivos específicos.....	6
<b>MATERIALES Y METODOS</b> .....	<b>7</b>
Lugar del estudio .....	7
Materiales .....	7
Procedencia de los productos utilizados .....	7
Recopilación de información.....	8
Digestor anaeróbico y conexiones .....	8
Unidad de calefacción.....	9
Medición de biogás.....	9
Metodología.....	9
Observaciones sobre el diseño experimental.....	11
Labores de operación del digestor .....	13
Mediciones durante el proceso .....	13
Calidad y cantidad de biogás producido.....	14
Análisis estadístico .....	15
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>16</b>
Caracterización de residuos y condiciones de fermentación.....	16
Temperatura del sistema de calefacción.....	17
Análisis de datos obtenido en el biodigestor discontinuo.....	18
Temperatura .....	18
pH.....	20
Conductividad Eléctrica.....	22
Tiempo de retención hidráulica. (TRH).....	24
Composición del biogás generado.....	25

Análisis del Metano y Dióxido de Carbono del biogás .....	25
Producción total y semanal de biogás .....	29
Producción semanal de biogás .....	30
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>33</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>34</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Alperujo fresco .....	7
Figura 2. Esquema del funcionamiento del digestor.....	8
Figura 3. Funcionamiento de la unidad experimental al tiempo inicial (a) y final (b) del ensayo.....	12
Figura 4. Analizador de Gases Dragger .....	14
Figura 5. Temperatura del sistema de calefacción del (a) primer y (b) segundo tratamiento .....	17
Figura 6. Rangos de operación para organismos mesofilicos y termofilicos.....	18
Figura 7. Fluctuación de temperatura al interior de los digestores en el primer ensayo (a) y segundo ensayo (b).....	20
Figura 8. Variación del pH en cada ensayo durante el primer (a) y segundo (b) ensayo. ....	21
Figura 9. La conductividad eléctrica del primer (a) y segundo tratamiento (b).....	23
Figura 10. Evolución en la producción de metano (CH <sub>4</sub> ) del primer tratamiento .....	25
Figura 11. Evolución de la producción de metano (CH <sub>4</sub> ) segundo tratamiento.....	26
Figura 12. Evolución del Dióxido de Carbono del primer tratamiento.....	26
Figura 13. Evolución del Dióxido de Carbono del segundo tratamiento.....	27
Figura 14. Composición final de las tres repeticiones del primer tratamiento.....	28
Figura 15. Composición del biogás de las tres repeticiones del segundo tratamiento.....	28
Figura 16. Producción total de Biogás del primer tratamiento .....	29
Figura 17. Producción total de biogás segundo tratamiento .....	30
Figura 18. Producción semanal de biogás del primer tratamiento .....	31
Figura 19. Producción semanal de biogás del segundo tratamiento .....	31

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de cada uno de los residuos .....	16
Cuadro 2. Características de las mezclas usadas en los biodigestores.....	16
Cuadro 3. Relación entre el periodo de fermentación y la temperatura. Adaptado de Vargas (2005) .....	19
Cuadro 4. El tiempo de inicio del proceso y retención hidráulica de los dos tratamientos ..	24

## RESUMEN

La producción de aceite de Oliva está aumentando año a año en Chile, provocando un incremento en la generación del residuo conocido como alperujo, que por características físicas y químicas es un agente contaminante del medio ambiente. Por lo general se utiliza este desecho estabilizado mediante compostaje, aplicándolo al suelo como una fuente de nutrientes y minerales para los distintos cultivos y frutales.

Una alternativa es usar el alperujo en la producción de biogás, para lo cual es necesario mantener las condiciones óptimas durante la fermentación metanogénica, principalmente la relación C:N, sólidos totales, sólidos volátiles, temperatura, pH y conductividad eléctrica (CE), siendo necesario mezclarlo con otro tipo de residuos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de la mezcla entre el alperujo y el desecho de hortalizas, analizando la cantidad y calidad del producto obtenido al final del proceso.

El estudio se realizó en la planta piloto de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, con un tratamiento que contenía alperujo y desecho de betarraga. El tratamiento duró alrededor de 72 días y el resultado fue un gas de baja calidad con un porcentaje de metano inferior al 40% y una cantidad inferior a 3 litros de gas, principalmente por problema de al inicio del proceso con la temperatura y posible dificultades en generar colonias con bacterias metanogénicas. Debido a esto, se realizó nuevamente el ensayo, agregando guano de bovino fresco. Los resultados fueron significativamente distintos, ya que, el ensayo duró alrededor de 60 días y se obtuvo un gas de buena calidad con un porcentaje de metano mayor al 55% y una cantidad por sobre de 25 litros de gas. La clave para mantener un proceso óptimo fue mantener la relación C:N en 30:1, trabajar a temperatura mesofílica y utilizar guano de bovino como una fuente de inoculos.

**Palabras Claves: Alperujo, desecho de beterraga, producción de biogás, fermentación anaeróbica, guano de bovino.**

## ABSTRACT

The Olive oil production is increasing every year in Chile, triggering an increase in waste generation known as alperujo, that physical and chemical characteristics is an environmental pollutant. Usually this is used stabilized waste through composting, applying it to the soil as a source of nutrients and minerals for different crops and fruit trees.

An alternative is to use the alperujo in biogas production, which is necessary to maintain optimum conditions for methanogenic fermentation, mainly the C: N, total solids, volatile solids, temperature, pH and electrical conductivity (EC), being be mixed with other waste. The objective of this study was to evaluate the potential of mixing between the alperujo and vegetable waste, analyzing the amount and quality of the product obtained at the end of the process.

The study was conducted in the pilot plant of the Faculty of Agricultural Sciences, University of Chile, with a treatment containing waste alperujo and beetroot. The treatment lasted about 72 days and the result was a low quality gas with a methane percentage of less than 40% and an amount less than 3 liters of gas, mainly due to problems with the process start temperature and possible difficulties in methanogenic bacteria produce colonies. Due to this, the test was performed again by adding fresh bovine manure. The results were significantly different, since the test lasted about 60 days and achieved a good quality gas with a methane content higher than 55% and an amount of about 25 liters of gas. The key to maintaining optimal process was to keep the C: N 30:1, work mesophilic temperature and use cattle manure as a source of inoculum.

**Keywords: alperujo, beet waste, biogas production, anaerobic fermentation of cattle manure.**

## INTRODUCCIÓN

El aceite de oliva es un alimento que posee grandes cualidades nutricionales benéficas para la salud, así mismo contiene características organolépticas y gastronómicas dependiente del contenido y composición de ácidos grasos. Por otra parte, los residuos industriales obtenidos en la fabricación del aceite de oliva pueden ser parte de la alimentación en animales, utilizarse como fertilizante o incluso para generar energía útil y renovable (ODEPA, 2008).

En la producción de aceite de oliva, dependiendo del método de extracción utilizado se obtienen como productos finales el aceite extra virgen; el alpechín, que es la mezcla de agua y aceite que se consigue de este proceso; el orujo, que es la sustancia que se genera por la presión del fruto obtenida por un proceso de 3 fases, mientras que el alperujo es la mezcla del alpechín y el orujo, obtenidos del proceso de 2 fases de centrifugado (Aparicio y Harwood, 2003). Aranda (2006) señala que en la producción de aceite de oliva, por cada 100 toneladas de aceitunas, se obtienen 80 toneladas de alperujo. Este residuo es una mezcla compleja constituida por piel, pulpa y hueso con alto grado de humedad, el cual se obtiene de materiales crudos, por tanto, sus propiedades químicas se ven determinadas según las condiciones climáticas de la cosecha, la variedad del olivo o el grado de maduración del fruto.

El alperujo contiene sales minerales, un pH ligeramente ácido y un alto contenido de materia orgánica, por lo mismo puede ser considerado como un abono mineral para ciertas plantas. A su vez, presenta un contenido de K alto, pero bajo de N, P, Ca y Mg en comparación con otros tipos de enmiendas orgánicas. En cuanto a la proporción de micronutrientes, el contenido de Mn es variable, presenta alto contenido de Fe y cantidades considerables de Zn y Cu, aunque en menor proporción respecto al Fe. La mayoría de los constituyentes orgánicos que presenta dicho residuo son lignina, hemicelulosa y celulosa. Por lo tanto, es un residuo fundamentalmente lignocelulósico, que posee alrededor de un 5% a 9% de aceite (Alburquerque *et al.*, 2004).

Dada su composición vegetal y su contenido de materia orgánica, se puede utilizar como enmienda de suelo. El uso del alperujo como acondicionador ayudaría a recuperar los niveles de materia orgánica de los suelos que se pierde continuamente por la labranza y que genera cambios en la estructura del suelo. Sin embargo, el alperujo no puede ser aplicado directamente en los suelos como abono, ya que causa efectos fitotóxicos derivados de sustancias fenólicas. Además, presenta una relación carbono: nitrógeno (C/N) mayor de 50/1, dificultando su aplicación en los cultivos, puesto que favorece la inmovilización del nitrógeno (Galleguillos, 2008). De esta forma, la aplicación directa del alperujo afecta a las propiedades químicas y estructurales del suelo (Aranda, 2006).

Una alternativa para la utilización del alperujo es incorporarlo al ciclo de la energía renovable a través de la cogeneración de energía con residuos orgánicos procedentes de la

agricultura y la agroindustria. En este proceso se consigue energía eléctrica y/o mecánica y térmica a partir de una misma fuente. El alperujo seco y extractado presenta un poder calorífico de 400 Kcal/kg. A su vez, puede ser utilizado en la producción de biogás a partir de un proceso biotecnológico de digestión anaeróbica (Aranda, 2006). En este sentido, aproximadamente entre el 40 y 50 % de la materia orgánica es transformada en biogás, el cual puede ser usado para producir energía eléctrica y calor; además, su ventaja es la baja producción de lodo (TDC Olive, 2005).

Traub (2008) define al biogás como un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, a causa de las reacciones de biodegradación de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos y de otros factores, en ausencia de oxígeno. Se denomina biomasa a toda la materia orgánica que proviene de desechos de animales (estiércol), árboles, plantas, desechos orgánicos que pueden ser convertidos en energía; o los provenientes de la agricultura (residuos de maíz, trigo, café, arroz, papas, etc.), de aserraderos y de los residuos urbanos (Páramo, 2008). El biogás está compuesto por un 50% a 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ) y un 30% a 50% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) conteniendo pequeñas cantidades de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), vapor de agua, amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), pudiendo existir otros compuestos azufrados como mercaptanos y silanos, sulfuro de carbonilo y disulfuro de carbono. En casos puntuales se ha detectado la presencia de trazas de compuestos orgánicos, hidrocarburos superiores al metano como, propano y butano, en cantidades muy variables que dependen de múltiples factores (Anónimo, 2007). El biogás tiene como promedio un poder calorífico que fluctúa entre 4.700 y 5.500 kilocalorías por metro cúbico (Varnero, 1992). Este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas a gas, en hornos, estufas, secadores, calderas u otros sistemas de combustión a gas debidamente adaptados para tal efecto (Decap, 2006).

El proceso anaeróbico para la producción de biogás consta de tres etapas fundamentales que ocurren simultáneamente: la fase de hidrólisis, acetogénesis y la metanogénica. La hidrólisis es la fase en la cual las bacterias hidrolíticas actúan sobre los compuestos orgánicos de gran tamaño del sustrato, tales como celulosa, almidones y grasas, entre otras, transformándolos por hidrólisis en compuestos orgánicos solubles (Angelidaki, 1997). La acetogénesis es la fase donde los productos de la etapa anterior son transformados en acetato, hidrógeno y  $\text{CO}_2$  por un grupo de bacterias que aportan aproximadamente el 54% del hidrógeno que se utilizará en la formación de metano. La función de estos microorganismos en el proceso de digestión anaerobia es generar los sustratos (Hidrógeno,  $\text{CO}_2$  y acetato) para las bacterias metanogénicas (Veeken y Sanders, 2002). Finalmente en la fase metanogénica actúan bacterias especializadas, degradando estos ácidos y alcoholes, obteniéndose como producto final del proceso metabólico gas metano, principal componente del biogás (Villalobos, 2009)

La producción de biogás se genera a partir de un biodigestor, equipo encargado de producir la fermentación y convertirla en el llamado biogás. Este sería el producto principal, pero se pueden obtener derivados, como abonos fertilizantes de alto contenido de nitrógeno, carbonato de calcio y dióxido de carbono comprimido. Los biodigestores son sistemas

diseñados para optimizar la producción de biogás por medio de desechos orgánicos, lo que permite obtener energía limpia, renovable y de bajo costo (Rivas *et al*, 2010). El biodigestor es un elemento de diferentes formas, tamaños, materiales, pero con el mismo principio de funcionamiento, donde se deben tomar en cuenta factores tales como la temperatura, la alcalinidad, la relación líquido: sólido, la relación C: N y el tiempo de retención hidráulica. Los biodigestores convencionales son utilizados generalmente para tratar sustratos concentrados con alto contenido de sólidos, como estiércol de bovinos, porcinos y otros materiales orgánicos. Aliaga (2006) señala que el biodigestor de polietileno de baja densidad tiene como principales ventajas su bajo costo, fácil implementación; sencillo manejo y mantenimiento.

El biogás que se consigue gracias a la utilización de biodigestores genera una energía limpia que potencialmente disminuiría la demanda de leña y por lo tanto la tala indiscriminada, evitaría la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera ( $\text{CH}_4$  y otros), reduciría el riesgo de transmisión de enfermedades (cuando utilizamos excretas para producción de biogás), y funcionaría como un sistema de depuración de aguas, evitando contaminación de ríos y otros receptores (Aliaga, 2006).

Hilbert (2000) señala que los principales factores que afectan a la producción del gas son: el tipo de sustrato, ya que las materias primas fermentables incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias, restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas; la temperatura del sustrato, pues para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de  $4^\circ$  a  $5^\circ$  C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de  $70^\circ\text{C}$ ; la carga volumétrica, es decir, el volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor, valor que tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención y; el tiempo de retención hidráulico, parámetro que sólo puede ser claramente definido en los “sistemas discontinuos o batch” donde el tiempo de retención coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención hidráulica o fermentación para obtener una buena producción de biogás (Varnero, 1992).

Aliaga (2006) señala además que los microorganismos encargados de la biodigestión presentan la máxima actividad en diferentes rangos de pH, por ejemplo las bacterias hidrolíticas trabajan mejor entre pH 7,2 y 7,4; acetogénicos entre pH 7,0 y 7,2 y metanogénicos entre pH 6,5 y 7,5. Por ello es deseable un pH de 6,5 a 7,5. La relación C: N debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 30/1. Valores mayores a este pueden crear problemas de inhibición y valores menores disminuyen la velocidad de reacción. La concentración del sustrato y la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. Por otro lado la literatura señala datos de producciones de gas importantes logradas en rellenos sanitarios con un alto contenido de sólidos. La agitación-mezclado tiene por

objetivo remover los metabolitos producidos por las bacterias metanógenas, mezcla el sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica. Por último, es importante la presencia de compuestos inhibidores del proceso, como metales pesados, antibióticos y detergentes.

Si bien el alperujo es un potencial generador de biogás, necesita ser mezclado con otra materia prima que sean capaces de reducir la relación C: N de éste, ya que para generar biogás la relación debe ser cercana a 30: 1. Por tal motivo existen diferentes posibilidades de obtener esta relación, al mezclar el alperujo con leguminosas u hortalizas, las cuales presentan una baja relación carbono/nitrógeno. Las hortalizas, por ser de ciclo vegetativo corto pueden estar disponibles con mayor facilidad para ser utilizados, encontrándose a la beterraga (*Beta vulgaris* L. var. *crassa* (Alef.) J. Helm) como un desecho útil para generar biogás, ya que tiene un alto contenido de agua, carbohidratos, proteínas, minerales y vitaminas (PROPAG, 2007).

Los altos costos de generación de energía eléctrica utilizando combustibles convencionales derivados de materiales fósiles, los costos crecientes del abastecimiento de petróleo, la contaminación ambiental por su uso, sumado al costo que involucra su obtención y su carácter finito, cuya extinción está prevista para este siglo, generan la necesidad de desarrollar proyectos que utilicen energías renovables para la generación de energía eléctrica y de calor (Moncayo, 2010). Por esta razón, el fin del presente estudio fue evaluar al alperujo mezclado con residuos de beterraga para producción de biogás, con temperaturas de 25 a 35°C (rango mesofílico). De esta forma, se busca obtener una fuente de energía renovable y al mismo tiempo utilizar los subproductos para convertirlo en una opción útil y beneficiosa para el productor.

#### **OBJETIVO GENERAL:**

- Determinar la cantidad y calidad de biogás que se produce a partir de la mezcla del alperujo y el residuo de hortaliza mediante un sistema de digestión anaeróbico.

#### **Objetivos Específicos:**

- Analizar proporción de metano del biogás, en función de la relación carbono/nitrógeno.
- Determinar el tiempo de retención hidráulica dentro de rangos mesofílicos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Lugar del estudio

El estudio se realizó en la planta piloto del Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED) y en el laboratorio de Reciclaje Orgánico de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile ubicada en la Comuna de la Pintana, región Metropolitana ( $33^{\circ} 34'$  Latitud Sur y  $70^{\circ} 38'$  Longitud Oeste). El proyecto se desarrolló entre los meses de mayo del 2010 y diciembre del 2010.

### Materiales

#### Procedencia de los productos utilizados

El alperujo usado para la investigación es de la empresa y productora de aceite de oliva Olave, ubicada en la comuna Melipilla, región Metropolitana. A partir de una visita realizada a fines del año 2009 se estableció las condiciones y el lugar donde se almacenaba el alperujo, el cual, se dejaba apilado para la obtención de compost. Para el ensayo se ocupó material fresco, por lo que se esperó a la producción de la temporada 2010, colectándose 30 kilos en el mes de abril del 2010 (Figura 1).



Figura 1. Alperujo fresco.

Se seleccionó residuo de betarraga, por generar un mayor volumen en comparación a otras hortalizas. Este fue obtenido de la feria Lo Valledor, ubicada en la Comuna de Pedro Aguirre Cerda, Región Metropolitana. Fue almacenado en sacos, en un lugar fresco sin radiación solar directa para evitar pérdidas de humedad. Por ser más perecible se retiró en mayo una cantidad aproximada de 80 kilogramo de material fresco.

## Recopilación de información

La información que se utilizó para la realización del estudio provino de literatura científica e investigaciones que permitieron determinar los parámetros de mayor relevancia en la caracterización de los elementos que se utilizaron para la producción de biogás (Villalobos, 2009). Al mismo tiempo, se establecieron los factores de control y las variables de mayor importancia en el proceso, como son: temperatura, contenido de nitrógeno y carbono, porcentaje de sólidos totales y volátiles, pH y relación C:N (USCC, 2004).

## Digestor anaeróbico y conexiones

Para el presente estudio se utilizaron tres digestores de carga discontinua (tipo batch) de material ligero (polietileno compactado de 5 mm) de 70 L cada uno con sus respectivos gasómetros dispuestos en un estanque con agua, con posibilidad de calefaccionarla. La construcción del sistema es de bajo costo de inversión, pero se necesita una alta precisión en las conexiones, ya que se debe de evitar la posibilidad de pérdidas de gas de fugas por un mal ensamblaje.

En la parte superior presenta dos salidas, una para evacuar el gas hacia el gasómetro y la otra va un manómetro que permite medir la presión que se genera al interior del biodigestor. También se encuentra un agitador manual para distribuir de manera uniforme los microorganismos, y de transferir el calor a todo el sistema, para mantener una temperatura uniforme (Campos, 2001).

La válvula da el paso del gas hacia en gasómetro y de permitir tomar la muestra del producto tratado para los análisis necesarios. Por el costado del digestor presenta una llave que permite sacar una alícuota del efluente para medir temperatura, pH y CE de la mezcla.

A continuación se ilustra las partes que componen el sistema digestor - gasómetro, para comprender más sobre la puesta en funcionamiento del digestor (Figura 2).



Figura 2. Esquema del funcionamiento del digestor.

### **Unidad de calefacción**

Una de las variables de mayor importancia en la fermentación es la temperatura, porque el metabolismo de las bacterias se incrementa con el aumento de la temperatura en el sistema (Veecken y Hamelers, 2000). Sin embargo, si se trabaja a temperaturas muy altas, el proceso puede dejar de ser rentable, por lo cual es común que los digestores operen en un rango entre los 25 a 35°C (Villalobos, 2009). Esto se debe a que las bacterias en este rango de temperatura se reproducen fácilmente y pueden permanecer activas mientras no existan variación de temperatura aproximada de 5°C (Varnero, 1992). Se utilizó un sistema de calefacción con dos calefactores que permitieron mantener temperada el agua al interior del estanque con agua.

La temperatura del ensayo fue de 30°C y se controló mediante un termostato, el cual posee un tubo de inmersión que mantiene el agua a la temperatura requerida y va sumergido junto al biodigestor en el estanque, el cual es de fibra de vidrio y tiene una capacidad de 2000 litros aproximadamente, llenando con agua al 50% de su capacidad, considerando que las tres unidades experimentales se ubicaron en su interior.

### **Medición de biogás**

De acuerdo a la metodología propuesta por Uribe (1993) y usada por Rodríguez *et al.* (1997), para medir el volumen de biogás producido en el digestor se utilizó una unidad denominada gasómetro (Figura 3), el cual está formado por un recipiente plástico cerrado que presentaba una perforación para la entrada del gas, otro conducto por donde se sale el agua desplazada por éste y un manómetro (Villalobos, 2009).

## **Metodología**

El presente estudio se realizó a escala piloto, donde se evaluó el potencial del tratamiento constituido por alperujo y residuo de beterraga, específicamente residuos de betarraga, utilizando tres biodigestores de carga discontinua (Batch).

El ensayo se realizó con tres repeticiones para la obtención del biogás, utilizando una mezcla de alperujo y residuo vegetal en una proporción que permitió alcanzar una relación C: N del orden de 30: 1.

En una primera instancia no se obtuvieron los resultados esperados, por lo que se decidió repetir el estudio utilizando un inoculante, tratándolos como ensayos por separados. Se utilizaron las mismas materias primas, pero agregando un inoculante, correspondiente a guano de vacuno fresco. Se ocupó este material por sus características físicas y químicas, ya que, según Varnero (1992), posee una relación C: N promedio de 25:1, además de contener una considerable cantidad de bacterias metanogénicas que bajo condiciones anaeróbicas pueden generar biogás.

Villalobos (2009) indica que, de acuerdo a las características de los residuos, las concentraciones utilizadas para las mezclas varían con respecto a los distintos factores que pueden incidir en la realización de éstos (contenido de agua, relación C: N, porcentaje de sólidos totales, entre otros), por ello se utilizó la metodología propuesta por Varnero (1992), la cual señala que en una primera instancia se debe definir el volumen total del digestor y la capacidad de llenado de éste, con tal de determinar la masa total de la mezcla compuesta a utilizar.

La Masa Total de la Materia Prima (MMP) es la cantidad total de material a utilizar y se determina mediante:

$$MMP = \text{Densidad del material} \cdot \text{porcentaje útil del digestor} \cdot \text{volumen digestor} \text{ [Kg]}$$

Para establecer la cantidad de cada materia prima necesaria dentro del biodigestor, se utilizó la ecuación de la relación C: N para una muestra compuesta:

$$\frac{C}{N} = \frac{m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2}{m_1 \cdot n_1 + m_2 \cdot n_2}$$

Donde:

$c_i$  = Porcentaje de carbono presente en la materia prima.

$n_i$  = Porcentaje de nitrógeno presente en la materia prima.

$m_i$  = Masa de la materia prima.

El volumen del biodigestor es de 70 litros, por lo que su capacidad útil es de 60 litros de acuerdo a la revisión bibliográfica. La concentración de los sólidos totales (STC) para una materia prima de fermentación compuesta debe ser de un 10% y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$STC = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{x_1 + x_2} \cdot 100$$

STC = Concentración de sólidos totales de una mezcla compuesta (%)

$m_i$  = Masa de la materia prima (kg)

$x_i$  = Concentración de sólidos totales para cada materia prima (%)

Por último, se calculó el volumen de agua necesaria para diluir los sólidos totales en función del volumen útil del digestor mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Sólidos totales} = \frac{1 \text{ Kg. Material} \cdot \% \text{ Sólidos Totales material}}{1 \text{ Kg. Material fresco} + \text{agua agregada}}$$

### Observaciones sobre el diseño experimental

El experimento busca cuantificar el volumen de gas generado y el análisis respectivo de la muestra para ver la composición del gas. Como la unidad experimental es un sistema cerrado entre el digestor y el gasómetro, fue posible determinar los elementos que participan de éste, así el volumen desplazado por el gasómetro corresponde al volumen de gas generado en el digestor.

Aplicando la Ley de Charles al digestor se tiene:

$$P_1 \cdot V_1 = R \cdot T_1 \cdot n_1$$

R = Constante de los gases. [(Atm\*L)/(mol\*°K)]

V<sub>1</sub> = Volumen de gas. [L]

P<sub>1</sub> = Presión. [Atm]

T<sub>1</sub> = Temperatura. [°K]

n<sub>1</sub> = Moléculas del gas. [mol]

Se utiliza la misma ley para el gasómetro, por lo que:

$$P_2 \cdot V_2 = R \cdot T_2 \cdot n_2$$

R = Constante de los gases. [(Atm\*L)/(mol\*°K)]

V<sub>2</sub> = Volumen de gas. [L]

P<sub>2</sub> = Presión. [Atm]

T<sub>2</sub> = Temperatura. [°K]

n<sub>2</sub> = Moléculas del gas. [mol]

Las fórmulas están definidas para el tiempo inicial (t<sub>i</sub>) (Figura 3). Al tiempo acontecido (t<sub>f</sub>) se empieza a generar biogás en el digestor, aumentando la presión al interior de este. Considerando el volumen constante, se obtiene:

$$P_1 \left( \underset{\sim}{\overset{\sim}{f}} \right) = \frac{R \cdot T_1 \cdot n_1 \left( \underset{\sim}{\overset{\sim}{f}} \right)}{V_1}$$

Donde V<sub>1</sub> y T<sub>1</sub> son constantes

En el gasómetro las condiciones se mantienen constantes, debido que al interior se acumula biogás. En aquel tiempo ocurre que:

$$P_2 \left( \underset{\sim}{\overset{\sim}{f}} \right) = \frac{R \cdot T_2 \cdot n \left( \underset{\sim}{\overset{\sim}{f}} \right)}{V}$$

Donde T<sub>2</sub> es constante

Una vez comenzada la producción de biogás se producirá un incremento en el volumen del sistema, al expandirse el gas a presión  $P_1(t_f)$  (Figura 7B), entonces:

$$V_2 = V_1 + \Delta V \quad (1)$$

Aplicando la ley de Boyle a la ecuación:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Donde  $T_1 = T_2 = \text{constantes}$

Reemplazando (1) en la ecuación anterior:

$$P_1 V_1 = P_2 (V_1 + \Delta V)$$

$P_2(t_f)$  es la presión interna del gasómetro y  $P_1(t_f)$  es la presión interna del digestor al momento de hacer la evacuación del biogás. Como resultante, la variación del volumen ( $\Delta V$ ), representa el volumen de gas generado. Previo a cada medición se registraron  $P_1$  y  $P_2$  por un manómetro.

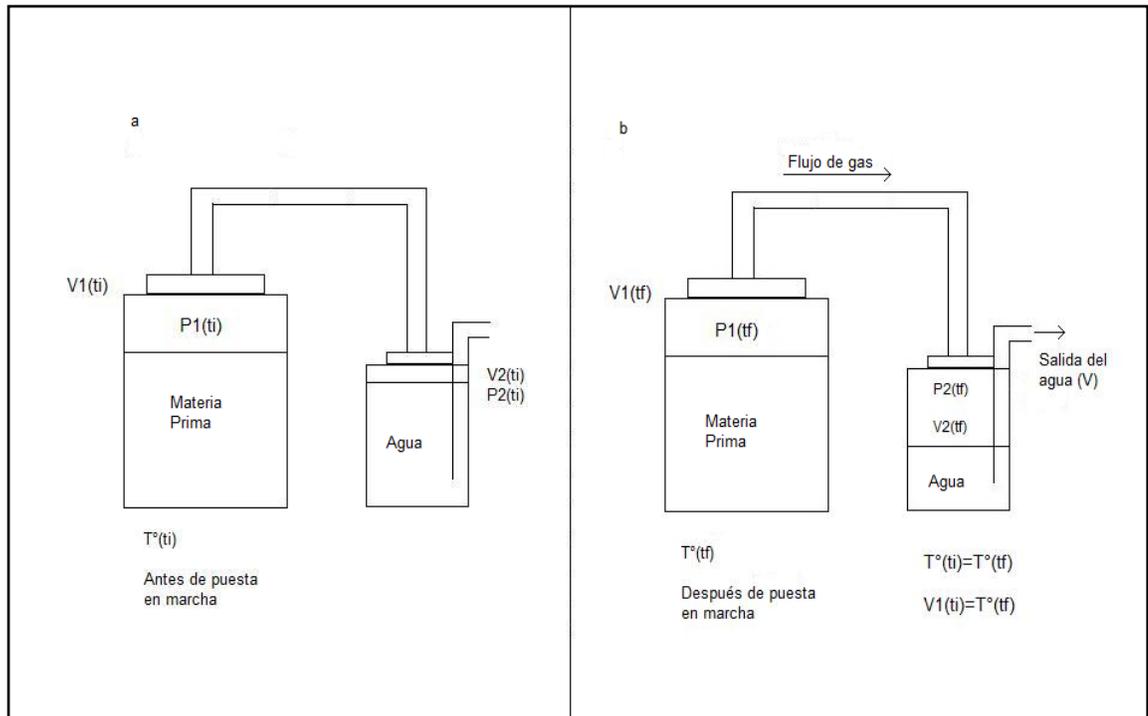


Figura 3. Funcionamiento de la unidad experimental al tiempo inicial (a) y final (b) del ensayo.

## Labores de operación del digestor

### Mediciones durante el proceso

Como los tres digestores están inmersos en una sola unidad de calefacción (piscina) la temperatura se controló cada cinco días mediante un termómetro análogo de precisión  $\pm 1^\circ\text{C}$ , esto permite controlar el funcionamiento del sistema en el rango mesofílico.

También se extrajo semanalmente del efluente una alícuota, que permitió medir de manera directa la conductividad eléctrica (CE), pH y temperatura en cada una de las repeticiones (Uribe, 1993; Villalobos, 2009).

Al inicio y al final del proceso se analizó el contenido de agua y sólidos totales, para esto se utilizó el método gravimétrico (USCC, 2004). Se pesaron 20g de cada muestra en una balanza digital de precisión, luego se colocaron las muestras en bandeja de aluminio anteriormente pesadas en una estufa a  $65^\circ\text{C}$  durante 1 día. El contenido de agua de las muestras está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Agua } (\%) \cong \left[ \frac{p_2 - p_3}{p_2 - p_1} \right] \cdot 100$$

En que:

$p_1$  = Peso de la bandeja de aluminio.

$p_2$  = Peso de la bandeja con muestra húmeda.

$p_3$  = Peso de la bandeja con la muestra seca.

Para obtener los sólidos totales se realiza la siguiente ecuación:

$$\text{Sólidos Totales } (\%) \cong 100 - \text{Agua } (\%)$$

Para obtener los sólidos volátiles (SV) o materia orgánica (MO) se utilizó el método de la calcinación (USCC, 2004). Se colocaron 10g de material seco a  $65^\circ\text{C}$  hasta peso constante, en cápsulas de porcelana, las cuales estaban previamente tarados, en una balanza de 0,001g de precisión. Luego las capsulas fueron introducidas a una mufla durante dos horas a  $600^\circ\text{C}$ . Una vez terminado el proceso las cápsulas se dejaron enfriar en un decantador para evitar que absorbieran la humedad del ambiente y se pesaron nuevamente (Villalobos, 2009). Luego se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{SV } (\%) \cong \left[ \frac{p_2 - p_3}{p_2 - p_1} \right] \cdot 100$$

En que:

$p_1$  = Peso de la cápsula.

$p_2$  = Peso de la cápsula con muestra seca a 65°C.

$p_3$  = Peso de la cápsula con muestra calcinada a 600°C.

Además el porcentaje de carbono orgánico puede ser obtenido de la siguiente relación:

$$SV (\%) = \% C_{org} \cdot 1,8$$

### Calidad y cantidad del biogás producido

La cantidad total de biogás producido se midió mediante la metodología anteriormente explicada, además de la producción diaria promedio de éste, expresada en mililitros (mL) o en litros (L), según corresponda (Villalobos, 2009).

La calidad del biogás producido es uno de los objetivo principales del estudio, acá el parámetro de calidad se determinó en función al porcentaje de metano que contenía el biogás en cada una de las repeticiones. Después de cuantificar la producción de biogás, se tomó una muestra del mismo, mediante un analizador de Gases de origen alemán Dräger modelo X-am7000 (Figura 4). Se analizó la composición gaseosa del gas en función de: metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), oxígeno (O<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO).



Figura 4. Analizador de Gases Dräger

Con el tratamiento dentro de cada uno de los biodigestores, se realizó una revisión periódica de la evolución de la presión para ver el momento en que se produjo el biogás y por cuantos días se llevó a cabo el proceso, centrando los resultados con mayor énfasis en la segunda parte del ensayo, la cual consideró la mezcla más el inoculante.

### **Análisis estadístico**

Se realizaron dos ensayos, cada uno con tres repeticiones; el primero (ensayo 1, T<sub>1</sub>) no consideró el uso de un inoculante, mientras que el segundo (ensayo 2, T<sub>2</sub>) si lo incluyó.

Las variables temperatura, conductividad eléctrica (CE), pH y producción de biogás se analizaron en forma descriptiva indicando promedio, desviación estándar e intervalo de confianza (IA). Se realizaron curvas por cada repetición mediante métodos de regresión en función del tiempo para ver el comportamiento de las variables durante el proceso.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización de residuos y condiciones de fermentación

Para analizar el potencial de la mezcla en la producción de biogás, es necesario conocer las características físicas y químicas de cada uno de los elementos a utilizar. El Cuadro 1 entrega la caracterización de las materias primas utilizadas.

Cuadro 1. Características de cada uno de los residuos.

Residuos	Parámetros			
	Porcentaje de SV	Porcentaje de ST	C/N	Ph
Alperujo	1,73	57%	79,6	6,0
Betarraga	1,23	15%	9,0	6,5

Junto a lo anterior, el volumen del digester para su puesta en marcha es de 60 litros, ya que su volumen total es de 70 litros aproximadamente, tomándose estos datos para la dilución de la mezcla que va ir en cada uno de ellos.

Con las propiedades de los materiales se efectuó la mezcla ideal para el tratamiento a utilizar en el ensayo, se usó solo un tratamiento entre el alperujo y la betarraga con una sola composición de acuerdo a sus características, las que se detallan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características de las mezclas usadas en los biodigestores.

Ensayo	Mezcla	Parámetros		
		Porcentaje de ST (%)	Porcentaje de SV (%)	Relación C/N
T <sub>1</sub>	70% betarraga y 30% de alperujo	12	91,3	30/1
T <sub>2</sub>	68% betarraga, 27% de alperujo y 5% guano	8	91,3	30/1

Al obtener la mezcla óptima para la investigación, se dispuso de ésta en los digestores, para ver la factibilidad de ella en la producción de biogás, esperando obtener resultados luego de 90 a 120 días (Varnero, 1992), debido a que el estudio se ejecutó en época invernal, con temperaturas inferiores a 20°C.

A la segunda semana de iniciado el ensayo, la fermentación anaeróbica empezó a tener un papel primordial, ya que en un comienzo el sistema presentaba oxígeno, por lo que

actuaban las bacterias aeróbica para la descomposición de la mezcla, al terminarse el oxígeno se pasó al proceso anaeróbico donde actuaron bacterias anaeróbicas o facultativas que permitieron la descomposición y utilización del material para la generación de gas.

Transcurridos 73 días de la primera investigación, la cual evaluó el potencial de producción de biogás por parte de la mezcla de alperujo – betarraga, se dio por terminado, dando paso al segundo ensayo con la modificación señalada, al cabo de 62 días se obtuvieron los resultados, los cuales van a ser analizados por los factores de temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), cantidad de biogás y calidad del gas producido.

### Temperatura del sistema de calefacción

La Figura entrega los datos obtenidos durante los días comprendidos entre fines de Junio hasta los últimos días de Diciembre.

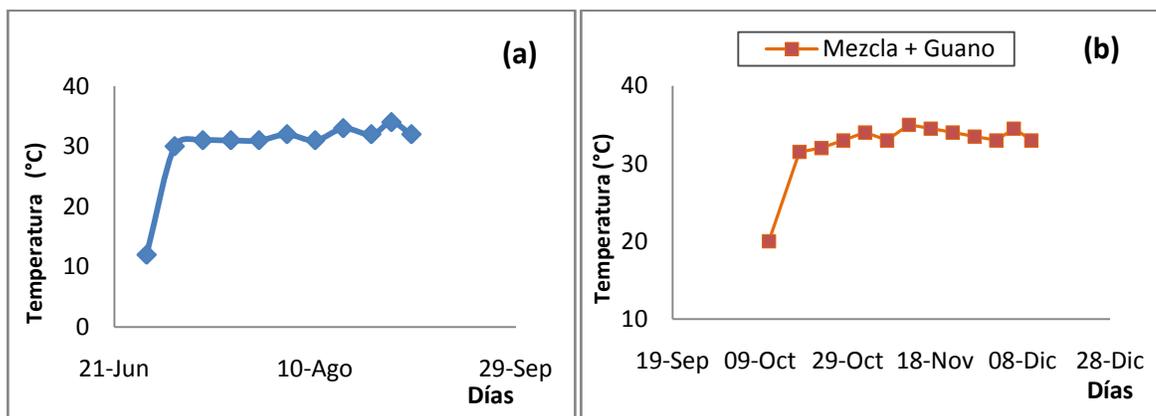


Figura 5. Temperatura del sistema de calefacción del (a) primer y (b) segundo tratamiento .

De acuerdo a la Figura, el sistema funcionó en un rango mesofílico, es decir, entre temperaturas de 25 a 35°C. En la Figura (a), la temperatura mínima fue de 30°C y la máxima fue de 34°C. El promedio obtenido fue de 29,91°C lo que significa que el sistema se mantuvo en el punto medio del rango. Esto permite, según Hernández (1994) y Villalobos (2009) que las bacterias mesófilas mantengan su actividad en forma óptima dentro de los digestores.

En el ensayo (a) existió problemas en los primeros días debido a que las resistencias utilizadas para mantener la temperatura requerida sufrieron un daño mecánico, lo que imposibilitó un normal funcionamiento de ellas. Estos cambios violentos de temperatura que sufrió el sistema de calefacción impidió obtener temperaturas más elevadas, lo que se subsanó a contar de la segunda semana que transcurrió el experimento.

El controlar regularmente la temperatura permitió asegurar que se trabajó en el rango mesofílico, asegurando una temperatura equilibrada y constante para el desarrollo de la colonia de bacterias al interior del biodigestor, como se ha mencionado, variaciones

extremas en la temperatura disminuye o mata a las bacterias (Varnero, 1992).

Hay que recordar que los tres digestores estaban sumergido en agua, la cuál tenía dos resistencias que cumplían la función de calentar el líquido y mantenerla a la temperatura requerida mediante un termostato, por tal motivo, es que se controló la temperatura externa de los digestores regularme para evitar complicación en la producción de biogás, ya que al variar la temperatura, perjudicaría el estudio debido a los parametros establecidos en ella.

En el ensayo (b) no presentó grandes modificaciones respecto al primero, confirmando que la temperatura utilizada estuvo en un rango mesofílico. En el segundo ensayo se obtuvo como promedio de temperatura 32,5°C, aproximadamente 2,5°C más alto que en el ensayo previo, esto se pudo deber principalmente a la diferencia que existían en las estaciones del año, porque el primero se realizó en invierno, mientras que este último se llevó a cabo a inicio de primavera, lo que conlleva a un aumento de las temperaturas. Por último, se debe señalar que el ensayo (b) la temperatura máxima y mínima obtenidas fueron respectivamente 34.5°C y 32°C.

Peréz (2010), señala que los rangos de temperaturas dependen de la bacteria que se dejará proliferar y tienen incidencia directa en los días de fermentación para obtener el biogás.

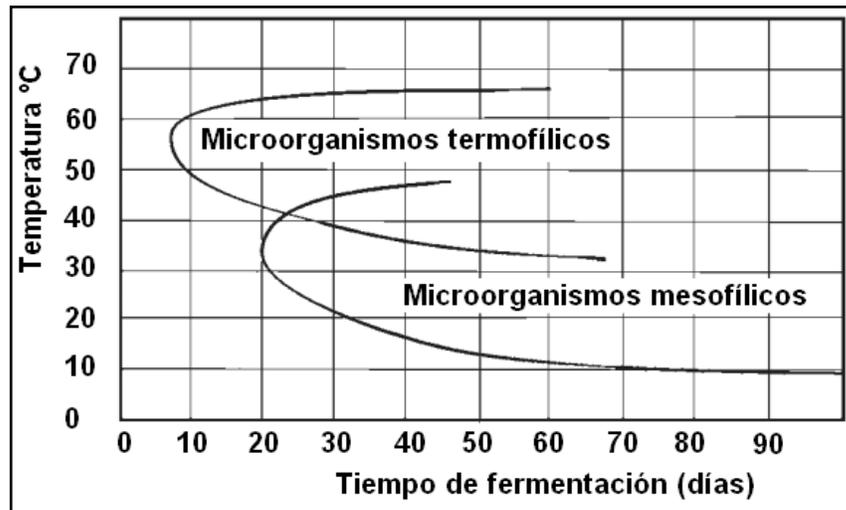


Figura 6. Rangos de operación para organismos mesofílicos o termofílicos.

En función a la figura anterior se utilizó un rango mesofílico, porque a 30°C de temperatura ambos microorganismos podían desarrollarse y participar del proceso de generación de biogás.

#### **Análisis de datos obtenido en el biodigestor discontinuo**

#### **Temperatura**

Como se mencionó anteriormente, el sistema funcionó a rango mesofílico y es importante

saber si al interior de los biodigestores la temperatura era la misma o similar, porque al funcionar en un rango constante las bacterias que se van desarrollando al interior de ellos se multiplican sin mayores complicaciones (Varnero, 1992). Es necesario aclarar que el rango mesofílico presenta mejores condiciones de manejo, ya que en el intervalo termofílico las bacterias son más sensibles a cambios de temperatura (Uribe, 1993).

Se puede mencionar que la temperatura es una variable muy importante; ya que a medida que aumenta la temperatura también aumenta la actividad metabólica de las bacterias (Veecken y Hamelers, 2000), requiriéndose menor tiempo de retención para que se complete el proceso de fermentación, tal como lo muestra el Cuadro 3.

Cuadro 3. Relación entre el periodo de fermentación y la temperatura. Adaptado de Vargas (2005)

Temperatura (°C)	8	10	15	20	27	37
Tiempo (días)	120	90	60	45	38	30

Este parámetro de control es fundamental en el proceso de fermentación y al analizar los valores éstos no tuvieron variaciones significativas, no sobrepasando un diferencial mayor o menor a 5°C, lo que según FAO (1986) y Villalobos (2009) demuestra el buen control de esta variable y la no incidencia de esta en el comportamiento de las bacterias, y por ende en la cantidad y la calidad del biogás generado.

Durante la fermentación anaeróbica, las bacterias metanogénicas son más sensibles a la temperatura que los demás microorganismos de un biodigestor, debido a que su velocidad de crecimiento es más lenta. El proceso de digestión anaerobio no se ve afectado si la temperatura aumenta en unos pocos grados; sin embargo, un decrecimiento podría retardar la producción de metano, sin perjudicar la actividad de las bacterias acidificantes, lo cual permite una excesiva acumulación de ácidos y una posible falla en el biodigestor. En este sentido, se debe procurar mantener un microclima cálido en el biodigestor para conservar una tasa de producción de biogás alta (Bidlingmaie, 2006; Rivas *et al.*, 2010). No obstante lo anterior, cuando se trabaja a temperaturas muy elevadas el proceso puede dejar de ser rentable, por lo cual es común que los digestores operen en un rango mesofílico (Vargas, 2005).

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

La figura 7 indica las variaciones de temperaturas durante los días que duró la primera y segunda investigación:

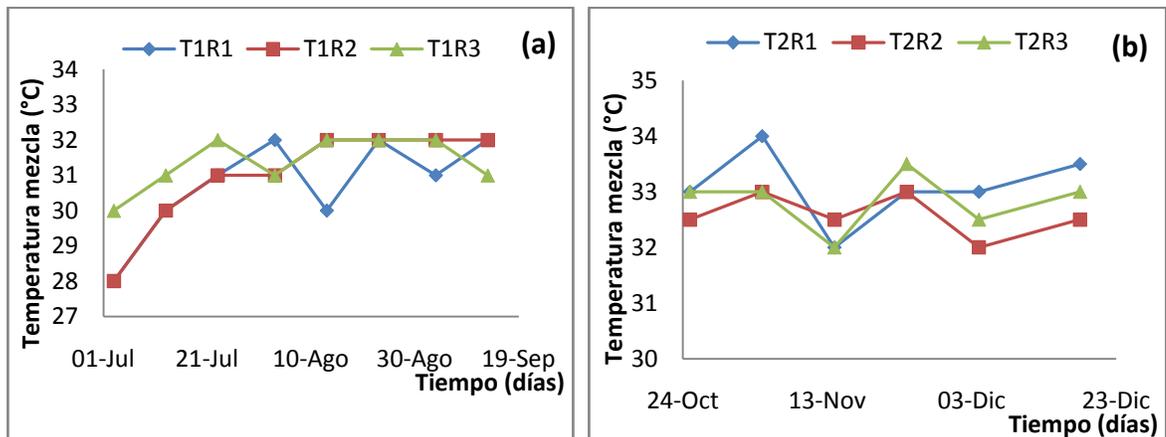


Figura 7. Fluctuación de temperatura al interior de los digestores en el primer ensayo (a) y segundo ensayo (b).

La temperatura al interior de los biodigestores en el primer ensayo no fue inferior a los 25°C y la máxima no supero los 35°C, y el promedio de los tres digestores fue de 31°C. Mientras que la temperatura mínima de la mezcla fue de 28°C y la temperatura máxima fue de 32°C, por tales motivos se espera una optima producción de biogás.

Al comparar la temperatura del sistema de calefacción respecto al de la mezcla, se puede determinar que existe una diferencia entre la temperatura aplicada versus la resultante, esto se debe a que el biodigestor no estaba completamente sumergido en el agua, sino que solo la mitad de este; esto entrega un diferencial de temperatura de 1°C en el primer ensayo y de 0.3°C del segundo ensayo aproximadamente, lo que denota algún grado de restricción para las bacterias, desacelerando el proceso de producción de biogás.

La temperatura del segundo tratamiento (b) se mantiene dentro de los rangos mesofílicos, eso sí con una mayor temperatura que en el tratamiento anterior. Esto se debe a las diferentes estaciones del año a las cuales se realizó el ensayo, ya que, el primer tratamiento se llevó a cabo en inviernos, mientras que el segundo se hizo en primavera. Se obtuvo como promedio de temperatura de 32,8°C. La temperatura mínima obtenida en los tres tratamientos fue de 32,0°C, mientras que la máxima obtenida fue de 33,5°C. También se puede inferir que no existió variaciones extremas en la temperatura, por lo cual la colonia de bacterias metanogénicas no presentó un estrés en su reproducción, lo que permitió una buena fermentación anaeróbica y una optima condición para producir biogás.

Ambos ensayos se desarrollaron con una temperatura inferior a 35°C, lo que nos indica que se trabajó a una temperatura controlada, pero al mismo tiempo se trabajó sin un gran gasto económico por el tema de utilizar electricidad para el desarrollo del ensayo, porque el termostato permitió manejar esta variable.

## pH

El pH es una medida utilizada para evaluar la acidez o la alcalinidad de una solución. Por lo

tanto, el pH es una medida de la acidez de una solución que depende de la concentración de  $H^+$  (Bazaés, 2009).

El pH es de vital importancia para el proceso de fermentación anaeróbica, ya que una disminución puede traer como resultado la inhibición del crecimiento de las bacterias metanogénicas, ello hace que disminuya la producción de metano y aumente el contenido de dióxido de carbono y se produzcan olores desagradables por el aumento del contenido de sulfuro de hidrógeno (Lay *et al.*, 1998).

El pH en los digestores anaerobios se relaciona con la actividad realizada por las bacterias, el pH normalmente se encuentra entre 6-8, con un valor próximo a 7 para la actividad óptima. Los ácidos grasos disminuyen la alcalinidad a menos que la alcalinidad bicarbonatada sea suficiente para neutralizar dichos ácidos (Pérez, 2010).

Varnero (1992) indica que el valor óptimo de pH para la digestión metanogénica es de 6,5 a 7,5. Sin embargo, si la carga está compuesta de proporciones inconvenientes y se hace funcionar en malas condiciones, el valor de pH no se mantiene constante, tornándose demasiado ácido, con lo cual puede inhibirse el proceso de fermentación e incluso detenerse. Las causas por las cuales puede descender el pH, entre otras, son: el aumento repentino de la carga, la presencia de elementos tóxicos en la materia prima y los cambios súbitos de temperatura.

Los microorganismos anaerobios necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo, aunque permiten cierta oscilación. Para que el proceso se desarrolle de forma satisfactoria, el pH debe estar en torno a la neutralidad, presentando problemas graves si el pH baja por debajo de 6 o sube por encima de 8,3. Sin embargo, el proceso de inhibición parece ser completamente reversible, aunque el tiempo de recuperación depende de la duración de la alteración (Pérez, 2010).

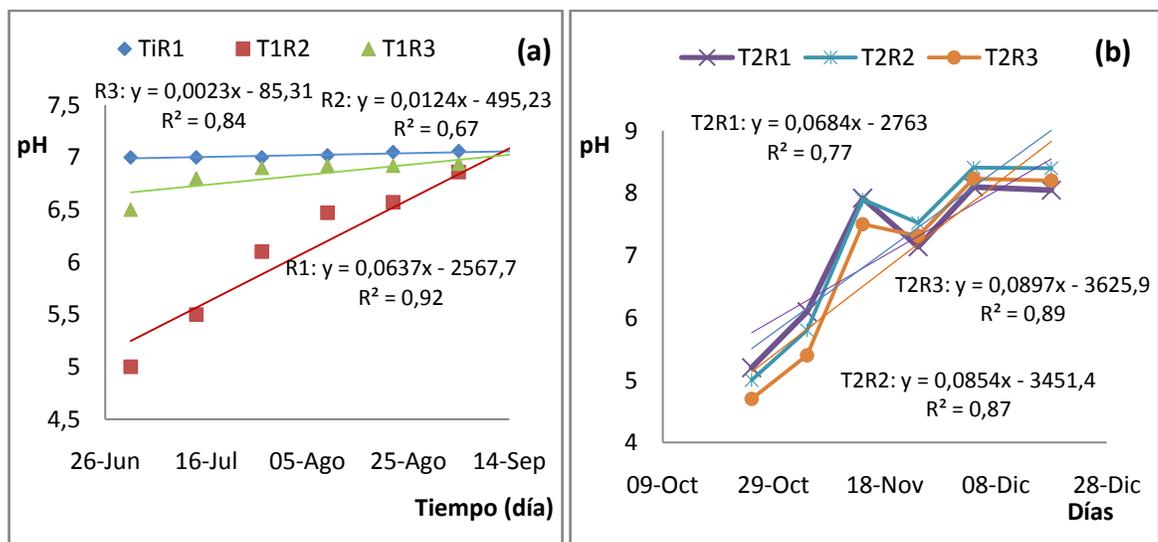


Figura 8. Variación del pH en cada ensayo durante el primer (a) y segundo (b) ensayo.

La figura 8 (a) nos entrega datos importante, una de las tres repeticiones presentó un pH inferior a 5,5; pero con el paso de los días este fue en aumento. En cambio las otras dos repeticiones se mantuvieron en un rango de neutralidad. El promedio del primer ensayo fue de 6,7: confirmando que el proceso se realizó dentro del rango de neutralidad del pH, salvo algunas excepciones durante el desarrollo del experimento. Hilbert (2000), señala que las desviaciones de los valores normales es indicativo de un fuerte deterioro del equilibrio entre las bacterias de la fase ácida y la metanogénica provocado por severas fluctuaciones en alguno de los parámetros que gobiernan el proceso. En este primer tratamiento las tres repeticiones su pH es inferior 8,5; por lo que se pudo descartar como un factor que impidiera el proceso de producción de biogás.

Una vez estabilizado el proceso fermentativo el pH se mantiene en valores que oscilan entre 7,0 y 8,5. Debido a los efectos buffer que producen los compuestos bicarbonato-dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$  - $\text{HCO}_3$ ) y Amonio -Amoníaco ( $\text{NH}_4$  - $\text{NH}_3$ ) el proceso en sí mismo tiene capacidad de regular diferencias en el pH del material de entrada (Vásquez, 2009).

En el segundo ensayo de la Figura 8 (b) los datos obtenidos en el inicio del proceso fueron bastante bajo cercanos a pH 5,0. Sin embargo este parámetro comenzó a aumentar y en las tres repeticiones existió un aumento paulatino en el pH, llegando a un valor medio cercano a la neutralidad casi al final del estudio. Finalmente el pH continuó aumentando para llegar a valores de pH 8,5 cuando el proceso de producción de biogás llegó a su término. De las tres repeticiones la  $R_3$  tuvo el promedio más bajo con 6,63 y  $R_2$  presentó el pH más alto con 6,93. La media general respecto al pH de la mezcla fue de 6,82. Los valores de pH de las tres repeticiones son similares al término del proceso.

Uribe (1993), trabajando en la producción de biogás a partir de tuna, señala que la variación que presentó el pH durante la evolución del proceso correspondió al comportamiento típico de una carga estacionaria o batch, observándose en una primera etapa un descenso del pH a un valor mínimo, debido a la acción conjunta de las bacterias hidrolíticas y acidogénicas, que al metabolizar los compuestos generan ácidos orgánicos, elevando la concentración de iones Hidrógeno en la solución. En una segunda etapa estos ácidos son oxidados por las bacterias metanogénicas, disminuyendo los protones libres y aumentando el pH. Una vez establecido el equilibrio entre estos microorganismos se estabiliza el pH de la solución.

De manera general, el pH se mantiene bastante estable a pesar de la producción de ácidos por las bacterias, ya que en el medio fermentativo se generan sustancias tampones que garantizan un rango de pH adecuado. Además, la velocidad de formación de ácido depende de la velocidad de la conversión a biogás. Se acepta generalmente que los valores óptimos del pH oscilen entre 5,5 y 8,0; sin embargo en el sistema de dos etapas el pH recomendado depende de la fase anaerobia (Vargas, 2005).

### **Conductividad Eléctrica**

Otro factor que es preponderante o fundamental para la producción de biogás es el contenido de sales. Se analizó la conductividad eléctrica (CE) para ver el comportamiento

que tenía la mezcla al interior del biodigestor en función del parámetro de salinidad que se puede generar durante el proceso.

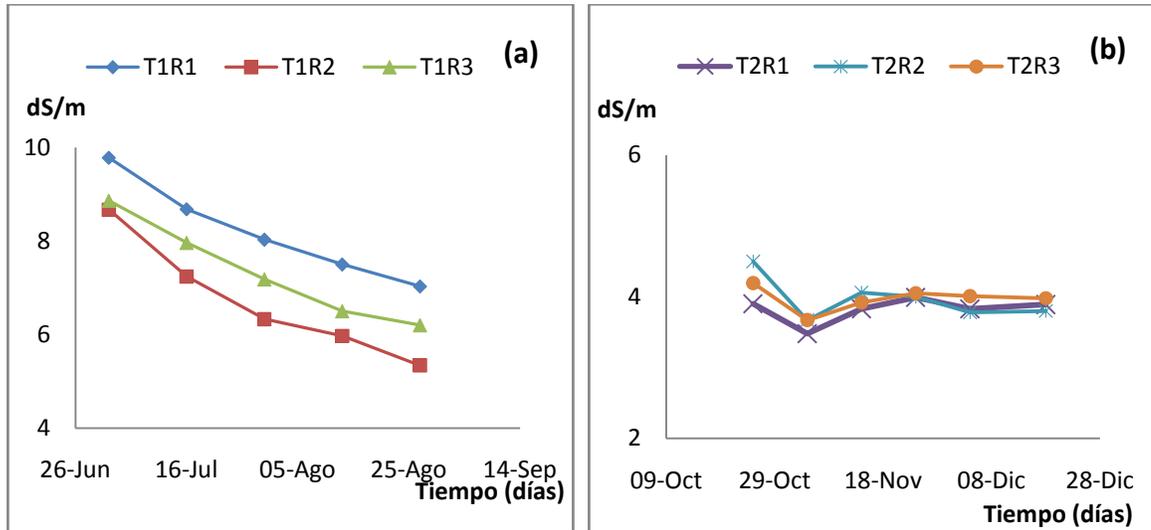


Figura 9. La conductividad eléctrica del primer (a) y segundo tratamiento (b).

La normativa Chilena en la producción de Compost señala que la conductividad eléctrica para un compost de clase A debe ser igual o inferior que 5 dS/m y Compost de clase B debe tener entre 5 a 12 dS/m (CONAMA, 2000). El comportamiento de la mezcla del primer ensayo fue disminuyendo con el paso del tiempo, lo que indica que existe un proceso óptimo en la disminución de sales. Esto es importante para determinar la calidad del efluente, que es el material que queda al interior del biodigestor al término de la producción de biogás, ya que, al tener una alta conductividad eléctrica no es posible utilizarlo de manera directa en los suelos y es necesario utilizar un proceso de compostaje para disminuir el alto contenido de sales que presenta.

La disminución que muestra la Figura 9 (a) es durante todo el proceso, llegando a un valor promedio cercano a 6,7 dS/m. La repetición dos se acercan a valor de 5 dS/m, luego de haber transcurrido más de dos meses la función tiende a ser más paralela al eje x, aunque al final del periodo de combustión el material al interior de los tres biodigestores presenta un bajo rasgo de estabilización.

En la Figura 9 (b) que corresponde a la mezcla de vegetales más el inoculante se puede ver que la conductividad eléctrica al inicio del proceso es menor que en nuestro primer tratamiento, en este caso el valor más alto fue de 4 dS/m para R<sub>2</sub> y el valor más bajo fue de 3.8 ds/m para R<sub>1</sub>. Al final del ensayo las tres repeticiones tienen valores igual o inferior a 4 dS/m y el promedio obtenido al final del proceso fue de 3,9 dS/m. Se puede estimar que la tendencia en las tres repeticiones es ir disminuyendo la conductividad eléctrica de la mezcla, la cual podría llegar a valores cercano a 3 dS/m que de acuerdo a lo obtenido Villalobos (2009), esto pone en evidencia la importancia que tiene el proceso para reducir los índices de salinidad en los materiales utilizados, ya que éstos actúan como inhibidores

del proceso de fermentación (Márquez, 2005), por lo que afectarían la estabilización de los residuos para una posible utilización de éstos en la agricultura.

### **Tiempo de retención hidráulica. (TRH)**

Hilbert (2000) señala que este parámetro sólo puede ser claramente definido en los “sistemas discontinuos o batch” donde el tiempo de retención coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. En los digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria. Agregando que de acuerdo al diseño del reactor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir variables diferencias entre los tiempos de retención de líquidos y sólidos debido a lo cual suelen determinarse ambos valores. El tiempo de retención está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo.

La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material. La relación costo beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura y el tiempo de retención, ya varían los volúmenes, los sistemas paralelos de control, la calefacción y la eficiencia. Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandará mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos (Vargas, 2005).

El límite mínimo de los tiempos de retención está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción debe ser compensada por las bacterias que permanecen dentro del reactor (Hilbert, 2000).

En el Cuadro 4 se muestra los tiempos de retención para cada tratamiento, agregando el tiempo de inicio del proceso, ya que, es importante señalar esos dos momentos, porque acá se pueden obtener cual de los dos ensayos produjo biogás en un menor tiempo y bajo el parámetro de rango mesofílico que significa un costo económico importante a la hora de la inversión.

Cuadro 4. El tiempo de inicio del proceso y retención hidráulica de los dos tratamientos.

Tratamiento	Tiempo Inicio Proceso	Tiempo Retención Hidráulica
T1R1	31 días	71 días
T1R2	35 días	73 días
T1R3	29 días	72 días
T2R1	14 días	63 días
T2R2	15 días	62 días
T2R3	16 días	61 días

## Composición del biogás generado

Luego de seis meses del estudio se obtuvieron los siguientes resultados respecto a la composición del gas de cada tratamiento con su respectiva repetición, en las siguientes Figuras muestran la evolución que presentó cada tratamiento con sus tres repeticiones en función de metano y CO<sub>2</sub>, ya que son ellos los principales elementos que permiten confirmar si lo obtenido puede ser llamado biogás de mala o buena calidad y ser utilizado como fuente de energía.

También se entregan los datos de la evolución del H<sub>2</sub>S porque la idea es analizar si este gas obtenido puede ser utilizado por una red de cañería de forma directa o se debería recurrir a algún proceso que permita la disminución de este, ya que, él es el causante de la corrosión que puede impedir su uso.

### Análisis del Metano y Dióxido de Carbono del biogás.

El metano es el elemento más importante en la producción de biogás, ya que, al obtener valores sobre el 50% puede este gas llamarse biogás de calidad (Varnero, 1992). La concentración de metano en el biogás no sólo depende de la fase en que se encuentre la degradación. Distintos sustratos originan distintas concentraciones de los componentes del biogás. Así, por ejemplo, la degradación de los lípidos genera un biogás con mayor concentración de metano que la degradación de la celulosa (Gendebien *et al.*, 1992 y Gonzalez, 1997). La Figura 10 corresponde al primer tratamiento y sus tres repeticiones respecto de la evolución del porcentaje de metano del biogás.

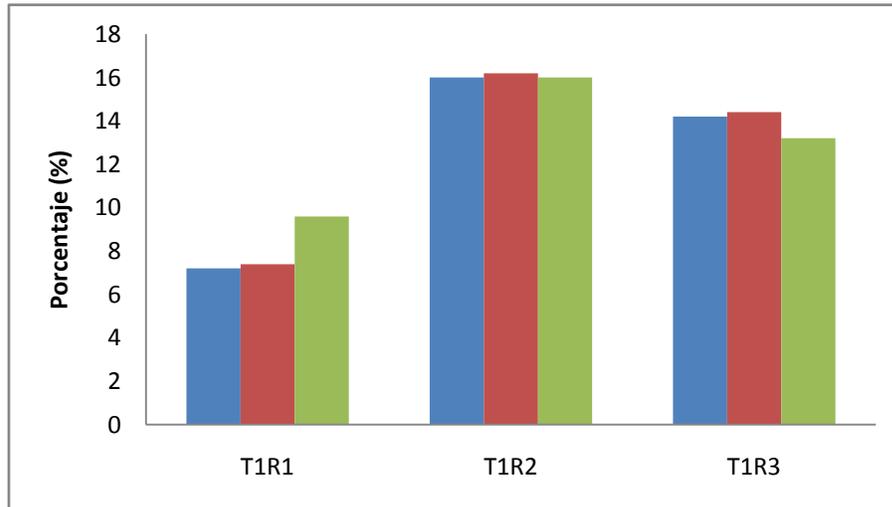


Figura 10. Evolución en la producción de metano (CH<sub>4</sub>) del primer tratamiento.

Se puede apreciar que de las tres muestras analizadas, ninguna sobrepasan el 20% de metano al final del proceso, lo que quiere indicar que la generación de este componente durante todo el proceso fue bajo y la falta de bacterias metanogénicas al interior del biodigestor

impidieron que la fermentación anaeróbica se cumpliera de mejor manera. El promedio de metano fue de 13% en la concentración del biogás.

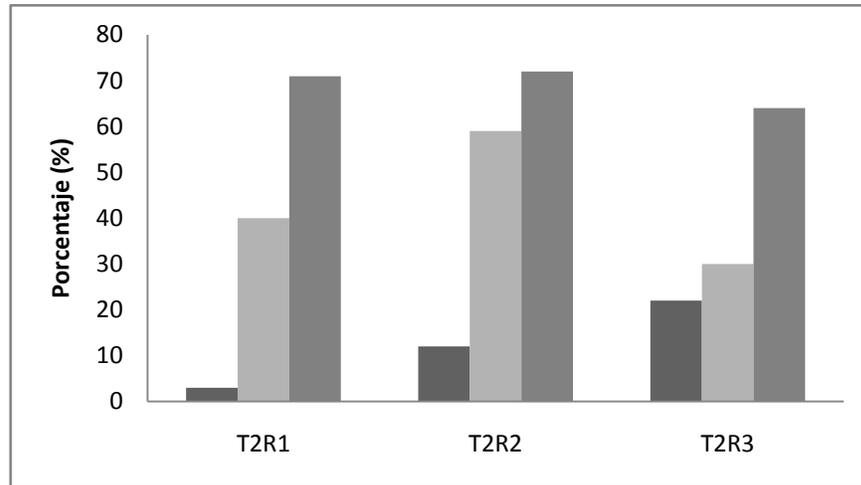


Figura 11. Evolución de la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ) segundo tratamiento.

En el segundo ensayo la producción de metano supera el 70% en las dos primeras repeticiones, mientras que para la última supera el 60%, lo que indica que tiene un mayor contenido de este elemento en comparación al primer tratamiento al final del proceso. El promedio obtenido fue de una concentración de 69% del biogás. Esto se podría atribuir principalmente al inoculante utilizado para dar inicio a la producción del biogás.

Aca se puede aclarar que el segundo tratamiento de la mezcla con el guano se obtuvo biogás de calidad, ya que, este último de acuerdo a la definición anteriormente señalada sobrepasar el 50% en la concentración de metano.

En la Figura 12 muestra el resultado de la producción de  $\text{CO}_2$  del primer tratamiento con sus respectivas repeticiones, teniendo en cuenta que ya transcurrieron 73 días del ensayo.

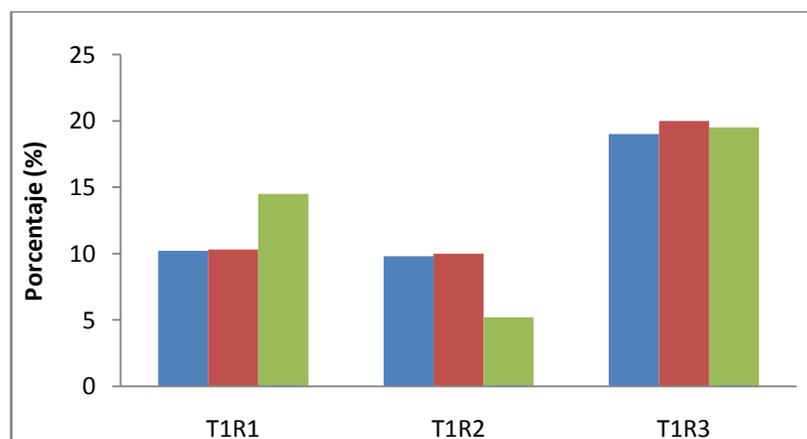


Figura 12. Evolución del Dióxido de Carbono del primer tratamiento.

La Figura anterior los porcentajes son adecuado para la producción de biogás, pero en este tratamiento falló la producción de metano, por lo que se obtuvo gas pero de baja calidad.

La Figura 13 corresponde a la evolución del CO<sub>2</sub> del segundo tratamiento con sus respectivas repeticiones. Se puede observar que el dióxido de carbono no supera el 30%, al igual que en la Figura 12 que los resultados obtenido se acercan a un 30%. En ambos ensayos los valores obtenidos están dentro de la definición de biogás.

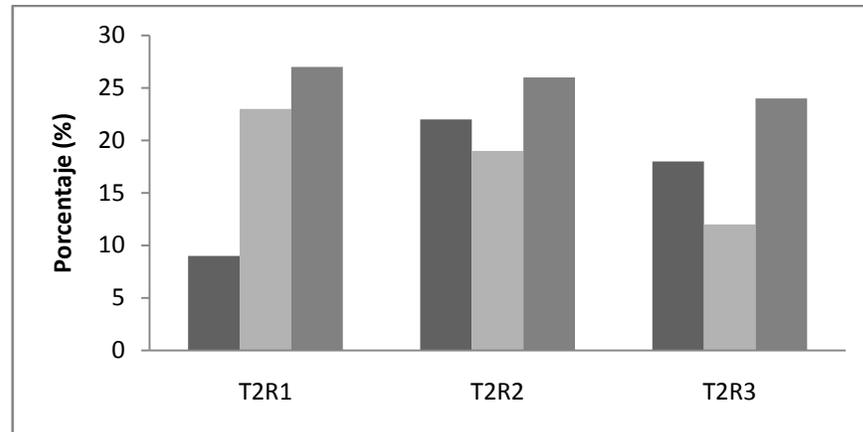


Figura 13. Producción de Dióxido de Carbono del segundo tratamiento.

Villalobos (2009) y Flotats et al (2000) señalan que el producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 a 70%) y dióxido de carbono (30 a 50%), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, ácido sulfhídrico y otros); y cuya composición, depende tanto de la materia prima como del proceso en sí. Aunque la composición del biogás depende de muchas variables, es posible determinar un rango típico de sus componentes.

Teniendo los datos de metano y dióxido de carbono se saca en promedio que el segundo tratamiento es el resultado de la definición de biogás, porque en promedio se obtienen 69 y 25.7%, respectivamente. Mientras que el primer tratamiento se obtuvo solamente un promedio de 12.9 y 13% respectivamente.

Otros de los elementos del biogás, es el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) factor más perjudicial para analizar la calidad del biogás generado. Debido a lo anteriormente señalado, en el primer tratamiento sus tres repeticiones superaron ampliamente los 100 ppm, no se grafico debido a que el analizador de gases por sobre 100 ppm no puede indicar el valor de H<sub>2</sub>S. Mientras que en el segundo tratamiento, las tres repeticiones dieron como resultado final respectivamente para cada repetición de 11, 56 y 90 ppm aproximadamente. Aca tampoco se grafico porque iniciado el proceso presentó valores elevados, pero con el paso de los días fue disminuyendo llegando a los valores señalados, que según lo señalado por Traub (2008) indica que el ácido sulfhídrico no debe superar el 1% en la composición del biogás, lo que

transformado a ppm corresponde a 10.000 lo que indico que este último ensayo se obtuvo un gas de calidad.

La composición final del biogás de los dos tratamientos se entrega a continuación, representados en la siguientes Figuras.

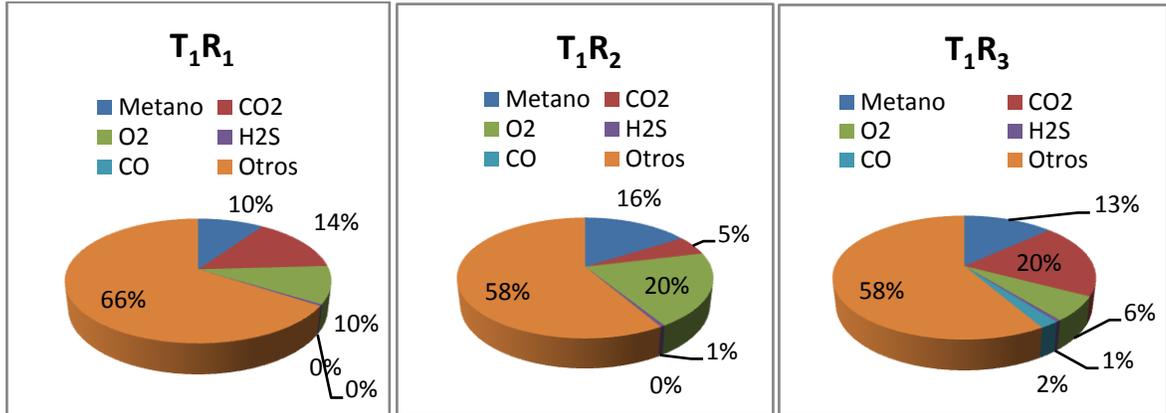


Figura 14. Composición final de las tres repeticiones del primer tratamiento.

En este caso se puede desprender que el biogás generado está compuesto por otros tipos de gases los cuales no son útiles para la obtención de energía, por tal motivo se puede indicar que el gas obtenido es un biogás de baja calidad, ya que, no cumple con la composición anteriormente señalada en la definición de este. Pero igual presenta un poder calórico, no siendo lo ideal para su utilización.

En la Figura 14 existe un dominio de otros gases, principalmente nitrógeno, llegando en las tres repeticiones por sobre el 50% de su composición esto se debe a las filtraciones existentes, a la baja carga de bacterias metanogénicas dentro del sistema que no permitió generar un ambiente anaeróbico y que no favoreció a la producción de biogás.

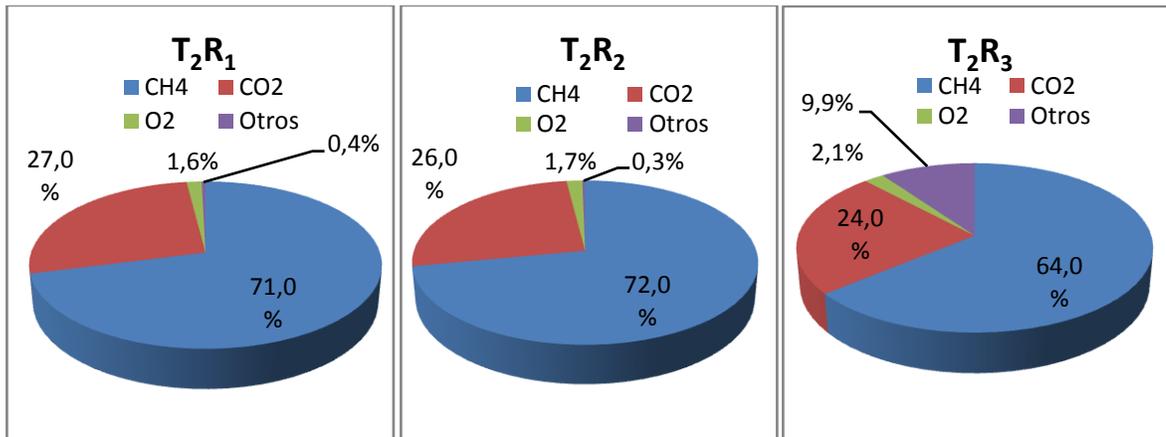


Figura 15. Composición del biogás de las tres repeticiones del segundo tratamiento.

Se puede observar que la producción de metano es muy superior que el anterior tratamiento y en las tres repeticiones la producción de gas puede ser llamado biogás de calidad, porque existe un predominio de los gases energizantes, los cuales permiten generar energía útil para las personas y de un buen poder calórico. Este ensayo no presenta dentro de sus componentes al oxígeno lo que permite señalar que el proceso anaeróbico se cumplió durante todo el tiempo.

La Figura 15 se observa que los otros gases no sobrepasan el 1%, porque se genero un ambiente con una baja carga de oxígeno, el tratamiento incluyo un inoculante como el guano fresco de bovino que permitió generar colonias con bacterias metanogenicas y se evitó la entrada de oxígeno al interior de los biodigestores. Permitiendo tener condiciones óptimas para la producción de biogás.

### **Producción total y semanal de biogás.**

La cantidad de biogás obtenida es importante para ver si es rentable utilizar este tipo de formación de energía en desmedro de otra que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente.

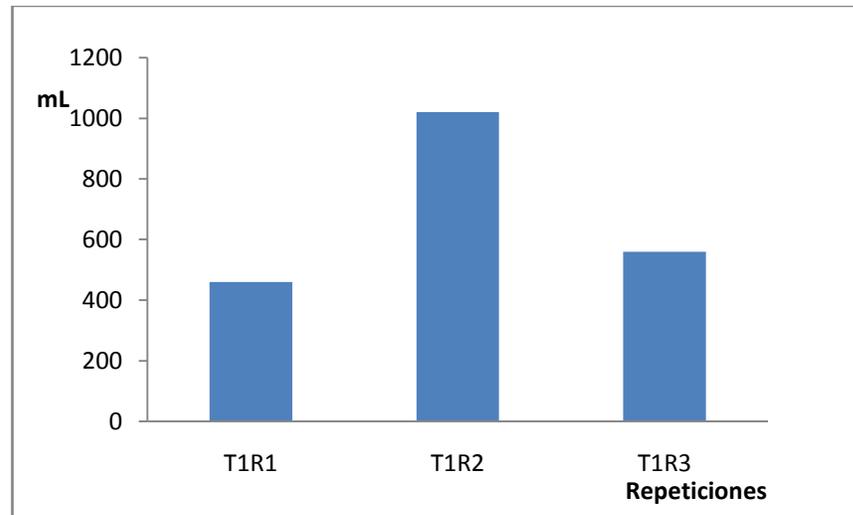


Figura 16. Producción total de Biogás del primer tratamiento.

En el primer ensayo la generación de biogás fue baja o escasa se produjo en total en las tres repeticiones 2 litros de gas o 2000 mL aproximadamente. T<sub>1</sub>R<sub>1</sub> generó un total de 460 mL, T<sub>1</sub>R<sub>2</sub> liberó 1020 mL y T<sub>1</sub>R<sub>3</sub> generó 560 mL.

En este estudio el cual se inició solo con analizar esta mezcla entre alperujo y residuo de beterraga sin un inoculante los resultados fueron bastante malos para la cantidad de biogás generado. Acá los parámetros fundamentales para la producción de biogás estuvieron en su óptimo, es decir; temperatura, contenido de sólidos totales, sólidos volátiles, pH, salinidad, relación carbono nitrógeno, entre otros. Pero al ser solo material de origen vegetal las bacterias formadoras de biogás no pudieron establecerse en el biodigestor y esto no se debe

a la falta de materias primas para su reproducción sino que, el material vegetal no contiene la cantidad de bacterias metanogénicas para permitir su generación. El factor de pérdidas de biogás por filtraciones es de consideración, porque permite el intercambio entre el medio interno del biodigestor con el exterior, lo que dificulta más la contabilidad de biogás.

En cambio en el segundo tratamiento la situación es totalmente diferente, porque al utilizar guano de inoculante permitió aumentar considerablemente la generación de gas, la Figura 17 ilustra lo anteriormente señalado. Al igual que en el primer tratamiento los parámetros de producción de biogás se mantienen en los rangos óptimos.

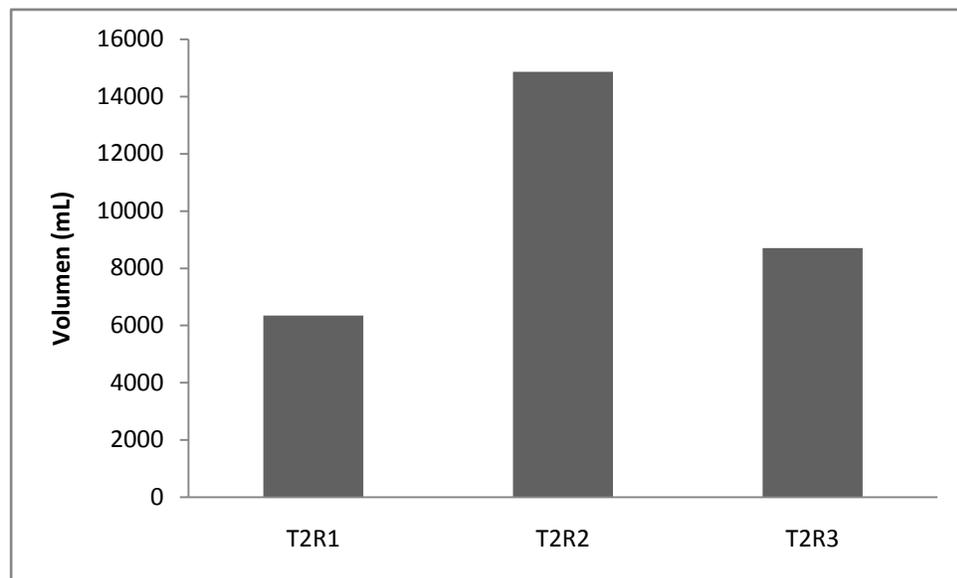


Figura 17. Producción total de biogás segundo tratamiento.

En este segundo tratamiento el escenario es diferente, porque podemos observar que la primera repetición obtiene 6000 mL, la segunda sobre los 14000 mL y la tercera llega cerca de los 8000 mL. Esta producción de energía es importante, porque responde a la hipótesis de ver si este material vegetal es capaz de producir biogás y los resultados indican que es una fuente importante de energía renovable la cual puede ser utilizada para la necesidad que sea necesaria. Acá existen filtraciones igual que en el primer tratamiento, porque el biodigestor no es totalmente hermético; pero al existir mayor generación de gas al interior del biodigestor este produce una presión que evita la entrada de oxígeno al sistema lo que optimiza el proceso fermentativo obteniendo mayor volumen biogás.

### **Producción semanal de biogás**

La producción semanal de biogás es un dato más que permitió analizar la evolución de la materia prima al interior de los biodigestores en función de la producción de biogás, también nos permitió obtener el mínimo y máximo día de producción, junto con determinar el fin del proceso, porque se asumió que al no liberar gas al gasómetro el proceso había llegado a su fin.

A continuación se entregan los gráficos de producción semanal de biogás y se realizó de esta manera para entregar una figura más ordenada, porque los datos se apilaban en el centro si entregar claramente la información.

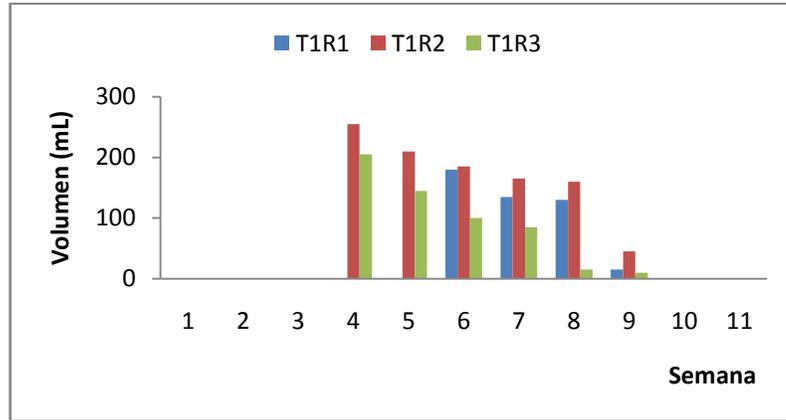


Figura 18. Producción semanal de biogás del primer tratamiento.

En el primer tratamiento la producción se centró alrededor de 40 días luego de que se inicio el proceso de fermentación anaeróbica, y se obtuvo después de 28 días de iniciado el proceso, diariamente el promedio 28.57 mL, y se observo un máximo de 35 mL y de un mínimo de 5 mL diario. Mientras que semanalmente las primeras semanas se concentro la producción de biogás, llegando a la semana nueve donde se puedo observar que los datos eran inferior a 50 mL, para llegar a la semana diez donde se puedo concluir que se había acabado el proceso. Los resultados obtenidos fueron bastantes bajos a pesar que los demás factores estaban controlado y estabilizados de manera optima. El máximo fue de 255 mL para la repetición dos la cuarta semana, mientras que el mínimo semanal fue de 10 mL en la repetición tres la novena semana. El promedio semanal para este tratamiento fue de 68 mL considerando todo el proceso de producción de biogás, el cuál duró 10 semanas aproximadamente.

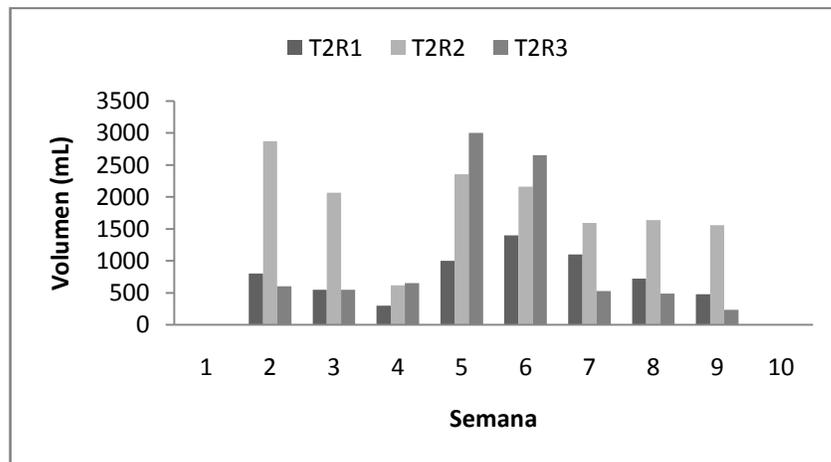


Figura 19. Producción semanal de biogás del segundo tratamiento.

En la Figura anterior, la cual es muy diferente a la figura 18, la producción de biogás se inicia a contar de la segunda semana con valor más elevado siendo la segunda repetición la que produjo biogás de mayor cantidad y más estable. Solo la cuarta semana presentó una baja producción de biogás y puede haber sido porque durante esa semana la temperatura ambiente fue inferior a las demás semanas, lo que pudo haber retardado la generación de biogás. Otro dato que entregó la figura fue que el proceso dura siete semanas donde el valor máximo fue de 3000 mL en la repetición tres y el mínimo valor fue de 236 mL también para la repetición tres. El promedio de las tres repeticiones fue de 997,5 mL. Con los resultados que se obtuvieron podemos indicar que la producción de biogás fue la óptima bajo los parámetros que se manejan durante este proceso. También se debe de señalar que el periodo de producción de biogás fue de 8 semanas, lo que indica que el tratamiento utilizado es más eficiente y se obtienen mejores resultados.

La gran diferencia de producción de biogás entre los ensayos realizados fue que en el primer tratamiento no se trabajó con inoculante, lo que perjudicó la etapa metanogénica del proceso, ya que, esto estaba pero en baja cantidad lo que afectó a su establecimiento y debido a gran cantidad de materia prima para su sobrevivencia generó un nivel de estrés que evitó la proliferación de la colonia al interior del biodigestor; en cambio, el segundo tratamiento se utilizó un inoculante como el guano fresco de bovino que permitió que en la etapa metanogénica la producción de biogás por las bacterias, ya establecida en el guano generara colonias, las que utilizaron de mejor forma las materias primas para la elaboración y calidad del biogás.

El rendimiento promedio que se obtuvo en primer tratamiento fue de 1L de biogás por 30 Kg. de materia prima. Mientras que el segundo tratamiento se consiguió 10 L de biogás por 32 Kg. de materia prima.

## CONCLUSIONES

Los desechos de beterraga y alperujo utilizados como fuente potenciales en la producción de biogás permiten ser mezclados para ajustar la relación C:N, parámetro fundamental en la producción de biogás. Pero generan un gas de mala calidad y en baja cantidad, por lo que es necesario utilizar un inoculante que cumpla un efecto primer o partidor en la formación de biogás, este inoculante debe contener bacterias metanogénicas como son el estiércol o guano fresco de bovino.

Si se logra mantener una relación carbono nitrógeno de 30:1, con una temperatura dentro del rango mesofílico, en la combinación entre el residuo de beterraga con el alperujo más el guano fresco de bovino debería ser suficiente para obtener una concentración de metano ( $\text{CH}_4$ ) en promedio de 65%.

Es muy importante mantener una temperatura constante al interior de los biodigestores, porque cambios bruscos de temperatura disminuyen la colonia de bacterias y de microorganismos encargados en la producción de biogás, este factor es una de las variables más importantes de controlar, porque podría ser capaz de generar una escasa producción de metano en el biogás y por ende una muy baja descomposición del material orgánico utilizado en el proceso.

El tiempo de retención hidráulica en condiciones mesofílicas, de 32°C en promedio, se obtiene alrededor de los 65 días, mientras que el tiempo de inicio del proceso ocurre a los 20 días luego de iniciado el proceso de fermentación anaeróbica.

## BIBLIOGRAFIA

Albuquerque, J.A., González, J., García, D., Cegarra, J. 2004. Agrochemical characterisation of alperujo, a solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction. *Bioresource Technology*91: 195-200.

Aliaga, L. 2006. Evaluación de producción de biogás utilizando desechos porcícolas de Zamorano. Disponible en [http://zamo-oti-02.zamorano.edu/tesis\\_infolib/2006/T2195.pdf](http://zamo-oti-02.zamorano.edu/tesis_infolib/2006/T2195.pdf). Leída el 9 de Agosto del 2010.

Angelidaki, I. 1997. Anaerobic Digestion in Denmark past, present and future. Aprovechamiento energetic de residues orgánicos. Berlín, alemania. p. 214-215.

Anónimo. 2007. Biogás. Disponible en <http://www.emison.es/medio-ambiente/AGUAS/biogas/biogas.pdf> . Leída el 15 de Agosto del 2009.

Aparicio, R y Harwood, J. 2003. Manual de aceite de Oliva. Capítulo 2: Aspectos tecnológicos. Primera Edición. 612p

Aranda, E. 2006. Fraccionamiento físico del alpeorujo como base para desarrollar una estrategia biológica con hongos saprobios y arbusculares para la eliminación de su fototoxicidad. Universidad de Granada, Facultad de Ciencias. Granada, España. 281p

Basáez, L. 2009. ¿Qué es el pH?: Formas de medirlo. Disponible en <http://www.ciencia-ahora.cl/Revista23/11BASAEZ.pdf> Leído el 1 de Mayo del 2011.

Bidlingmaier W. 2006. Fifth ORBIT Conference Probes Anaerobic Digestion. *BioCycle Journal of Composting and Organics Recycling*. 47(9), 42-49.

Campos, E. 2001. Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sol, Laboratori d'Enginyeria Ambiental, Univesitat de Lleida. Tesis Doctoral, doctor Ingeniero Agrónomo. 362p

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2000. Norma de Calidad de Compost. Departamento Descontaminación, Planes y Normas. Disponible en <http://www.lombricultura.cl/lombricultura.cl/userfiles/file/biblioteca/normas/Norma%20calidad%20COMPOST.pdf> Leído 5 de Mayo del 2012.

Decap, A. 2006. Planta de Biogás y vivero Metropolitano en Lo Valledor. Proyecto de título, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Santiago, Chile. 87p

Flotats, X., Bonmati, A., Campos, E. y Teira, R. 2000. El proceso de secado de purines en

el marco de Gestión Integral de Residuos Ganadero, Tratamiento de residuos ganaderos, Enero, Madrid (España), p12-15.

Galleguillos, K. 2008 Incidencia de agentes estructurantes en el proceso de compostaje de alperujo. Seminario de título, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias. Santiago, Chile. 91p

Gendebien, A., Pauwels, M., Constant, M., Ledrut-Damanet, M. J., Nyns, E., Willumsen, H., Butbon, J., Fabry, R. y Ferrero, G. 1992. "Landfill Biogás. From Environment to Energy" Commission of the European Communities. Final report EUR 14017/ 1 EN, Luxemburgo.

Gonzalez, S. 1997. Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: Análisi de variables y modelización. Tesis Doctoral. Gijón, España. Universidad de Oviedo, Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del medio ambiente. 236p

Hernández, A. 1994. Depuración de Aguas Residuales. Tercera edición. Edit. Paraninfo. Madrid, España. 106p

Hilbert, J. 2000. Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería rural, INTA. Castellar, Argentina. 57p

Lay, J., li, Y., Noyke, T. 1998. "The Influence of pH and Ammonia Concentration on the Methane Production in High-Solids Digestion Processes". Water Environment Research, Vol 50, N°5, Julio/Agosto.

Márquez, C. 2005. Estudio del tratamiento de lodos provenientes de pisciculturas mediante un tratamiento de digestión anaerobia. Tesis de Pregrado. Temuco, Chile. Universidad Católica de Temuco, Escuela de Ingeniería Ambiental. 103p.

Oficina Regional para América Latina y el Caribe (FAO). 1986. Reciclaje de materias orgánicas y biogás. Una experiencia en China. Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile. 320p.

Moncayo, G. 2010. Biodigestores: Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y planta de biogás. Disponible en [http://programaecomar.com/Biodigestores\\_Aqualimpia.pdf](http://programaecomar.com/Biodigestores_Aqualimpia.pdf). Leída el 30 de Julio del 2010.

Páramo, V. 2008. Biofertilizantes, producción exitosa de fertilizantes biológicos en Michoacán. Disponible en <http://www.hortalizas.com/biocontrol/?storyid=1255> . Leída el 19 de Mayo del 2010.

Peréz, J. 2010. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Facultad de

Ciencias físicas y matemáticas. Santiago, Chile. p 83

Programa de Agricultura de Precisión (PROPAG). 2007. Primer informe Determinación de zonas agrotérmicas homogéneas del territorio del Punilla. Universidad de Concepción Facultad de Agronomía. Concepción, Chile. 146p

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Ministerio de Agricultura de Chile (ODEPA), 2008. Mercado del aceite de oliva. Disponible en <http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/servlet/contenidos.ServletDetallesScr?idcla=2&idn=2057> . Leída el 10 de Julio del 2009

Rivas, O., Faith, M. y Guillén, R. 2010. Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Tecnología en Marcha, Vol. 23, N° 1, Enero-Marzo 2010, P. 39-46. Disponible en [http://www.tec.cr/sitios/Vicerrectoria/vie/editorial\\_tecnologica/Revista\\_Tecnologia\\_Marcha/pdf/tecnologia\\_marcha\\_23-1/23-1%20p%2039-46.pdf](http://www.tec.cr/sitios/Vicerrectoria/vie/editorial_tecnologica/Revista_Tecnologia_Marcha/pdf/tecnologia_marcha_23-1/23-1%20p%2039-46.pdf). Leída el 9 de Agosto del 2010

Rodriguez, J., Kamel, E., Rubos, E. y Delepiani, A. 1997. Resultados experimentales sobre la producción de biogás a través de la Bora y el estiércol de ganado. Agronomía Trop. 47 (4): 441 – 455.

TDC Olive. 2005. Reutilización de los subproductos de la producción de aceitunas y del aceite de Oliva. Disponible en <http://www.asajasev.es/asp/files/Reutilizaci%C3%B3n%20de%20los%20subproductos%20de%20la%20producci%C3%B3n%20de%20las%20aceitunas%20y%20del%20aceite%20de%20oliva.pdf>. Leída el 15 de Julio del 2009

Traub, A. 2008. El Biogás: alternativa energética emergente. Inter campo, N° 108: 26-30

Uribe, J. M. 1993. Evaluación de la producción de biogás en material vegetativo de tuna, sometido a un proceso de fermentación metánica. Tesis de Pregrado. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 47p

USCC. 2004. (The composting council research and education foundation). Test Methods for the Examination of Composting and Compost. U. S.

Vargas, G. 2005. Estudio de la generación de biogás a partir de la sinergia en mezclas de algas marinas, biodegradadas en un sistema de bioconversión anaerobias de dos etapas. Memoria de título. Universidad Católica de Temuco. Facultad de Ciencias. Temuco, Chile. 95p

Varnero, M.T. 1992. Manual de reciclaje orgánico y biogás. Ministerio de Agricultura, Fondo de Investigación Agropecuaria. Santiago, Chile. 52p

Vásquez, H. 2009. El biogás como fuente de energía renovable para Chile. Memoria para

optar al título de Ingeniero civil Industrial. Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Industrias. Santiago, Chile. P207

Veeken, A. y Hamelers, B. 2000. Effect of substrate – seed mixing and leachate recirculation on solid state digestion of biowaste. *Review Technology* 5: 23-47

Veeken, A y Sanders, W. 2002. Analysis and optimization of the Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. USA.

Villalobos, J. 2009. Evaluación del potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos generados por la industria salmonícola, mediante un proceso de fermentación metánica. Memoria de Título. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. p 71