



# UNIVERSIDAD DE SONORA

---

---

DIVISIÓN DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

"El saber de mis  
hijos hará mi

**BIOMETANIZACIÓN DE RESIDUOS  
AGROINDUSTRIALES DEL MELÓN VERDE  
(*Cucumis melo*)**

TESIS

Que para obtener el título de

**INGENIERO QUÍMICO**

Presenta:

**LILIA CHIZELT MEZA MAYTORENA**

Hermosillo, Sonora

Mayo 2016

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



*“Empieza haciendo lo necesario, después lo posible,  
y de repente te encontrarás haciendo lo imposible.”*

San Francisco de Asís

# DEDICATORIA

*Con cariño a mi madre Rita Elia Maytorena Duarte por su esfuerzo, sacrificio, amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, además de ser mi ejemplo a seguir.*

*A mis hermanos Ezequiel, Yuridia y Gustavo por ser la alegría de la casa, por su apoyo y comprensión a lo largo de mis estudios.*

*A la Familia Jaime Quijada por ser una inspiración para mí, por todos los consejos recibidos, además del apoyo incondicional que me han brindado.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por el regalo de la vida, por darme la fortaleza para salir adelante y nunca soltarme de su mano.

A la Universidad de Sonora por contar con buenas instalaciones para poder adquirir algunos de los conocimientos que conforman a tan bella carrera como lo es la Ingeniería Química.

Al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia por contar con excelentes profesores, quienes fueron parte fundamental de mi formación académica y por darme la oportunidad de adquirir grandiosas experiencias.

A mi director de tesis, el Dr. Javier Almendariz por darme la oportunidad de ser parte de su grupo de trabajo, por regalarme un poco de su tiempo para brindarme algunos consejos tanto para el desarrollo de esta investigación como para mi desarrollo profesional, además de su confianza y amistad.

A mi comité tutorial la Dra. Teresa Certucha, Dra. Onofre Monge y M.C Guadalupe Martínez por aportar su experiencia profesional en el desarrollo de este trabajo, por los conocimientos transferidos a lo largo de mi carrera, por su paciencia y amistad.

Al Laboratorio de Biorremediación por abrirme las puertas para realizar este trabajo en sus instalaciones, además de proveerme de todos los equipos y materiales que utilicé para llevar a cabo satisfactoriamente la parte experimental de dicha investigación. Además porque en él encontré a grandes personas como Gaby Berrelleza, Citlali Gastélum, Lupita López y Luis Gasca quienes me ayudaron en el desarrollo de mi tesis y ofrecieron su valiosa amistad.

A la profesora María Elena Ochoa por compartir un poco de su tiempo para enseñarme las técnicas de caracterización y realizar conmigo parte de lo experimental de esta investigación.

A mi madre por creer siempre en mí, por ser el mejor ejemplo de mujer que puedo tener: luchona, perseverante, trabajadora, decidida y audaz. Gracias por todos los

sacrificios que hace para sacarnos adelante a mí y a mis hermanos, por darnos la ayuda y comprensión que necesitamos para poder superarnos y cumplir nuestras metas.

A mis hermanos, por la confianza que han depositado en mí y por todos esos momentos que hemos pasado juntos, los cuáles me han ayudado a ser mejor persona. Los quiero mucho!

A ti José, por tu amor, por estar siempre a mi lado en cualquier momento, por enseñarme que la vida es un balance entre el estudio y la diversión, por contagiarme tu sonrisa en mis momentos de tristeza. Gracias por confiar en mí, por tu apoyo y comprensión en cada paso que doy. Te amo.

En especial quiero agradecer a mis profesores Ana Quijada y Joel Jaime por su ayuda durante mi carrera, tener fe en mí y por los conocimientos y consejos brindados dentro y fuera de la escuela.

A Edissa y Mariana por ser las hermanas mayores que nunca tuve, por estar siempre ahí para ayudarme, apoyarme, escucharme y darme sus consejos en todo momento. Con ustedes aprendí a ver la vida de una manera diferente, gracias por tanto aprendizaje. Las quiero mucho!

A mis compañeros de carrera, en especial a mis amigas más allegadas Dulce y Claudia por la amistad brindada desde el primer semestre de la carrera, por ser mis compañeras de equipo ya que gracias a ustedes el día a día se hizo más fácil y por todas las aventuras que hemos pasado juntas.

A mi sobrinas Amaya y Alizah por ser ese rayito de luz que ilumina mis días, por sus ocurrencias que siempre me sacan una sonrisa, nunca olviden a su niña interior!

A mi familia, mi abuela: Rita Duarte, mis tíos: René, Roberto, Rebeca, Ricardo, Rosario, María Luisa, Paty y Beatriz quienes me ofrecieron su apoyo y ayuda desinteresadamente.

También quiero agradecer a la familia Gómez Bustamante por esa calidez que los caracteriza y por toda su comprensión.

# CONTENIDO

	Página
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABLAS .....	xi
RESUMEN .....	xii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo.....	4
2.2. Objetivos Específicos .....	4
3. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS .....	5
3.1. Producción Agroindustrial en México .....	5
3.1.1. Producción agroindustrial en Sonora .....	8
3.2. Melón ( <i>Cucumis melo</i> ) .....	11
3.3. Mermas de Productos Agroindustriales.....	12
3.4. Contaminación por Desperdicios Agroindustriales .....	15
3.5. Aprovechamiento de los Residuos Agroindustriales.....	16
3.6. Digestión Anaerobia para el Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales.....	18
3.6.1. Etapas .....	19
3.6.2. Digestión anaerobia en dos etapas.....	21
3.7. Biogás .....	22
3.8. Antecedentes de Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales para la Obtención de Biogás. ....	24
4. METODOLOGÍA .....	26
4.1. Procesamiento de la Muestra.....	27
4.2. Caracterización Físicoquímica del Jugo de Melón Verde .....	28
4.3. Potencial Bioquímico de Metano del Jugo de Melón Verde.....	28
4.4. Actividad Metanogénica Específica .....	30



4.5.	Digestión Anaerobia en dos Etapas del Jugo de Melón Verde .....	32
4.5.1.	Hidrólisis del jugo de melón verde .....	32
4.5.2.	Producción de biogás de los ácidos orgánicos producidos durante la hidrólisis del jugo de melón verde .....	32
4.6.	Técnicas Analíticas .....	33
4.6.1.	Sólidos suspendidos totales .....	33
4.6.2.	Demanda química de oxígeno (DQO).....	34
4.6.3.	Determinación de azúcares .....	36
4.6.4.	Nitrógeno total .....	37
4.6.5.	Humedad.....	41
4.6.6.	Retrotitulación.....	42
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
5.1	Caracterización Físicoquímica del Jugo de Melón Verde .....	44
5.2	Potencial Bioquímico de Metano del Jugo de Melón Verde .....	46
5.3.	Digestión Anaerobia en dos Etapas del Jugo de Melón Verde.....	51
5.3.1.	Hidrólisis del jugo de melón verde.....	51
5.3.2.	Producción de biogás de los ácidos orgánicos producidos durante la hidrólisis del jugo de melón verde .....	56
6.	CONCLUSIONES .....	59
7.	REFERENCIAS .....	60
8.	ANEXOS.....	66
8.1	Cálculos de la Actividad Metanogénica Específica.....	66
8.2	Curva de Calibración de Azúcares .....	67
8.3	Cálculos de la AME Máxima .....	67

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 3.1.</b> Distribución de la biomasa de a) mazorcas y olotes, b) paja de sorgo, c) paja de cebada y d) paja de trigo. ....	6
<b>Figura 3.2.</b> Distribución de la biomasa de a) paja de frijol, b) paja de algodón, c) bagazo del pulque de maguey y d) cáscara y pulpa del café. ....	7
<b>Figura 3.3.</b> Distribución de la biomasa de a) bagazo de la caña de azúcar y b) todas las actividades agrícolas. ....	8
<b>Figura 3.4.</b> Superficie cosechada en Sonora (SIAP, 2011). ....	9
<b>Figura 3.5</b> Mermas de frutas y hortalizas en diferentes regiones (Gustavsson <i>et al.</i> , 2011). ....	13
<b>Figura 3.6.</b> Etapas del proceso de digestión anaerobia (Appels <i>et al.</i> , 2008) .....	21
<b>Figura 4.1</b> Diagrama general de la metodología utilizada en el presente estudio.	26
<b>Figura 4.2</b> Procesamiento de la muestra. ....	27
<b>Figura 4.3.</b> Medición de metano por desplazamiento de NaOH al 3%. ....	30
<b>Figura 4.4</b> Obtención de sólidos suspendidos totales. ....	34
<b>Figura 4.5</b> Digestión a reflujo abierto. ....	36
<b>Figura 4.6.</b> Medición de la concentración de dextrosa por el método de DNS. ....	37
<b>Figura 4.7.</b> Obtención del nitrógeno total por el método de micro Kjendahl .....	38
<b>Figura 4.8.</b> Micro destilador Kjeldahl. ....	39
<b>Figura 4.10.</b> Sistema utilizado en la técnica retrotitulación .....	43
<b>Figura 5.1.</b> Composición en porciento en peso húmedo de los constituyentes del melón verde ( <i>Cucumis melo</i> ) .....	44
<b>Figura 5.2.</b> Producción de metano a concentraciones crecientes de materia orgánica (DQO) del jugo de melón verde. ....	47

<b>Figura 5.3.</b> Comportamiento dinámico de los valores de AME experimental y los valores de AME calculados por el modelo de Monod. ....	48
<b>Figura 5.4.</b> Producción total de metano a concentraciones crecientes de jugo de melón verde. ....	50
<b>Figura 5.5.</b> Consumo de azúcar (g/L) .....	52
<b>Figura 5.6.</b> Producción de AGV's durante la hidrólisis del jugo de melón en condiciones mesofílicas y termofílicas.....	54
<b>Figura 5.7.</b> Producción de biogás de los ácidos orgánicos producidos durante la hidrólisis del melón verde.....	57
<b>Figura 8.1.</b> Curva de calibración de azúcares.....	67

## LISTA DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 3.1.</b> Producción de melón en el estado de Sonora en el 2014. ....	10
<b>Tabla 3.2.</b> Breves explicaciones de definiciones de pérdidas y residuos. ....	14
<b>Tabla 3.3.</b> Composición del biogás. ....	23
<b>Tabla 4.1</b> Métodos analíticos empleados para la caracterización del jugo de melón verde.....	28
<b>Tabla 4.2.</b> Medio mineral .....	29
<b>Tabla 5.1.</b> Caracterización físicoquímica del jugo de melón verde.....	45
<b>Tabla 5.2</b> Parámetros cinéticos del modelo. ....	49
<b>Tabla 5.3.</b> Digestión anaerobia en dos etapas del jugo de melón verde. ....	51
<b>Tabla 5.4.</b> Parámetros numéricos del modelo de Gompertz en la producción de AGV's.....	55
<b>Tabla 5.5.</b> Parámetros numéricos del modelo de Gompertz en la producción de Metano.....	58

## RESUMEN

Hoy en día, un tercio de la producción agrícola se convierte en residuo agroindustrial. Debido a su naturaleza y composición, los residuos agroindustriales se deterioran fácilmente y como consecuencia causan problemas medioambientales. Considerando el alto contenido orgánico, estos residuos pueden ser aprovechados por un tratamiento biológico como la digestión anaerobia para producir biogás que puede utilizarse para términos energéticos. El objetivo de este trabajo fue evaluar la producción de biogás a partir de residuos agroindustriales del melón verde (*Cucumis melo*). Para ello se llevó a cabo la caracterización del jugo de melón verde que consistió en diversos estudios fisicoquímicos principalmente nitrógeno y azúcar, posteriormente para valorar la producción de metano mediante el desplazamiento de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 3% se efectuaron estudios en lote a condiciones de temperatura y presión de 37°C y 0.97 atm respectivamente durante 62 días y por último se llevó a cabo la digestión anaerobia en dos etapas en condiciones mesofílicas y termofílicas con temperaturas de 37°C y 55°C respectivamente. En base a los resultados de los estudios fisicoquímicos, el jugo de melón verde presentó un elevado contenido de azúcares (41 g/L), lo cual se vio reflejado en los resultados de los estudios en lote ya que favoreció la producción de biogás con lo que se obtuvo 38 LCH<sub>4</sub>/Kg de jugo de melón verde equivalentes a 9.43 LCH<sub>4</sub>/gSVT; lo que en términos energéticos corresponde a 136.8 KWh/Ton de melón. Por último, las condiciones mesofílicas favorecieron la producción de AGV's mientras que las condiciones termofílicas fueron favorables para la producción de biogás. Además en base a la comparación realizada entre la producción de biogás obtenida al utilizar la digestión anaerobia en una y en dos etapas para la misma carga orgánica se encontró que esta última presentó una mayor producción de biogás, por lo que es mejor utilizar la digestión anaerobia en dos fases. Se concluye que los residuos agroindustriales de melón verde son una buena fuente para obtener energía a partir de biogás por medio del proceso de la digestión anaerobia, ya sea en una o dos etapas.

# 1. INTRODUCCIÓN

México es el tercer país más grande de América Latina en términos del área de tierra de cultivo, para el 2006 se produjeron 75.73 millones de toneladas de materia seca proveniente de 20 cultivos, de los cuales 60.13 millones de toneladas corresponden a residuos primarios, obtenidos al momento de la cosecha, entre los que están: hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. El resto, 15.60 millones de toneladas corresponden a residuos secundarios obtenidos del procesamiento postcosecha, entre los que están: bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, así como pulpa de café (Saval, 2012).

Sonora tiene una extensión de 179 mil 503 kilómetros cuadrados; dicha superficie representa el 9.2% del territorio continental de la República Mexicana; por ello, el volumen de su producción agrícola es de seis millones 727 mil 168 toneladas. Además coopera con 7% del valor total de la producción nacional, con 20 mil 619 millones 351 mil pesos, cantidad que alcanza para colocarse en el tercer lugar nacional. En cuanto a volumen, 8.4 de cada diez kilos producidos en el sector primario del estado son del subsector agrícola y 5.6 de cada diez pesos generados son también de los productos agrícolas del estado (SAGARPA, 2011).

Gustavsson *et al.*, (2011) estimaron que las pérdidas debidas a la elevada producción de mermas y desperdicios de alimentos a nivel global alcanzan al 30% en el caso de los cereales, al 40–50% en el caso de los tubérculos, frutas y verduras, al 20% para las semillas oleaginosas y al 30% para el pescado.

Debido a la naturaleza y composición de los residuos agroindustriales, éstos se deterioran fácilmente y como consecuencia causan mal olor. Considerando el alto contenido de humedad y contenido orgánico, estos residuos pueden ser tratados por un tratamiento biológico como la digestión anaerobia (Sitorus *et al.*, 2013). La digestión anaerobia es un proceso bioquímico de degradación, el cuál es

extensamente usado para la recolección de energía proveniente de diferentes tipos de biomasa, especialmente de productos de la agricultura así como de desechos agroindustriales (Scano *et al.*, 2014). Esta técnica es considerada una fuente de energía renovable porque la cantidad producida de biogás es aceptable para la producción de energía y con ello remplazar los combustibles fósiles (Sitorus *et al.*, 2013).

Autores como Graminha *et al.*, (2008), Neethu *et al.*, (2015), Domínguez-Bocanegra *et al.*, (2015), Viswanath *et al.*, (1992), Chanakya *et al.*, (2012), Celik *et al.*, (2015), Zainab *et al.*, (2016), entre otros, utilizaron la técnica de la digestión anaerobia en diversos residuos agroindustriales tales como: salvado de trigo, salvado de arroz, algodón, jugo de tuna, agua de coco, así como residuos de frutas y verduras: banana, cacahuete, pistacho, mango, piña, tomate, etc. Todo esto con la finalidad de producir ácido láctico, encimas (lipasa y xilanas), formas de energía como lo son el bioetanol y biogás y finalmente, lograr la descomposición del material lignocelulósico presente en estos residuos para convertirlos en alimento de mayor digestibilidad para los animales.

El biogás es un producto de la digestión anaerobia cuando el material orgánico es descompuesto por microorganismos en un ambiente libre de oxígeno, está compuesto principalmente de CH<sub>4</sub> (65%) y CO<sub>2</sub> (35%). Desde un punto de vista técnico, el biogás se produce principalmente a partir de materia orgánica húmeda. Como ejemplo de ello tenemos el material orgánico presente en los residuos agroindustriales en el procesamiento de alimentos así como también los cultivos energéticos (maíz y cultivos de concreto) y/o los residuos agrícolas (paja, hojas de remolacha azucarera) (Appels *et al.*, 2011 y Rios *et al.*, 2016). Puede ser utilizado como fuente de energía renovable ya que es un combustible limpio y amigable con el ambiente que puede ser usado para cocinar a través de la combustión directa (Zainab *et al.*, 2016), también puede utilizarse para alimentar generadores y producir vapor y energía (Sitorus *et al.*, 2013).

En base a lo anterior el objetivo de este trabajo es evaluar la producción de biogás a partir de mermas agroindustriales del melón verde recolectados en la costa de

Hermosillo, con la finalidad de erradicar un foco de contaminación; así como de aprovechar los desechos para producir un compuesto de alta energía como el metano.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo**

- Evaluar la producción de biogás a partir de residuos agroindustriales del melón verde (*Cucumis melo*).

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar física y químicamente los residuos del melón verde evaluando el contenido de azúcar, nitrógeno, materia orgánica, sólidos y humedad.
- Estudiar la cinética de la producción de biogás de los residuos del melón verde en ensayos por lote.
- Evaluar la eficiencia de la digestión anaerobia en dos etapas del jugo de melón verde en condiciones mesofílicas y termofílicas en ensayos por lote:
  - Hidrólisis.
  - Producción de biogás.

### **3. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS**

#### **3.1. Producción Agroindustrial en México**

México es el tercer país de Latinoamérica con las condiciones aptas para establecer áreas de cultivo, seguido de Brasil y Argentina. En el 2006, el área de cultivo fue de 21.7 millones de hectáreas con una producción agrícola de 270 millones de toneladas. Los cultivos tradicionales como maíz ocupan el 40% del área total cultivada mientras que el sorgo, frijol, avena, caña de azúcar, trigo y cebada ocupan alrededor del 30%. Los residuos de biomasa generados por estas actividades podrían tener diversos usos tales como comida para animales, mantillo, y composta. Sin embargo la utilización de biomasa como fuente de energía es una opción atractiva para el sector rural debido a que tiene diversos beneficios para la sociedad. Así pues, México puede llegar a ser un foco de atención para la producción de biocombustibles (Valdez-Vázquez *et al.*, 2010).

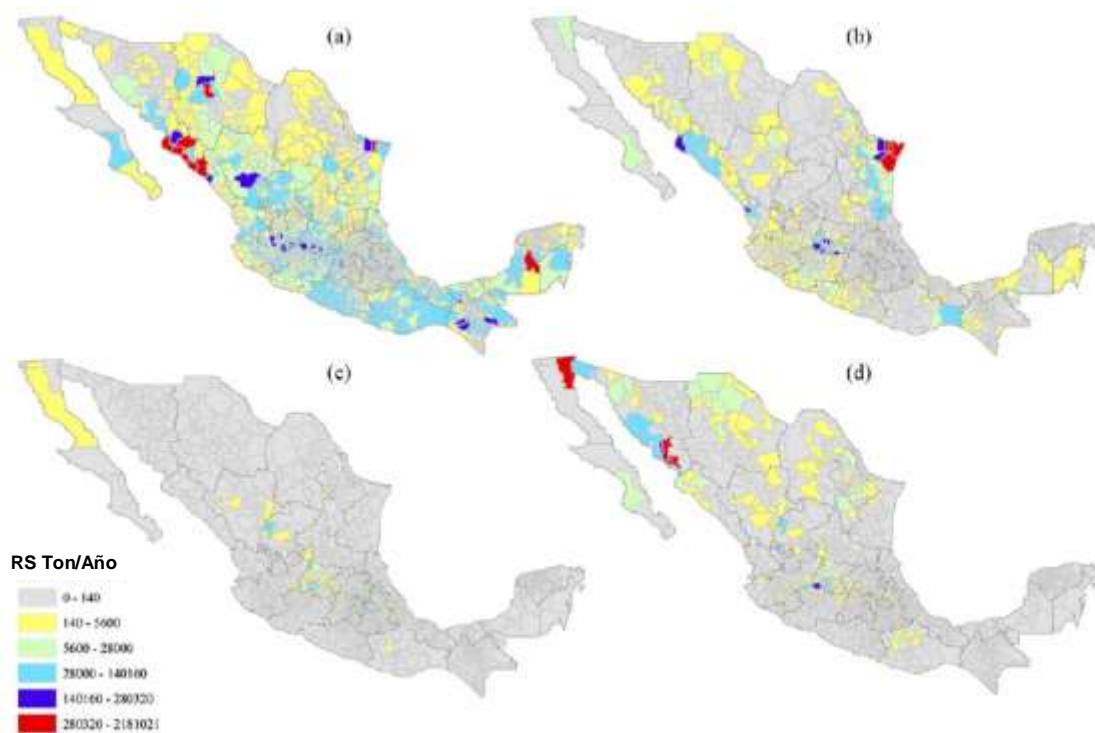
Para el 2006, en México se produjeron 75.73 millones de toneladas de materia seca proveniente de 20 cultivos, de los cuales 60.13 millones de toneladas corresponden a residuos primarios, obtenidos al momento de la cosecha, entre los que están: hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. El resto, 16.50 millones de toneladas corresponden a residuos secundarios obtenidos del procesamiento postcosecha, entre los que están: bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, así como pulpa de café (Saval, 2012).

Algunos datos que sirven para tener una idea del volumen de residuos que generan diferentes tipos de industrias son los siguientes: la industria de la cerveza solamente utiliza el 8% de los componentes del grano, el resto 92%, es un residuo; la industria del aceite de palma utiliza el 9%, el 91% restante es un residuo; la industria del café

utiliza el 9.5%, el 90.5% restante es un residuo y la industria del papel utiliza menos del 30%, el resto es un residuo (Saval, 2012).

La Figura 3.1 muestra la distribución espacial de los recursos de la biomasa de los principales cultivos de cereales en México. Los productos del maíz tienen el más alto potencial, alrededor de un total de 39.4 millones de toneladas de materia seca distribuida nacionalmente (Figura 3.1a). En México, los cultivos de maíz tienen un alto valor social y económico, puesto que el 30% de la población empleada del sector primario se dedica al cultivo de este cereal.

Las Figuras 3.1b-d muestran la distribución de la biomasa de sorgo, cebada y trigo. La paja de sorgo tiene el segundo lugar en la producción más alta de biomasa en México, se encuentra principalmente distribuido en Tamaulipas. A diferencia de la paja de cebada, la cual se encuentra distribuida en la región centro. Adicionalmente, la paja de trigo se encuentra en las regiones norte y centro principalmente en Baja California y Sonora (Valdez-Vázquez *et al.*, 2010)

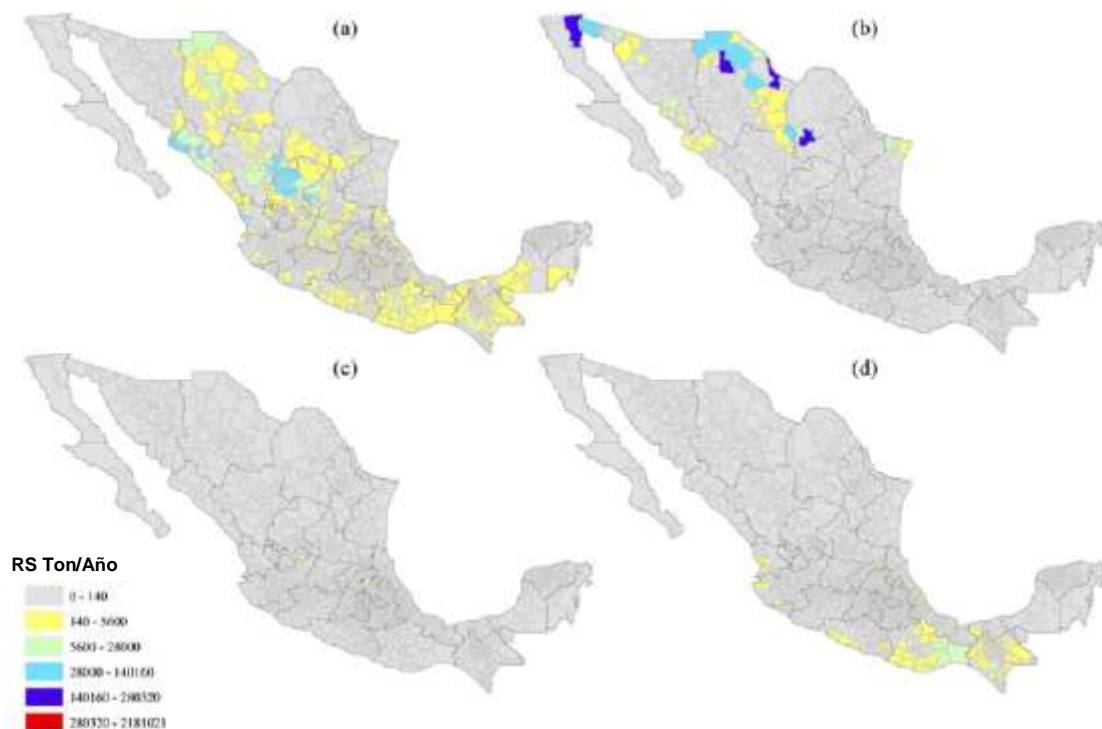


**Figura 3.1.** Distribución de la biomasa de a) mazorcas y olotes, b) paja de sorgo, c) paja de cebada y d) paja de trigo.

Nota: Los colores indican las toneladas de residuos secos por año (Valdez-Vázquez *et al.*, 2010).

En la Figura 3.2 tenemos que para México, el principal cultivo de leguminosas son los frijoles, el cual representa el 30% del cultivo del mundo. Por lo tanto los residuos generados de los frijoles apenas si representan el 3% de los residuos primarios.

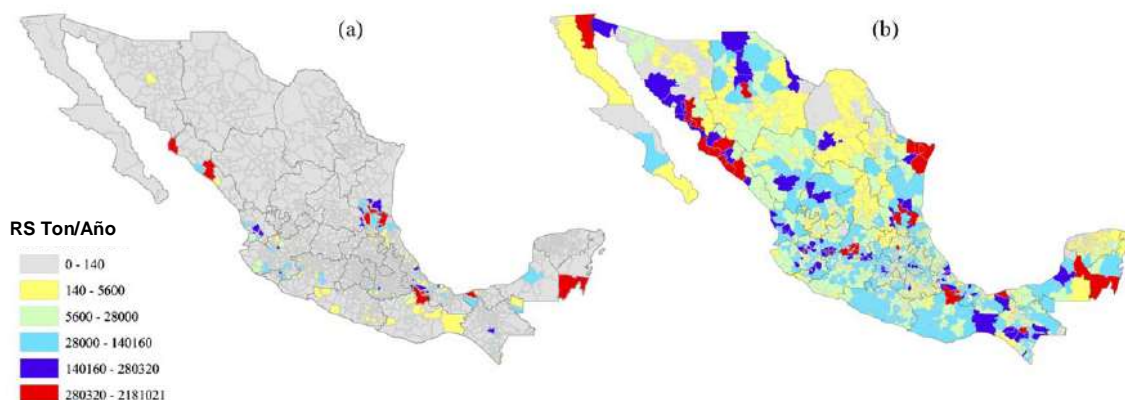
El cultivo del algodón es limitado solo se presenta en algunos estados del norte como Baja California, Chihuahua y Durango debido a la alta acumulación de residuos. Otro residuo típico de México es el bagazo de maguey ya que diferentes bebidas alcohólicas como el pulque, mezcal y tequila son obtenidos de diferentes variedades del maguey, solamente la industria del pulque produce cerca de 1.68 millones de toneladas de bagazo seco localizado en el estado de Hidalgo. Por último, tenemos al residuo del café, esta industria genera 0.51 millones de toneladas de sólidos secos, los cuales cuentan con una elevada producción de bioenergía, donde los principales estados productores son Veracruz, Oaxaca y Chiapas.



**Figura 3.2.** Distribución de la biomasa de a) paja de frijol, b) paja de algodón, c) bagazo del pulque de maguey y d) cáscara y pulpa del café.

Nota: Los colores indican las toneladas de residuos secos por año (Valdez-Vázquez *et al.*, 2010).

En la Figura 3.3a encontramos al bagazo de la caña de azúcar representado por 7.58 millones de toneladas de materia seca con algunos municipios con un alto potencial de biomasa. Finalmente la Figura 3.3b representa el total de la producción anual de los 20 cultivos de México (Valdez-Vázquez *et al.*, 2010).



**Figura 3.3.** Distribución de la biomasa de a) bagazo de la caña de azúcar y b) todas las actividades agrícolas.

Nota: Los colores indican las toneladas de residuos secos por año (Valdez-Vázquez *et al.*, 2010).

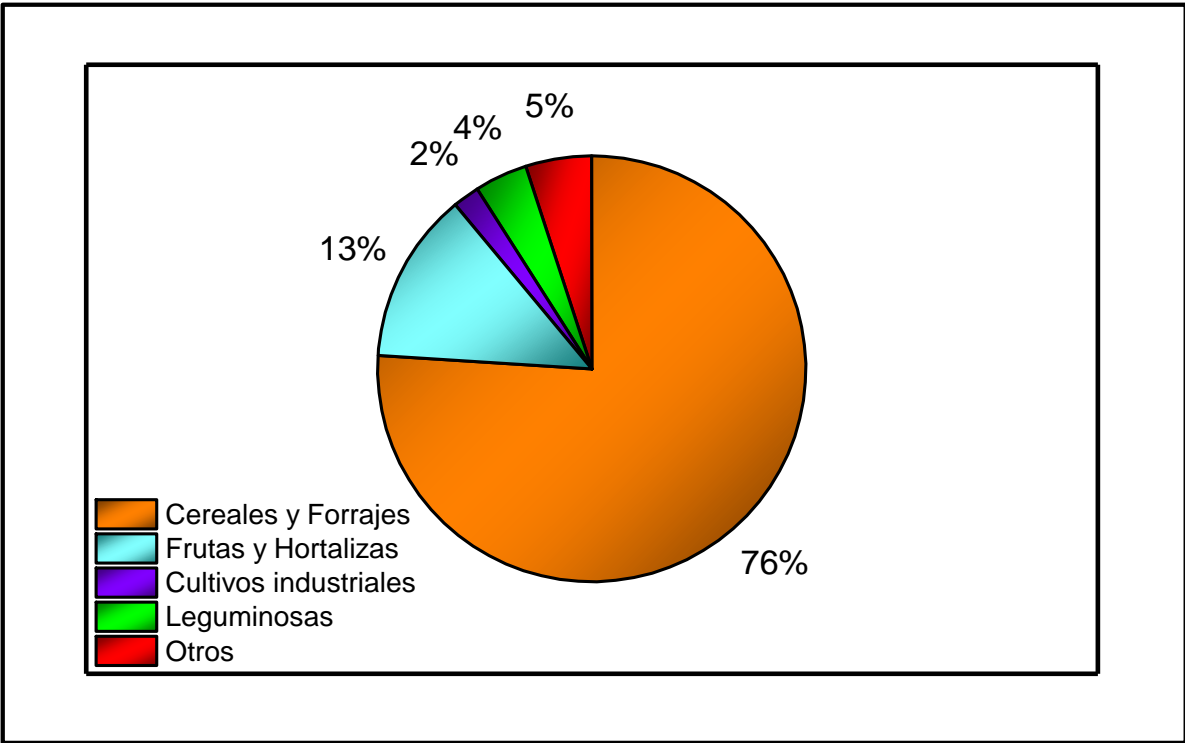
### 3.1.1. Producción agroindustrial en Sonora

Sonora tiene una extensión de 179 mil 503 kilómetros cuadrados; dicha superficie representa el 9.2% del territorio continental de la República Mexicana; por ello, el volumen de su producción agrícola es de seis millones 727 mil 168 toneladas. Además coopera con 7% del valor total de la producción nacional, con 20 mil 619 millones 351 mil pesos, cantidad que alcanza para colocarse en el tercer lugar nacional. En cuanto a volumen, 8.4 de cada diez kilos producidos en el sector primario del estado son del subsector agrícola y 5.6 de cada diez pesos generados son también de los productos agrícolas del estado (SAGARPA, 2011).

La agrícola y pesquera son las principales producciones del sector primario para el estado de Sonora. En el 2010 el volumen agrícola fue de siete millones 234 mil

toneladas, lo cual equivale a un crecimiento de 7.5% en comparación con el 2009; el valor (22 mil 156 millones de pesos) aumentó 7.5 por ciento; mientras que para el 2011 se obtuvieron seis millones 727 mil 168 de toneladas (SAGARPA, 2011).

En el 2011 la superficie cosechada en el estado de Sonora fue distribuida en los cuatro grupos principales de la producción agrícola. Con un 76% tenemos al grupo de los cereales y forrajes, seguido por el grupo de las frutas y hortalizas con un 13%, finalmente tenemos a los grupos más pequeños, cultivos industriales y leguminosas con un 2% y 4% respectivamente (Figura 3.4).



**Figura 3.4.** Superficie cosechada en Sonora (SIAP, 2011).

Sonora, es uno de los 8 estados más importantes en cuanto a producción de melón en la República Mexicana, en la Tabla 3.1 se muestran los principales municipios productores de dicho estado.

**Tabla 3.1.** Producción de melón en el estado de Sonora en el 2014.

Municipio	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. Cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Valor de producción (miles de pesos)
Altar	80.00	80.00	2,160.00	6,302.13
Bácum	30.00	30.00	1,050.00	3,154.34
Caborca	207.00	207.00	5,896.00	6,227.20
Carbó	26.00	26.00	755.80	4,564.26
Empalme	711.00	711.00	27,209.00	6,333.15
Guaymas	653.00	653.00	22,172.00	6,534.37
Hermosillo	318.00	318.00	9,484.45	4,578.03
San Luis Río Colorado	30.00	30.00	840.00	1,650.00
San Miguel de Horcasitas	10.00	10.00	293.00	4,561.00
Total	2,065.00	2,065.00	69,860.25	6,018.17

(SIAP, 2014)

### **3.2. Melón (*Cucumis melo*)**

El melón es un fruto de amplio consumo cuya demanda se incrementa en época de calor. Ocupa el octavo lugar en importancia entre las hortalizas que se cultivan en México y el tercer lugar entre la familia de las cucurbitáceas en cuanto a la superficie cosechada (después de calabaza y sandía) (Acosta *et al.*, 2010).

El melón mexicano es una hortaliza que ha mantenido su participación en el mercado internacional por su calidad. Este producto representa una fuerte derrama económica para su manejo, cosecha y empaque. El melón contiene agua en un 90%, fibra dietética, energía, proteína, vitaminas y minerales. Se consume fresco en rebanadas, cubos o en cocteles combinado con otras frutas como papaya y sandía, jugos y licuados con leche y en helados (SAGARPA, 2010).

La forma del fruto es variable (esférica, elíptica, ovalada, etc.); la corteza de color verde, amarillo, o blanco, puede ser lisa, reticulada o estriada. La pulpa puede ser blanca, amarilla o anaranjada. La placenta contiene las semillas y es gelatinosa o acuosa (SAGARPA, 2010).

Su importancia radica en que, desde los años veinte, ha sido un producto generador de divisa para el país, fuentes de empleo e ingreso de utilidades para los productores mexicanos. Sin embargo, es a partir de los años sesenta cuando su presencia toma importancia entre los productores, derivado de una mayor demanda tanto del mercado nacional como del internacional (SAGARPA, 2010).

No obstante, la creciente participación de los países centroamericanos ha empezado a ganar espacios en el mercado estadounidense, importador del 99% de las exportaciones mexicanas, complicando la mayor comercialización de melón y evitando la participación de más productores mexicanos (SAGARPA, 2010).

A finales de los sesenta se observó en el mundo un franco crecimiento en las superficies dedicadas al cultivo y el mejoramiento de diversos aspectos como el manejo y la selección de especies, y el desarrollo de sistemas modernos de ventas y distribución, manteniéndose con esa tendencia desde entonces. Es hasta la



década de los setenta cuando se sitúa a esta especie en competencia en los mercados, al lograr la adaptación del cultivo a diferentes sistemas de producción (SAGARPA, 2010).

### **3.3. Mermas de Productos Agroindustriales**

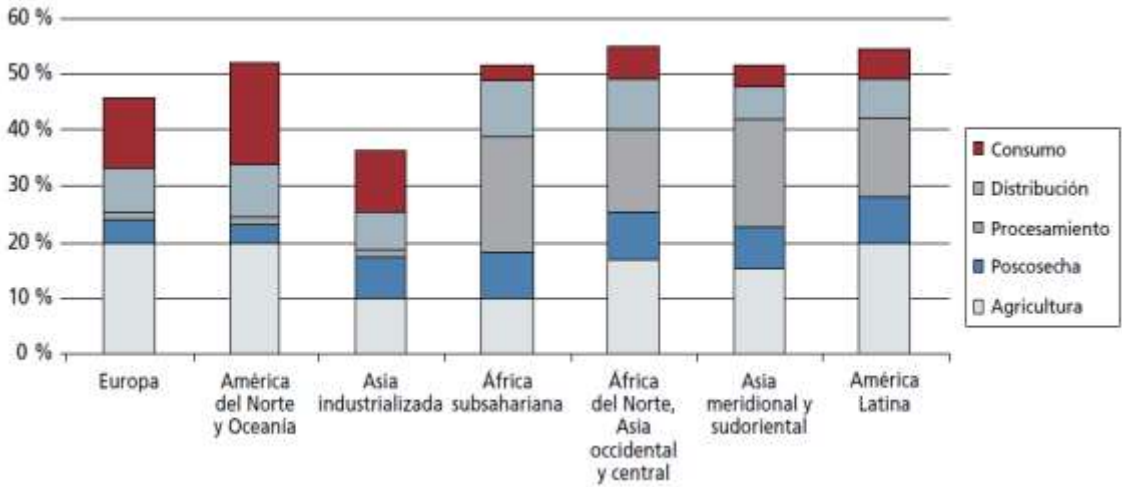
La cosecha constituye un eslabón o elemento de transición, o también una cima que separa dos vertientes: la vertiente precosecha, correspondiente a la actividad de producción propiamente dicha, y la vertiente postcosecha, que va desde los trabajos de cosecha hasta el consumo (Grolleaud, 2002).

Durante la cosecha se pueden presentar pérdidas de alimentos, es decir, una disminución en la cantidad de alimentos comestibles en la parte de la cadena de suministro que conduce específicamente a los alimentos comestibles para el consumo humano (Gustavsson *et al.*, 2011).

La mayoría de las citas estiman que aproximadamente la mitad de los alimentos cultivados se pierde o se desperdicia antes y después de que lleguen al consumidor (Parfitt *et al.*, 2010). Por otro lado, Kader (2003) estima que aproximadamente un tercio de todas las frutas y verduras producidas en el mundo se pierde antes de que lleguen al consumidor, ya que en Estados Unidos, las pérdidas de las frutas y hortalizas frescas se estiman en un rango del 2% al 23%, dependiendo del producto, con un promedio general de alrededor de 12% de pérdidas entre los centros de producción y consumo mientras que en América Latina se estiman pérdidas de 200 Kg de alimentos per cápita al año y 25 Kg adicionales por desperdicio. En la Figura 3.5 se observa la parte de la producción inicial que se pierde o se desperdicia en las diferentes etapas de la cadena de suministro de alimentos (CSA) de frutas y hortalizas en diferentes regiones. En lo que respecta al grupo de frutas y hortalizas, dominan las pérdidas en la producción agrícola en las tres regiones industrializadas. Esto se debe principalmente a la clasificación de las cosechas de frutas y hortalizas impuestas por los estándares de calidad establecidos por los vendedores minoristas. El desperdicio al final de la cadena de suministro de alimentos también

es abundante en las tres regiones, con de 15 a 30 % de las compras por masa desechada por los consumidores.

En las regiones en desarrollo, las pérdidas en la producción agrícola dominan el total de pérdidas de la CSA. Las pérdidas en las fases de postcosecha y distribución también son graves; esto se debe tanto al deterioro de los cultivos perecederos en los climas calientes y húmedos de muchos países en desarrollo, como al carácter estacional que conlleva un excedente imposible de vender (Gustavsson *et al.*, 2011).



**Figura 3.5** Mermas de frutas y hortalizas en diferentes regiones (Gustavsson *et al.*, 2011).

Los alimentos se desperdician a lo largo de la cadena de suministro de alimentos desde la producción agrícola hasta el consumo final en el hogar. Los factores que contribuyen en la reducción de la producción agrícola se resumen en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Breves explicaciones de definiciones de pérdidas y residuos.

Nombre de la pérdida	Definición	Posibles intervenciones para evitar la pérdida.
Pérdidas en Agricultura	<p>Contienen pérdidas debido a daños mecánicos y/o a derrames durante la operación de la cosecha, clasificación de cultivos, etc.</p> <p>Porcentaje varía del 2% para cereales en países industrializados al 20% para raíces, tubérculos y frutas y vegetales.</p>	<p>Países industrializados: Cooperación con cantidades de granjas que podrían reducir el riesgo de sobreproducción que a menudo conduce a las pérdidas en agricultura.</p> <p>En países en desarrollo: Mejor organización de los pequeños agricultores, tecnología de transporte, educación.</p>
Pérdidas en postcosechas	<p>Contienen pérdidas debidas al almacenamiento y transporte entre la granja y la distribución, derrames y degradación durante el manejo.</p> <p>Los porcentajes varían de 0% para oleaginosas y legumbres al 19% para raíces y tubérculos.</p>	<p>Países industrializados: Mejorar las instalaciones en las explotaciones agrícolas.</p> <p>Países en desarrollo: Mayor seguridad en el transporte, redes, energía y sistemas de mercados; mejor infraestructura durante el transporte y el almacenamiento.</p>
Pérdidas en el procesamiento	<p>Incluye pérdidas durante el proceso industrial o doméstico. Los porcentajes varían de 0.5% para cereales en regiones industrializadas al 25% para frutas y vegetales.</p>	<p>Países industrializados: Desarrollo de mercados para productos de subestándar que son comestibles, mejores líneas de producción.</p> <p>Países en desarrollo: Creación de capacidad, más inversiones en procesos de alimentos.</p>
Residuos en la distribución	<p>Incluye pérdidas y residuos en los mercados, incluyendo mercados al por mayor, supermercados y minoristas.</p> <p>El porcentaje varía del 1% para oleaginosas y legumbres en regiones industrializadas a 17% para frutas y vegetales.</p>	<p>Países industrializados: Estándares más bajos para talla, peso, etc.</p> <p>Países en desarrollo: Cooperativas de comercialización y la mejora de los servicios de comercialización.</p>
Residuos en el consumo	<p>Incluye todas las pérdidas y residuos en el hogar.</p> <p>El porcentaje varía del 1% para cereales y oleaginosas y legumbres a 30% para raíces y tubérculos.</p>	<p>Países industrializados: Conciencia pública, paquetes más pequeños, mejor planificación en restaurants y casas.</p> <p>Países en desarrollo: No es un gran problema porque el consumo de residuos es muy baja.</p>

(Kummun *et al.*, 2012)

### **3.4. Contaminación por Desperdicios Agroindustriales**

Los desperdicios agroindustriales son biodegradables, es decir que pueden ser degradados por microorganismos en moléculas más pequeñas. Las bacterias actúan sobre las moléculas complejas, tales como proteínas, grasas e hidratos de carbono y los rompen en moléculas más simples como amoníaco, dióxido de carbono, metano y nitruros. Se consideran como molestia debido a su efecto sobre el medio ambiente, ya que algunos son quemados o vertidos en rellenos sanitarios produciendo una gran liberación de dióxido de carbono y otros gases responsables del efecto invernadero, así pues la reducción de las emisiones de gases nocivos en la atmósfera sería beneficioso desde el punto de vista económico y medioambiental. Además los residuos agroindustriales favorecen la contaminación de cursos de aguas, generan molestias por presencia de olores y pH, proliferación de ratas, moscas y otros insectos, etc. (Barragán *et al.*, 2008; Okonkwo *et al.*, 2016 y Piwowar *et al.*, 2016).

Cuando los residuos agroindustriales son dispuestos sobre el suelo sin ningún tratamiento previo y permanecen a la intemperie, su descomposición los puede convertir en residuos peligrosos principalmente por la presencia de agentes infecciosos, por el daño que pudieran causar a humanos, animales y a los recursos naturales. Si no se aplicaron medidas de remediación oportunamente el problema de contaminación se convierte en un pasivo ambiental y como consecuencia se puede presentar la dispersión de contaminantes (Saval, 2012).

Los problemas de dispersión de contaminantes derivados de la disposición de residuos a la intemperie pueden afectar directamente a los recursos naturales: suelo, agua y aire, además de plantas y animales de los alrededores. El daño que pudieran ocasionar dichos residuos está en función de sus características físicas, químicas y biológicas. Si el residuo contiene carbohidratos, los microorganismos propios del suelo y aquellos presentes de manera natural en el residuo iniciarán su degradación, si por el proceso microbiano que se inicia se generan lixiviados, éstos migrarán en forma vertical hacia el subsuelo y podrían alcanzar los mantos

acuíferos; además, los microorganismos presentes podrían ser arrastrados por las corrientes de aire para ser depositados en otros sitios (Saval, 2012).

### **3.5. Aprovechamiento de los Residuos Agroindustriales**

Graminha *et al.*, (2008) llevaron a cabo un repaso de las variables que se deben de tener en cuenta al momento de utilizar enzimas en hongos producidos por la fermentación sólida de residuos agroindustriales en Brasil. Con ayuda de la fermentación sólida y algunos microorganismos el material lignocelulósico presente en estos residuos fue descompuesto con la finalidad de convertirlo en un alimento de mayor digestibilidad y de mayor calidad para los animales de ganado.

Neethu *et al.*, (2015) utilizaron los residuos agroindustriales tales como el cacahuate, salvado de trigo, salvado de arroz y de coco para la producción de lipasa (enzima que se utiliza en el organismo para disgregar las grasas de los alimentos para que se puedan absorber) utilizando una sepa aislada de *Stenotrophomonas maltophilia* de sedimentos del Ártico.

La caracterización de la enzima reveló que la temperatura óptima fue de 28°C y el pH óptimo fue de 6 para el cacahuate y el coco, mientras que para el salvado de arroz y el salvado de trigo el pH óptimo fue de 7. La producción máxima de la lipasa se alcanzó al 60% de humedad para todos los sustratos. La enzima se purificó hasta 2.9 veces y se encontró que el peso molecular es de 49.1 KDa. Como resultados finales se obtuvo la producción de la lipasa para los diferentes sustratos. El sustrato de cacahuate dio la máxima producción de lipasa (74.117 U/mL), seguido del coco (61.911 U/mL), el salvado de trigo (49.614 U/mL) y salvado de arroz (28.165 U/mL). Esto es posible porque los contenidos orgánicos de los residuos agroindustriales constituyen una fuente importante de nutrientes residuales que sirven de medios ricos para el crecimiento microbiano y la producción de enzimas.

Domínguez-Bocanegra *et al.*, (2015) utilizaron los residuos agroindustriales de fuentes naturales de carbono, tales como los presentes en la leche de coco, jugo de

piña y jugo de tuna para promover la síntesis de bioetanol por la levadura *Saccharomyces cerevisiae* CDBB 790, ya que el coco, la piña y la tuna son las frutas que están disponibles a lo largo del año en México, pero un alto porcentaje de estos frutos se desperdician por los productores. Los cultivos se desarrollaron en matraces Erlenmeyer de 500 mL que contenían 350 mL de medio de cultivo (medio YM, leche de coco, jugo de piña o zumo de tuna) después se inocularon las células de levadura con 35 mL de medio YM en la fase de crecimiento exponencial. Los resultados muestran que la concentración de etanol más alta obtenida fue de 20% v/v en la leche de coco, 22% v/v en el jugo de piña y 12% v/v en el zumo de tuna. El consumo de azúcares a las 36 horas fue del 88.62% en la leche de coco, el 93.75% en el zumo de tuna, 90.62% en el jugo de piña y el 98.6% en medio YM.

En este trabajo se comprobó que el agua de coco crudo, el jugo de piña cruda y el zumo de tuna crudo son excelentes medios para la producción de bioetanol por la levadura *S. cerevisiae*. Las propiedades fisicoquímicas, disponibilidad y bajo costo de estos residuos agroindustriales los hace sustratos altamente competitivos de segunda generación para la producción de bioetanol y la reducción de la contaminación ambiental.

Yuanyuan *et al.*, (2015) trabajaron con varios tratamientos de fermentación acidogénica de residuos de frutas y verduras en un reactor continuo tipo tanque agitado con la finalidad de producir ácido láctico. El experimento consistió en un reactor tipo tanque agitado, el cual estuvo en funcionamiento durante 50 días con una velocidad de carga orgánica de 11 gSV/(L.d) y un tiempo de retención de lodos de 3 días con pH controlado de 4.0 (1 a 24 días) y 5.0 (25 a 50 días). Los resultados indicaron que la mayor cantidad de ácido láctico (aproximadamente de 10 a 20 g de ácido láctico/L) se produjo a un pH de 4.0. A pH de 5.0, la reacción de hidrólisis se mejoró y la concentración total de productos de fermentación aumentó hasta 29.5 gDQO/L.

Autores como Oliveira *et al.*, (2006) evaluaron cinco residuos agrícolas con la técnica de fermentación sumergida para la producción de la enzima xilanolítica por la cepa *Penicillium janthinellum* para ser utilizada como aditivo en alimentos de aves

de corral, fabricación de pastas, harina de trigo y procesos de blanqueo en la industria química. Los residuos se hidrolizaron en medio ácido y se utilizó la fracción líquida para el cultivo. La mazorca de maíz (55.3 U/mL) y la cascarilla de avena (54.8 U/mL) fueron los mejores inductores de la xilanasa. El bagazo de caña de azúcar (23.0 U/mL) y la hoja de maíz (23.8 U/mL) fueron moderadamente buenos, mientras que la cáscara de yuca mostró resultados insignificantes. La producción de proteasa fue muy baja en todos los residuos agroindustriales. Los rendimientos máximos de biomasa fueron 1.30 y 1.17 g/L para la cáscara de yuca y hojas de maíz después de 180 h, respectivamente. La actividad xilanolítica mostró un perfil asociado al crecimiento celular.

### **3.6. Digestión Anaerobia para el Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales**

La digestión anaerobia es un proceso en el cual microorganismos rompen materiales biodegradables en ausencia de oxígeno. Este proceso es ampliamente usado en el tratamiento de aguas residuales, recuperación de energía de muchos tipos de biomasa, especialmente de productos agrícolas y desechos agroindustriales porque proporciona una reducción del 50 % en masa y volumen del material de origen. El producto principal del proceso de digestión anaerobia es una mezcla de gases (biogás) compuesto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se utiliza como combustible para la generación de energía y producción de calor (Sitorus *et al.*, 2013 y Scano *et al.*, 2014).

En los años recientes, la aplicación de la digestión anaerobia para el tratamiento de desechos orgánicos ha surgido con grandes resultados y la cantidad de sustrato digerido anaeróbicamente a partir de residuos ha aumentado a una tasa de crecimiento anual del 25% (Appels *et al.*, 2011).

Debido a que la digestión anaerobia es un proceso que se lleva a cabo en ambientes acuosos, es decir, las fuentes de biomasa contienen altos niveles de agua (incluso

la materia seca inferior al 40%), puede ser procesada sin ningún tratamiento previo. Este no es el caso para la mayoría de otras tecnologías de conversión como por ejemplo la combustión, ya que solo ofrece un balance energético positivo neto si el contenido de agua de la biomasa o de residuos está por debajo del 60%. Además la eficiencia energética de la pirolisis y la gasificación disminuye considerablemente con el alto contenido de agua (Appels *et al.*, 2011).

Otra ventaja de la digestión anaerobia es que reduce las cantidades de metano que podrían ser enviadas a la atmósfera si los residuos fueran solo enviados al vertedero (Sitorus *et al.*, 2013).

### **3.6.1. Etapas**

El proceso se realiza en 4 etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

#### **a) Hidrólisis**

La hidrólisis es un proceso de limitación de velocidad crítica que degrada los materiales orgánicos insolubles tales como lípidos, polisacáridos, proteínas y celulosa en sus componentes de cadena principal (por ejemplo, ácidos grasos y aminoácidos). Los componentes que se forman durante el proceso de hidrólisis se desglosan en hidrógeno ( $H_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), acetatos y ácidos grasos volátiles (AGV's) por bacterias acidogénicas que se convierten en insumos para las bacterias metanogénicas (Kumaran *et al.*, 2016).

#### **b) Acidogénesis**

Corresponde a la etapa en la cual las bacterias se encargan de transformar los compuestos obtenidos en la etapa anterior (hidrolítica) en compuestos identificables



de menor peso molecular, principalmente ácidos orgánicos, como: acético, propiónico y butírico (Gali *et al.*, 2009) el resto de los productos de la acidogénesis (ácido propiónico, ácido butírico y alcoholes) son transformados por las bacterias acetogénicas en dióxido de carbono e hidrogeno y ácido acético (Mata-Álvarez, 2005). Las bacterias asociadas a este proceso se denominan acidogénicas y son de tipo facultativas y anaerobias estrictas; colectivamente se denominan "bacterias formadoras de ácidos" (Gali *et al.*, 2009).

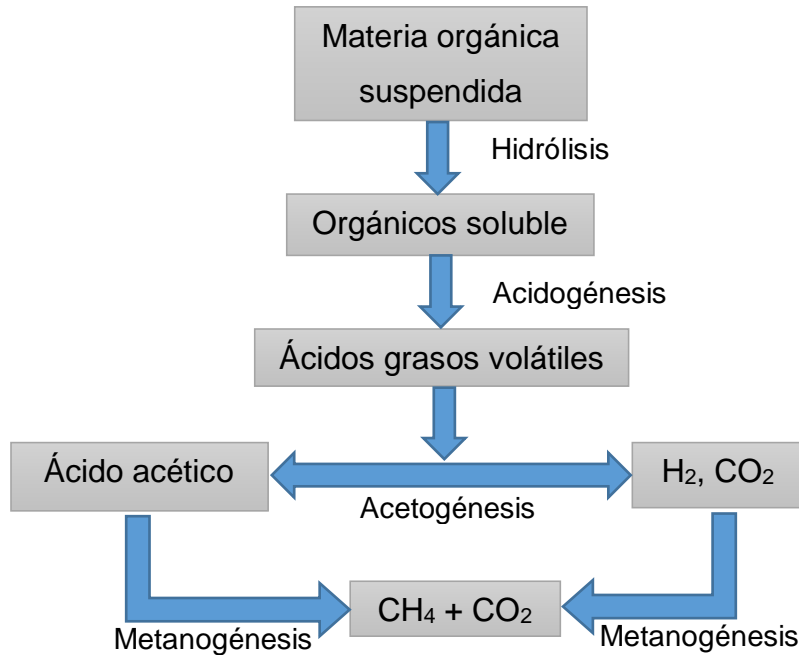
### **c) Acetogénesis**

El resto de los productos acidogénicos, es decir, el ácido propiónico, ácido butírico y alcoholes son transformados por las bacterias acetogénicas en dióxido de carbono e hidrógeno, y ácido acético. El hidrógeno juega un papel de intermediario importante en este proceso, ya que la reacción sólo se produce si la presión parcial del hidrógeno es lo suficientemente baja como para permitir termodinámicamente la conversión de todos los ácidos. Tal disminución de la presión parcial se lleva a cabo por bacterias eliminadoras de hidrógeno (Rosenkranz, 2013).

### **d) Metanogénica**

Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores siendo además los que dan el nombre al proceso general de biometanización, fermentación del metano o metanogénesis. Las bacterias metanogénicas son las responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados con dos átomos de carbono unidos por una especie covalente: acetato, hidrógeno (H<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), formiato, metanol y algunas metilaminas (Madigal *et al.*, 1998).

En la Figura 3.6, se presenta un esquema de los distintos pasos del proceso de digestión anaerobia.



**Figura 3.6.** Etapas del proceso de digestión anaerobia (Appels *et al.*, 2008)

### 3.6.2. Digestión anaerobia en dos etapas

Sistemas anaerobios de una sola fase, en la que las tres reacciones de hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis se llevan a cabo de forma simultánea en un único reactor han sido seleccionados para la mayoría de los residuos. Sin embargo, la operación de tales sistemas con alta velocidad de carga orgánica y para los residuos con gran contenido orgánico biodegradable tales como residuos de frutas y vegetales se hace difícil ya que este tipo de residuos se someten a la acidificación rápida que resulta en la inhibición de la actividad metanogénica. La tasa de carga máxima registrada para la digestión de fase única de residuos de frutas y vegetales estaba dentro de 3.6 kgSV/d.m<sup>3</sup>. Mientras que los sistemas de dos fases, por el contrario, tienen la ventaja de amortiguar la velocidad de carga orgánica en la primera etapa, lo que permite una velocidad de alimentación más constante a la segunda etapa metanogénica. Las tasas de carga de residuos de frutas y vegetales en los sistemas de dos fases son más altas y se encuentran en el rango de 5.7 a 7.7 kgSV/d.m<sup>3</sup>. En sistemas de dos fases, la licuefacción simultánea junto con la

acidificación ayuda en el manejo de residuos con alto contenido de sólidos. Para los residuos fácilmente fermentables, el tiempo total de retención en un reactor de dos fases puede ser inferior que en un reactor de una sola fase. Sin embargo, el proceso a menudo puede ser lento, principalmente debido a que la fase lag es larga (Ganesh *et al.*, 2014).

Así pues, para la optimización del proceso de digestión anaerobia de manera eficiente, el proceso de una sola fase se divide en dos fases por separado, con la acidificación hidrolítica en la primera fase y con la metanogénesis en la segunda fase. Así que la técnica de dos fases podría seleccionar y enriquecer bacterias especiales en reactores secuenciales. Además, resultados anteriores indican que el comportamiento de los AGV's son determinados en gran medida por la composición de la comunidad bacteriana durante los procesos de digestión de lodos y compostaje. Por lo tanto las fases acidogénica y metanogénica de la digestión anaerobia pueden tener un impacto diferente sobre el destino de los AGV's (Wu *et al.*, 2016).

Además, en comparación con el proceso de la digestión anaerobia de una sola fase, el enfoque de dos fases puede lograr una inactivación más rigurosa de los agentes patógenos. Por otra parte, la temperatura es el factor más importante en la inactivación de microorganismos patógenos en los digestores anaerobios (Wu *et al.*, 2016).

### **3.7. Biogás**

Biogás, producido por la conversión bacteriana de materia orgánica bajo condiciones anaerobias, es el nombre que se le da a la mezcla de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el inflamable gas metano (CH<sub>4</sub>), además de algunas trazas de otros compuestos y gases como se muestra en la Tabla 3.3 (Olugasa *et al.*, 2014 y Uddin *et al.*, 2016).

El biogás es una fuente de energía renovable, plenamente capaz de sustituir otras fuentes de energía rurales tales como la madera, queroseno, residuos vegetales y el propano. Tiene la ventaja de ser una fuente ecológica donde el poder calorífico del biogás es equivalente a medio litro de diesel (6 KWh/m<sup>3</sup>) (Olugasa *et al.*, 2014). Ayuda en la reducción de la contaminación ambiental de las explotaciones ganaderas y otras fábricas de producción de la agricultura, lo que contribuye a un ahorro de combustibles fósiles y bosques. También se pueden crear sistemas de energía rentables donde el biogás se utilice para cocinar, de esta manera la producción de calor sería un mejor sustituto de la leña, ya que se protegerían los bosques naturales minimizando los impactos ambientales y ecológicos, además la salud de las personas mejoraría constantemente ya que se reduciría el nivel de humo (Shokri, 2011).

**Tabla 3.3.** Composición del biogás.

<b>Gases</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Metano (CH <sub>4</sub> )	50-75
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25-50
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0-10
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	0-01
Ácido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	0-03
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0-02

(Uddin *et al.*, 2016)

### **3.8. Antecedentes de Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales para la Obtención de Biogás.**

La biometanización es la digestión anaerobia de muchos tipos de biomasa, especialmente de los productos agrícolas y residuos agroindustriales, que se utiliza ampliamente para el tratamiento y recuperación de energía (Scano *et al.*, 2014). Se considera una fuente de energía renovable porque el biogás rico en metano producido es adecuado para la obtención de energía y puede sustituir a los combustibles fósiles (Sitorus *et al.*, 2013).

Viswanath *et al.*, (1992) analizaron el efecto de alimentar diferentes residuos de frutas y vegetales tales como piña, banana, tomate, mango, naranja y yaca en un digestor de 60 litros de capacidad. Cada residuo fue alimentado durante 5 días. El máximo rendimiento de biogás fue de 0.6 m<sup>3</sup>/kgSV añadido, el cual se logró a un tiempo de residencia hidráulico (TRH) de 20 días con una carga de 40 Kg/(m<sup>3</sup>.d). La producción de gas por hora se observó en los digestores a los TRH de 16 y 24 días. El mayor rendimiento (74.5%) de gas se produjo dentro de las 12 horas de alimentación a un TRH de 16 días mientras que a un TRH de 24 días sólo el 59 ~ 93% del gas total podría ser obtenido hasta ese momento.

Así mismo Chanakya *et al.*, (2012), utilizaron esta técnica para obtener biogás a partir de los residuos de la banana, ellos utilizaron las hojas y la cáscara de la banana en un sistema de tiempo real de 27 a 35 días. Dichos residuos fueron tratados previamente para recuperar cuatro productos: biogás, fibra, compost y repelentes. Finalmente, de la hoja de plátano obtuvieron 70% de biogás, 20% de fibra y 10% de composta mientras que los productos de la cáscara fueron 45% de biogás, 50% de fibra y 5% de composta.

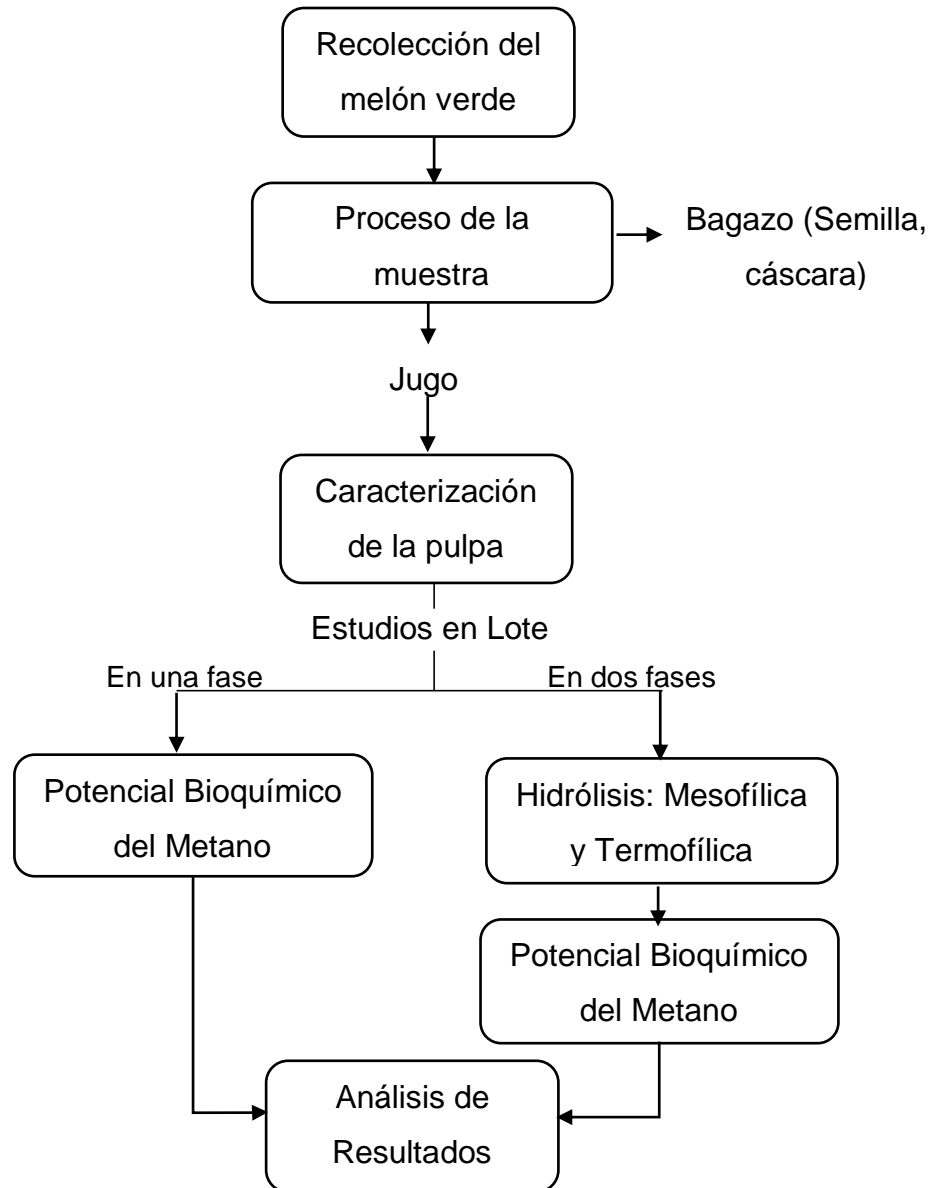
Por otro lado, Celik *et al.*, (2015) investigaron la capacidad del tratamiento anaeróbico en la generación de biogás a partir de residuos de pistacho. Para este propósito, ensayos bioquímicos del potencial de metano se llevaron a cabo durante dos concentraciones diferentes de demanda química de oxígeno (DQO) de 22 y 33 g<sub>T</sub>DQO/L con y sin pretratamiento térmico y químico. Los resultados revelaron que

los pretratamientos químico y térmico en los residuos de pistacho aumenta la proporción de  $DQO_{\text{Soluble}}/DQO_{\text{Total}}$  en torno al 26% y 5%, respectivamente. Los rendimientos de metano observados en las muestras pretratadas fueron de 78.5 a 213.4 mLCH<sub>4</sub>/gDQO, los cuáles se han mejorado con respecto a las muestras en bruto, ya que éstas obtuvieron una producción de biogás de 42.2 a 73.4 mLCH<sub>4</sub>/gDQO. Finalmente, el mayor rendimiento de metano se observó como 213.4 mLCH<sub>4</sub>/gDQO.

Autores como Zainab *et al.*, (2016) han implementado esta tecnología para evaluar la producción de biogás en los residuos de algodón de la industria médica. Los efectos de la adición del inóculo, el pretratamiento de sustrato, y la temperatura sobre la producción de biogás se tomaron en consideración. Los resultados revelaron que el efecto de la adición del inóculo fue más significativo que el pretratamiento alcalino de materiales de desecho. La recuperación de biogás a partir de materiales de desecho inoculados superó su producción a partir de residuos no inoculados en casi un 46%. Por lo cual, el incremento de la recuperación de biogás a partir de residuos pretratados fue del 20% mayor que su producción a partir de residuos no tratados. Las condiciones termófilas mejoraron el biogás producido en aproximadamente un 92%. La cinética del proceso de biodigestión fue bien descrito por el modelo de Gompertz modificado y los valores experimentales y predichos de la producción de biogás se ajustaron bien con los valores del coeficiente de correlación (mayor a 0.96), lo que sugirió que dichas condiciones fueron favorables para el proceso.

## 4. METODOLOGÍA

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama esquemático de la metodología que se siguió durante el desarrollo experimental.



**Figura 4.1** Diagrama general de la metodología utilizada en el presente estudio.

#### 4.1. Procesamiento de la Muestra

En la Figura 4.2 se muestra la metodología para el procesamiento de la muestra.



**Figura 4.2** Procesamiento de la muestra.



#### 4.2. Caracterización Físicoquímica del Jugo de Melón Verde

Para la caracterización de 100 g de muestra se aplicaron los métodos de ensayo de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana para residuos sólidos urbanos y los métodos estándares (APHA 1995). En la Tabla 4.1 se muestran los distintos métodos analíticos utilizados para la caracterización físicoquímica del jugo de melón verde. Su descripción se presenta en la sección 4.6.

**Tabla 4.1** Métodos analíticos empleados para la caracterización del jugo de melón verde.

<b>Parámetro</b>	<b>Método estándar</b>
Sólidos Totales (ST)	Método Gravimétrico- APHA/SM 2540
Sólidos Fijos (SF)	Método Gravimétrico- APHA/SM 2540
Sólidos Volátiles Totales(SVT)	Método Gravimétrico- APHA/SM 2540
DQO	NMX-AA-21-1985
Azúcares	Figueroa, 2013
Nitrógeno total	NMX-AA-24-1984
Humedad	NMX-AA-016-1984

#### 4.3. Potencial Bioquímico de Metano del Jugo de Melón Verde

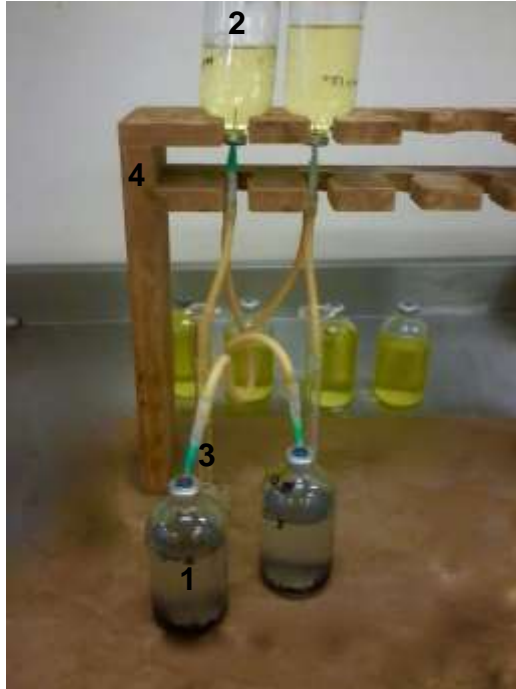
Los estudios en lote se llevaron a cabo por triplicado en botellas serológicas de capacidad de 160 mL con un volumen de operación de 120 mL. A cada una de las botellas se les añadió el medio mineral de la Tabla 4.2, ya que Viser, (1995) y Speece, (1996) mencionan que para lograr una buena digestión anaerobia es necesario un adecuado balance entre macro y micronutrientes, y lodo anaerobio a una concentración de 2 g/L de sólidos suspendidos volátiles (SSV). Después se adicionó el jugo de melón a volúmenes de 5, 10, 15, y 20 mL que correspondió a

una concentración de DQO de: 3.54, 7.05, 10.58 y 14.11 g/L respectivamente. Con el fin de controlar el pH se adicionó bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) a una concentración de 5 g/L. Las botellas se taparon con tapones de caucho y arillos de aluminio, se despresurizaron por unos segundos y fueron incubadas a una temperatura de 37°C. El metano producido se midió por desplazamiento de una solución de NaOH al 3% en un sistema tipo Mariotte (Figura 4.3).

**Tabla 4.2.** Medio mineral

Macronutrientes		Solución Elementos traza	
Compuesto	mg/L	Compuesto	mg/L
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	703	$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2000
$\text{K}_2\text{HPO}_4$	600	$\text{MnCl}_2$	500
$\text{NH}_4\text{Cl}$	205	EDTA*	500
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	111	$\text{Na}_2\text{SeO}_3$	100
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	6	$\text{H}_3\text{BO}_3$	50
Extracto de Levadura	20	$\text{ZnCl}_2$	50
<i>Soln. de elementos traza</i>	1 mL/L	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	50
		$\text{AlCl}_3$	50
		$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50
		$\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	50
		$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	50
		HCl concentrado	1 mL/L

\*EDTA=Ácido etilenodiaminotetracético



**Figura 4.3.** Medición de metano por desplazamiento de NaOH al 3%.

- 1) Botella serológica, 2) Botella serológica con solución de NaOH al 3%. 3) Probeta para medir el NaOH desplazado, 4) Soporte.

#### 4.4. Actividad Metanogénica Específica

La actividad metanogénica específica ( $AME = \text{gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{gSSV.L.d}$ ) se define como la velocidad de producción de metano, expresado como DQO, con respecto a la concentración de biomasa expresada como el contenido de sólidos suspendidos volátiles (SSV) por día. Es una manera indirecta de evaluar el desempeño de las bacterias que intervienen en la digestión anaerobia y determinar la carga orgánica máxima que puede aplicarse a un sistema.

La actividad metanogénica específica se obtiene utilizando la Ecuación 4.1:

$$AME = \frac{m \cdot 24}{\left( \frac{Y_{CH_4}}{DQO} \right) \cdot (X)} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

m = Pendiente de metano producido con respecto al tiempo, en el intervalo de mayor producción de metano,  $\frac{L_{CH_4}}{h}$ ;

X = Biomasa, 0.02264 gSSV;

$\frac{Y_{CH_4}}{DQO}$  = Coeficiente de conversión de metano,  $0.35 \frac{L_{CH_4}}{gDQO}$ .

Para obtener la cantidad de metano producido con respecto al tiempo se tomarán en cuenta las condiciones de operación tales como la temperatura de la cinética y la presión atmosférica de la ciudad de Hermosillo, México ( $T_1 = 308 \text{ °K}$  y  $P_1 = 0.97 \text{ atm}$ ) las cuáles fueron transformadas a las condiciones normales ( $T_0 = 273 \text{ °K}$ ,  $P_0 = 1 \text{ atm}$ ), mediante la Ecuación 4.2:

$$V_0 = V_1 \cdot \frac{T_0}{T_1} \cdot \frac{P_1}{P_0} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

$V_1$  = Volumen de metano en las condiciones de operación, (m)  $\frac{L_{CH_4}}{gDQO}$ ;

$V_0$  = Volumen de metano en condiciones estándar,  $\frac{L_{CH_4}}{gDQO}$ ;

$T_1$  = Temperatura en condiciones de operación,  $35^\circ\text{C}$ ;

$T_0$  = Temperatura en condiciones estándar,  $273^\circ\text{K}$ ;

$P_1$  = Presión de Hermosillo,  $0.97 \text{ atm}$ ;

$P_0$  = Presión en condiciones estándar, 1atm.

Este ajuste se llevó a cabo con la finalidad de tener datos compatibles con otros autores, los cuáles pudieron ser llevados a discusión.

La forma de utilizar estas ecuaciones se muestra en el Anexo 8.1

## **4.5. Digestión Anaerobia en dos Etapas del Jugo de Melón Verde**

### **4.5.1. Hidrólisis del jugo de melón verde**

Este estudio se llevó a cabo por duplicado en condiciones mesofílicas (37°C) y termofílicas (55°C) con una duración de 6 días. Para ello se utilizaron botellas serológicas de capacidad de 160 mL con un volumen de operación de 120 mL a las cuáles se les agregó el medio mineral de la Tabla 4.2. La relación de carga del jugo de melón fue de 10 mL equivalente a 7.05 gDQO/L, posteriormente las botellas se inocularon con 2 gSSV/L de lodo anaerobio, se taparon con tapones de caucho y arillos de aluminio y se despresurizaron por unos segundos. La producción de ácidos grasos volátiles (AGV's) fue determinada diariamente empleando la técnica de Retrotitulación (Descrita en la sección 4.6.6).

### **4.5.2. Producción de biogás de los ácidos orgánicos producidos durante la hidrólisis del jugo de melón verde**

Después de los estudios de hidrólisis se continuó con el estudio de la producción de biogás de los ácidos orgánicos producidos durante el proceso de hidrólisis. Para ello, el sobrenadante de las botellas del sexto día se neutralizó con bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) y se transfirió a otras botellas serológicas con nueva biomasa metanogénica proveniente de la industria cervecera, las cuáles fueron selladas con tapones de caucho y arillos de aluminio y se dejó en despresurización. Las botellas

fueron incubadas a condiciones mesofílicas y termofílicas conforme al origen del sobrenadante. La producción de biogás fue medida por desplazamiento de una solución de NaOH al 3% en un sistema tipo Mariotte (Figura 4.3).

## 4.6. Técnicas Analíticas

### 4.6.1. Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos totales se determinaron a partir del jugo de melón verde. El procedimiento consistió en lavar los crisoles y con ayuda de la bomba de vacío y un poco de agua se les colocó un papel filtro. Después los crisoles se calentaron en la mufla a 103 °C durante 30 minutos. A continuación se colocaron en el desecador durante 15 minutos con la finalidad de que alcanzaran la temperatura ambiente. Posteriormente fueron pesados registrando dicho peso como “peso crisol”. Luego con la ayuda de la bomba de vacío se les agregó 10 mL de muestra, fueron pesados nuevamente y este peso se registró como “peso muestra”. Después se colocaron en una mufla a 103°C durante media hora, se pasaron al desecador por media hora, se pesaron y se registró como “peso seco a 103°C”. Además los crisoles se colocaron por 15 minutos en la mufla a 550°C para que la muestra calcinara, se pusieron en el desecador por media hora, fueron pesados, registrándose como “peso ceniza a 550°C”. La Figura 4.4 muestra el esquema seguido. Una vez obtenidos los cuatro pesos se procede a determinar los sólidos suspendidos totales (SST), fijos (SF) y volátiles (SSV) con las siguientes ecuaciones:

$$\text{SST} \left( \frac{\text{g SST}}{\text{g lodo}} \right) = \frac{\text{Peso seco a 110°C} - \text{Peso crisol}}{\text{Peso muestra}} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

$$SSF \left( \frac{\text{g SSF}}{\text{g lodo}} \right) = \frac{\text{Peso ceniza a } 550^{\circ}\text{C} - \text{Peso crisol}}{\text{Peso muestra}} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

$$SSV \left( \frac{\text{g SSV}}{\text{g lodo}} \right) = \text{SST} - \text{SSF} \quad \text{Ecuación 4.5}$$



**Figura 4.4** Obtención de sólidos suspendidos totales.

#### 4.6.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte (dicromato de potasio). Bajo tales condiciones se oxida toda la materia oxidable presente en la muestra, incluso aquella que los microorganismos no son capaces de degradar.

Para la determinación de la DQO del jugo de melón se utilizó la técnica de digestión a reflujo abierto. Se colocan en un matraz de fondo redondo 0.4 g de sulfato de mercurio ( $\text{HgSO}_4$ ), esto con la finalidad de eliminar sustancias orgánicas ajenas que puedan interferir en el proceso, 20 mL de jugo de melón (debido al alto contenido de DQO en la muestra se utilizó una dilución 1:100) y perlas de vidrio para controlar la ebullición. A continuación se añadió 10 mL de dicromato de potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )

0.2514N seguido de 30 mL de una solución ácido sulfúrico-sulfato de plata ( $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) y se agitó. El matraz de fondo redondo se colocó en la columna de destilación, se abrió el flujo de agua refrigerante, se encendió la placa de calentamiento donde estaba situado el matraz y a partir de que comenzó a hervir se dejó destilar durante dos horas.

Paralelamente se realiza un ensayo en blanco utilizando agua destilada y todos los reactivos.

Una vez transcurridas 2 horas, se retiró la muestra de la columna de destilación, se dejó a temperatura ambiente y se le añadieron 100 mL de agua destilada, unas gotas de indicador fenolftaleína y se titularon 20 mL de muestra con sulfato ferroso amoniacal ( $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). En la Figura 4.5 se muestra el sistema utilizado.

La DQO se obtiene a partir de la Ecuación 4.6:

$$\text{DQO} = \frac{(\text{B}-\text{M}) \cdot \text{N} \cdot 8000}{\text{V}_m} \cdot \text{FD} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Donde:

DQO = Demanda química de oxígeno, mg  $\text{O}_2/\text{L}$ ;

B = Volumen de titulante gastado para el blanco, mL;

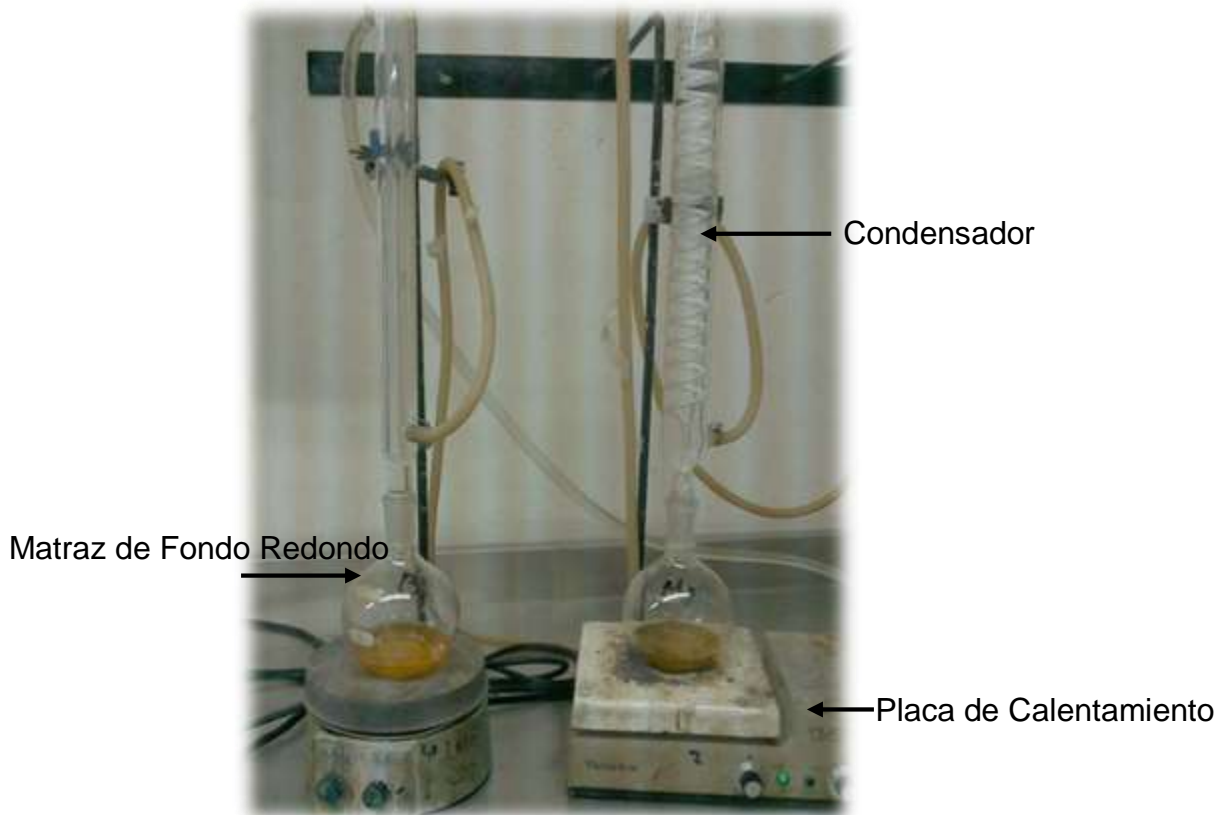
M = Volumen de titulante gastado para la muestra, mL;

N = Normalidad del titulante, 0.3443N;

FD = Factor de dilución de la muestra;

$\text{V}_m$  = Volumen de muestra, mL.





**Figura 4.5** Digestión a reflujo abierto

#### **4.6.3. Determinación de azúcares**

La concentración de azúcar presente en la muestra se determinó por medio del método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), el cual se basa en la reducción del DNS (color amarillo) por el azúcar reductor al ácido 3-amino-5-nitrosalicílico (color rojo ladrillo), dicha reducción se muestra en la Figura 4.6. La presencia de este compuesto se detecta por la lectura de absorbancia en la zona de 540-570 nm. El reactivo DNS consiste en una solución compuesta por: ácido 3,5-dinitrosalicílico ( $C_7H_4N_2O_7$ ) 0.1 % (p/v), tartrato sódico potásico ( $NaK(COO)_2(CHOH)_2 \cdot 4H_2O$ ) 30% (p/v) e hidróxido de sodio (NaOH) 0.4 M (Figuroa, 2013). Para la medición se tomaron 0.2 mL de la muestra y se colocaron en tubos de vidrio con tapón de rosca, posteriormente se agregaron 2 mL del reactivo DNS y la mezcla se homogenizó con ayuda del vórtex. Los tubos se colocaron en una estufa a una temperatura de 100°C

durante 15 minutos. Se dejaron enfriar y la absorbancia fue determinada a 570 nm en un espectrofotómetro Thermo Spectronic 20D+. Previamente se realizó una curva estándar de dextrosa en el rango de 0-5 g/L la cual se muestra en el Anexo 8.2.

El reactivo a utilizar se preparó de la siguiente manera:

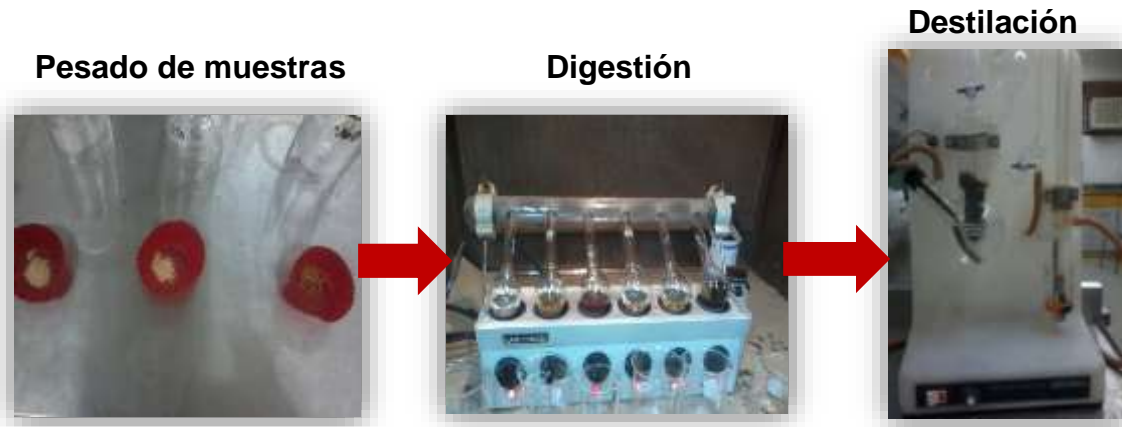
Se disuelven en un matraz 1.6 g de NaOH en agua destilada, posteriormente se le adicionan 30 g de tartrato de sodio y potasio, para lograr la disolución se debe calentar la muestra a 50 °C, luego se agregan 0.1 g de DNS. Finalmente la solución se afora en 100 mL con agua destilada. Se almacena en frascos ámbar.



**Figura 4.6.** Medición de la concentración de dextrosa por el método de DNS.

#### **4.6.4. Nitrógeno total**

Este método se fundamenta en la destrucción de la materia orgánica con ácido sulfúrico concentrado, formándose sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) que en exceso de hidróxido de sodio libera amoníaco, el cual es destilado recibiendo en ácido bórico valorado con ácido clorhídrico (HCl). La Figura 4.7 muestra los pasos seguidos durante este proceso.



**Figura 4.7.** Obtención del nitrógeno total por el método de micro Kjendahl

El método Kjeldahl es el más aceptado para la determinación de proteínas en alimentos. En este el nitrógeno de las proteínas y otros compuestos orgánicos se convierten a sulfato de amonio por medio de una digestión con ácido sulfúrico en ebullición y en presencia de un ion metálico como catalizador (cobre o mercurio). El residuo de la digestión se enfría, se diluye con agua y se agrega hidróxido de sodio. El amonio presente se desprende y a la vez se destila y recibe en una solución de ácido bórico que luego se valora con una solución ácida estandarizada.

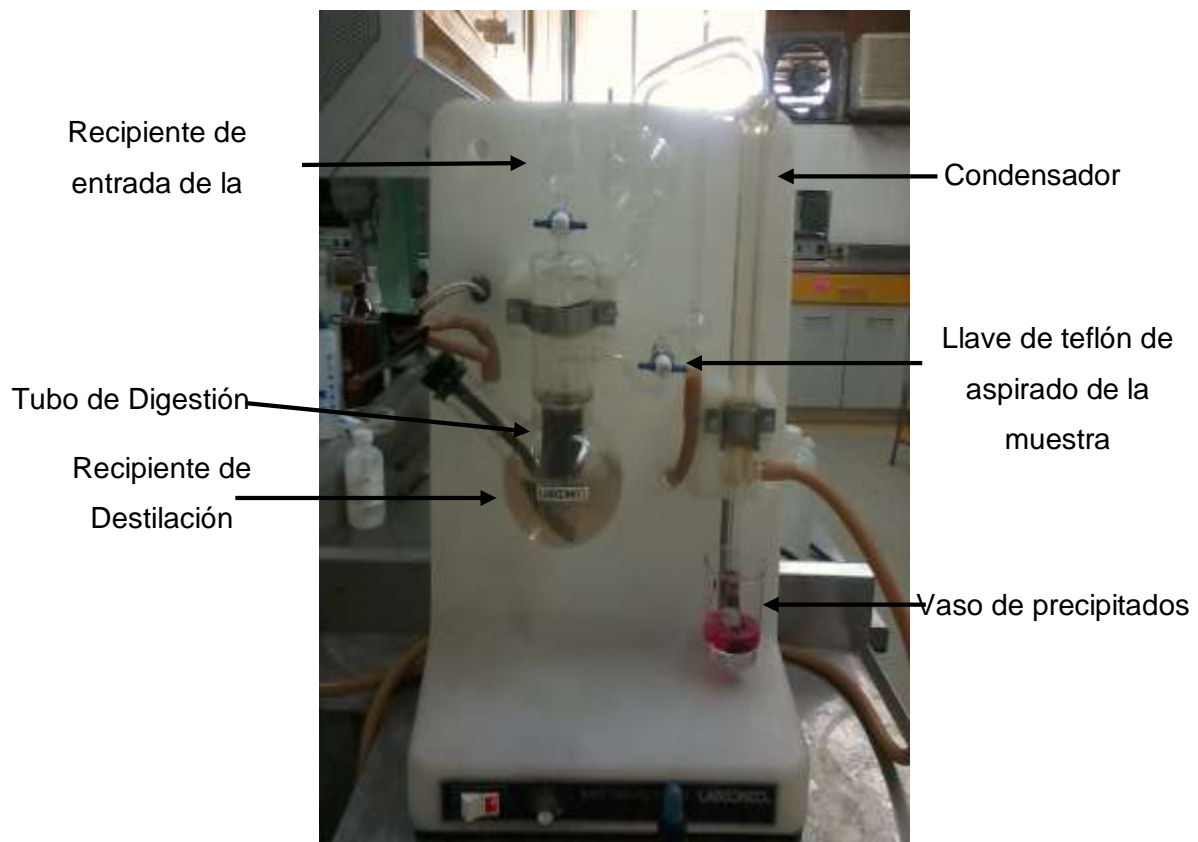
El nitrógeno total es la suma de los nitrógenos amoniacal y orgánico presentes en la muestra, conocido como nitrógeno Kjeldahl.

Procedimiento:

Se colocó en un matraz de 100 mL tipo Micro Kjeldahl, 0.2 g de muestra (pulpa del melón previamente seca) y 6.25 mL de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y 3.2 mL de una solución de fosfatos. A continuación se calentó el matraz en un micro digestor Kjeldahl hasta que los humos blancos cesaran y la muestra se clarificara. La descomposición del nitrógeno orgánico en la muestra se logró mediante la solución ácida, dando lugar a una disolución de sulfato de amonio. Las soluciones se hicieron por duplicado.

Una vez que el matraz llegó a la temperatura ambiente se agregaron 20 mL de agua destilada, 0.1 mL de fenolftaleína y 6.25 mL de reactivo hidróxido de sodio (NaOH) con tiosulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ).

A continuación se destilaron en un vaso de precipitados de 50 mL, el cual contenía 15 mL de ácido bórico con dos gotas de indicador rojo de metilo, aproximadamente 25 mL de muestra. La destilación se considera finalizada cuando el contenido del vaso de precipitados pasa de color rojo a amarillo. En esta etapa se convierte el amonio en amoniaco, seguido por la ebullición y condensación del amoniaco gas el cual es recibido por la disolución de ácido bórico. El sistema utilizado para llevar a cabo la destilación se muestra en la Figura 4.8.



**Figura 4.8.** Micro destilador Kjeldahl.

Por último se dejó reposar la disolución contenida en el vaso de precipitados 5 minutos y se tituló con ácido clorhídrico 0.0575N hasta que se produjo el viraje de amarillo a rojo, registrando el volumen gastado.

#### Reproducción de la prueba

La diferencia máxima permisible en el resultado de pruebas efectuadas por duplicado, no debe exceder de 0.3% en caso contrario, se debe repetir la determinación.

Para las cantidades de reactivos y muestras indicadas son de esperarse resultados que varían de 0.5 a 2.5 % de nitrógeno total. En residuos sólidos, cuyo contenido de nitrógeno esperado sobrepase el rango mencionado debe variarse la cantidad indicada según convenga.

El nitrógeno orgánico total se obtiene a partir de la Ecuación 4.7:

$$N_{\text{Total}} = \frac{V_A \cdot N_A \cdot 0.014}{M} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde:

$N_{\text{Total}}$  = Nitrógeno Total, mg/L

$V_A$  = Volumen de ácido clorhídrico gastado para la titulación de la muestra, mL

$N_A$  = Normalidad del ácido, 0.0575N

$M$  = Masa de la muestra

0.014 = Miliequivalente del nitrógeno.

100 = Para relacionar el nitrógeno a por ciento.

#### 4.6.5. Humedad

Se colocaron charolas de aluminio por dos horas en la estufa a 103°C, posteriormente fueron pasadas al desecador y se mantuvieron ahí hasta que alcanzaron un peso constante. Después fueron pesadas y el peso fue registrado como “peso de la muestra húmeda (G)”. A continuación se agregaron dos gramos de la muestra y nuevamente fueron colocadas en la estufa a 103°C durante una hora. Luego se pasaron al desecador por una hora para posteriormente pesarlas, registrando ese peso como “peso de la muestra seca (G<sub>1</sub>)”. La Figura 4.9 presenta un resumen de la metodología a seguir.

El porcentaje de humedad se calculó con la Ecuación 4.8:

$$H = \frac{(G - G_1)}{G} * 100 \quad \text{Ecuación 4.8}$$

H=Humedad en %.

G= Peso de la muestra húmeda en g.

G<sub>1</sub>=Peso de la muestra seca en g.



**Figura 4.9** Obtención del porcentaje de humedad

#### 4.6.6. Retrotitulación

Para la determinación de los AGV's totales se utilizó el método volumétrico propuesto por Archer y Powell (1989) denominado Retrotitulación.

Se toman 20 mL de muestra y se le mide el pH (pH<sub>m</sub>). Después se añade hidróxido de sodio (NaOH) hasta llegar a pH<sub>2</sub> = 11.8, luego se titula con ácido clorhídrico (HCl) hasta llegar a pH<sub>3</sub> = 9.4. Anotar la cantidad de ácido utilizado entre pH<sub>2</sub> y pH<sub>3</sub>, registrar el valor como V<sub>2,3</sub>. Continuar añadiendo HCl y registrar la cantidad de ácido (V<sub>4,5</sub>) necesario para pasar de pH<sub>4</sub> = 6.9 a pH<sub>5</sub> = 3.8. Añadir ácido hasta pH<sub>6</sub> = 2.2, que es cuando todo el CO<sub>3</sub> y HCO<sub>3</sub> se han convertido a pCO<sub>2</sub>. Burbujear el matraz durante 30 segundos con aire para eliminar el CO<sub>2</sub> de la solución. Titular con NaOH y registrar la cantidad de volumen necesario (V<sub>7,8</sub>) para pasar de pH<sub>7</sub> = 3.8 a pH<sub>8</sub> = 6.9. En la Figura 4.10 se muestra el sistema utilizado para realizar la Retrotitulación.

Para el cálculo de los AGV's totales, se utilizó la Ecuación 4.9:

$$[\text{AGV's}]_{\text{tot}} = \frac{1}{V_m} \left( \frac{V_{7,8} \cdot [\text{álcali}]}{f(\text{pH}_8, \text{pK}_{\text{AGV's}}) - f(\text{pH}_7, \text{pK}_{\text{AGV's}})} \right) \quad \text{Ecuación 4.9}$$

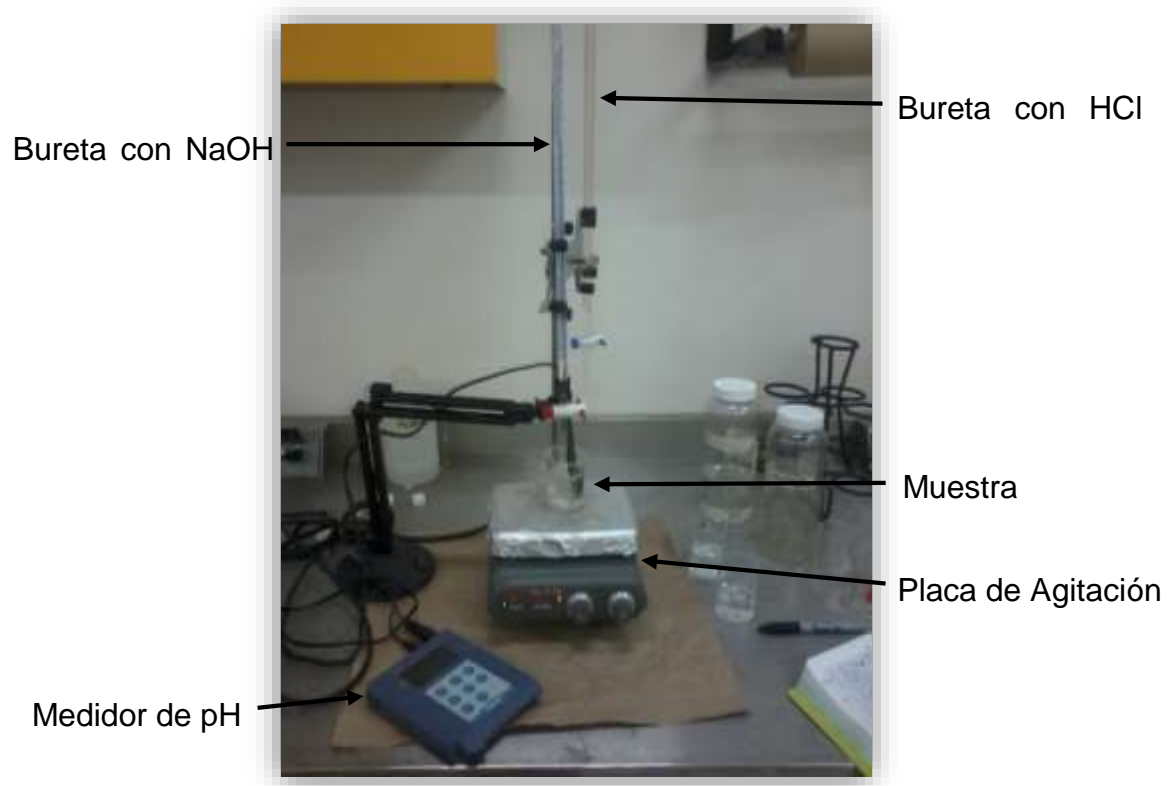
Donde:

[AGV's]<sub>tot</sub>: Concentración de ácidos grasos volátiles totales  $\left(\frac{\text{eq}}{\text{L}}\right)$ .

V<sub>m</sub>: volumen de la muestra (mL)

[álcali]: Concentración de NaOH  $\left(\frac{\text{eq}}{\text{L}}\right)$

pK<sub>AGV's</sub>: 4.8



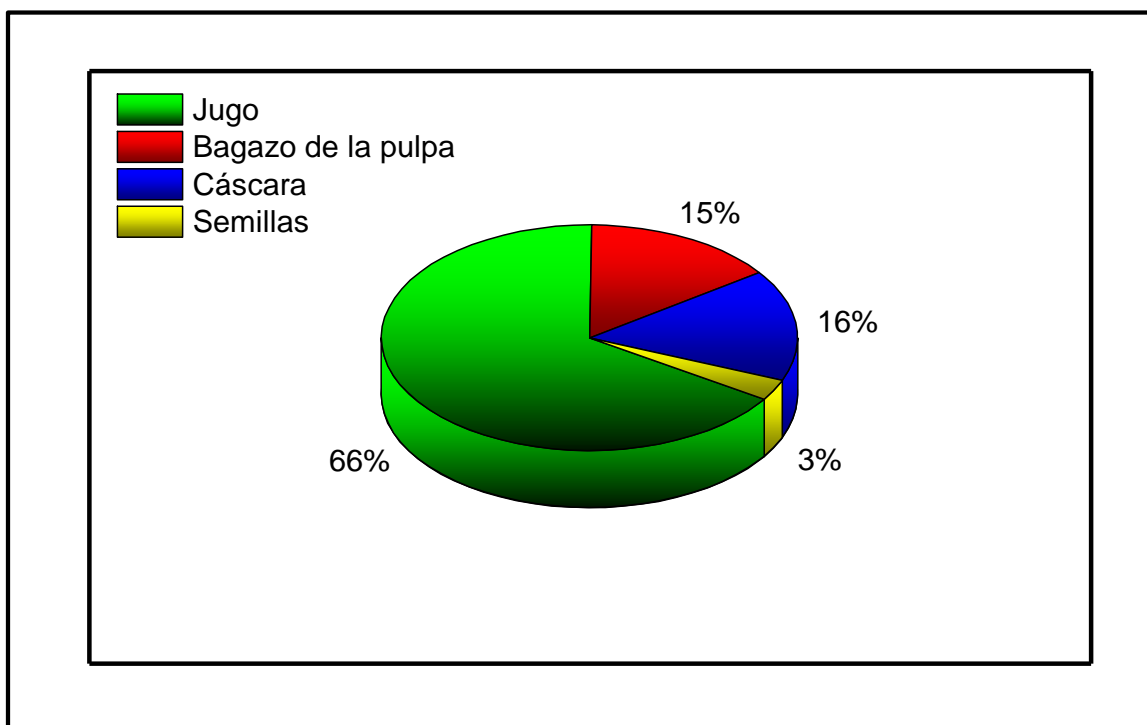
**Figura 4.10.** Sistema utilizado en la técnica retrotitulación



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Caracterización Físicoquímica del Jugo de Melón Verde

La biomasa del melón verde presentó cuatro componentes principales: jugo, cáscara, bagazo de la pulpa y semillas. La Figura 5.1 muestra que el mayor componente es el jugo seguido de la cáscara y el bagazo. Con el fin de reducir los posibles problemas causados por el contenido de sólidos sobre la biomasa anaerobia, en este estudio se optó por utilizar el jugo, por lo que una muestra de 100 g de este componente fue caracterizada físicoquímicamente.



**Figura 5.1.** Composición en porcentaje en peso húmedo de los constituyentes del melón verde (*Cucumis melo*)

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica del jugo de melón verde (*Cucumis Melo*) utilizado en este trabajo.

**Tabla 5.1.** Caracterización fisicoquímica del jugo de melón verde.

<b>Parámetro</b>	<b>Valores iniciales</b>
Sólidos Totales (g/L)	3.9
Sólidos Fijos (g/L)	0.16
Sólidos Volátiles Totales (g/L)	4.1
DQO Total (g/L)	67.96
Azúcares (g/L)	41.36
Nitrógeno Total (%)	1.41
Humedad (%)	92.33
Densidad (g/mL)	1.004

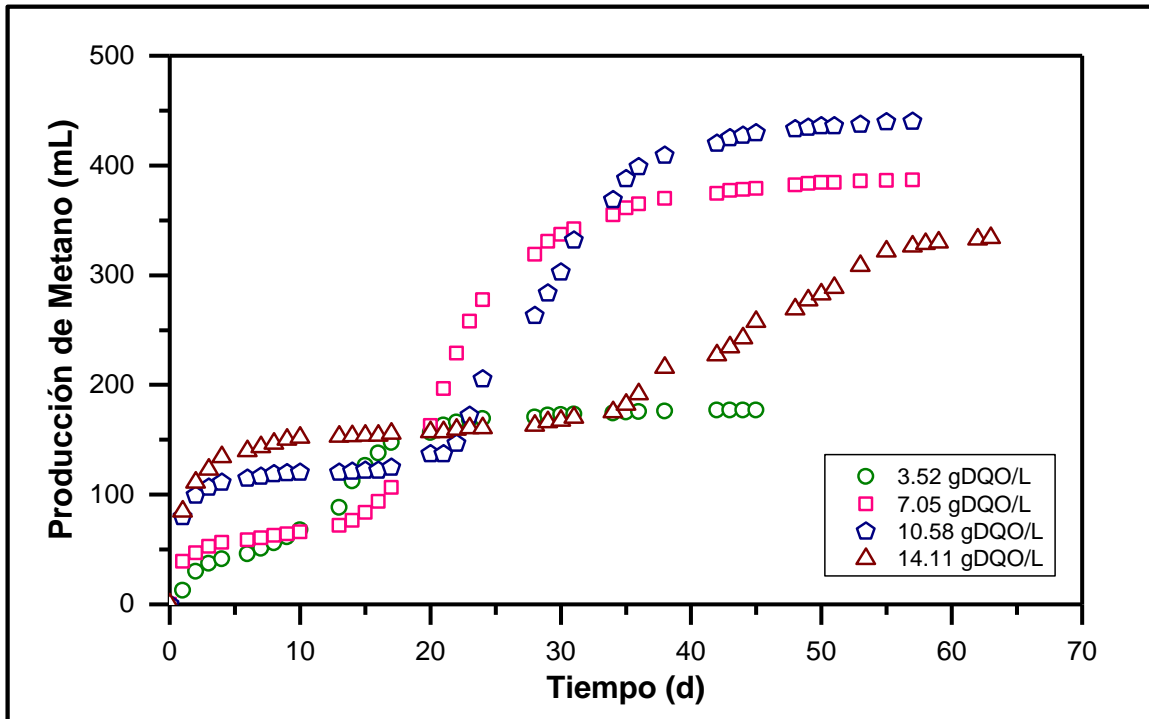
El jugo de melón verde mostró un gran contenido de materia orgánica que se reflejó en el contenido de azúcares, lo cual es característico de este tipo de frutas (DisToro, 2016). La materia orgánica, incluido los azúcares, puede ser biometanizada por el proceso secuencial de la digestión anaerobia (Montalvo *et al.*, 2003).

Se observó que los valores de nitrógeno encontrados concuerdan con los valores reportados en otros estudios para frutas como en el tomate, mango, naranja, banana, entre otros (Viswanath *et al.*, 1992).

## 5.2. Potencial Bioquímico de Metano del Jugo de Melón Verde

La producción de biogás en las botellas serológicas fue medida por 62 días, en donde se presentaron tres fases, una fase de retardo (fase lag), una fase exponencial y la fase estacionaria. El aumento de la concentración ocasionó el incremento de la fase lag; por lo que para las concentraciones de 3.57 y 7.05 gDQO/L ésta fue de 13 días, mientras que para concentraciones de 10.58 y 14.11 gDQO/L la fase lag tuvo una duración de 22 y 34 días respectivamente. Después de la fase lag se observó un aumento en la producción de metano, esto debido a la adaptación de las bacterias anaerobias a la alta concentración de materia orgánica o bien al crecimiento necesario de los microorganismos para lograr la degradación de altas concentraciones de DQO (Speece, 1996).

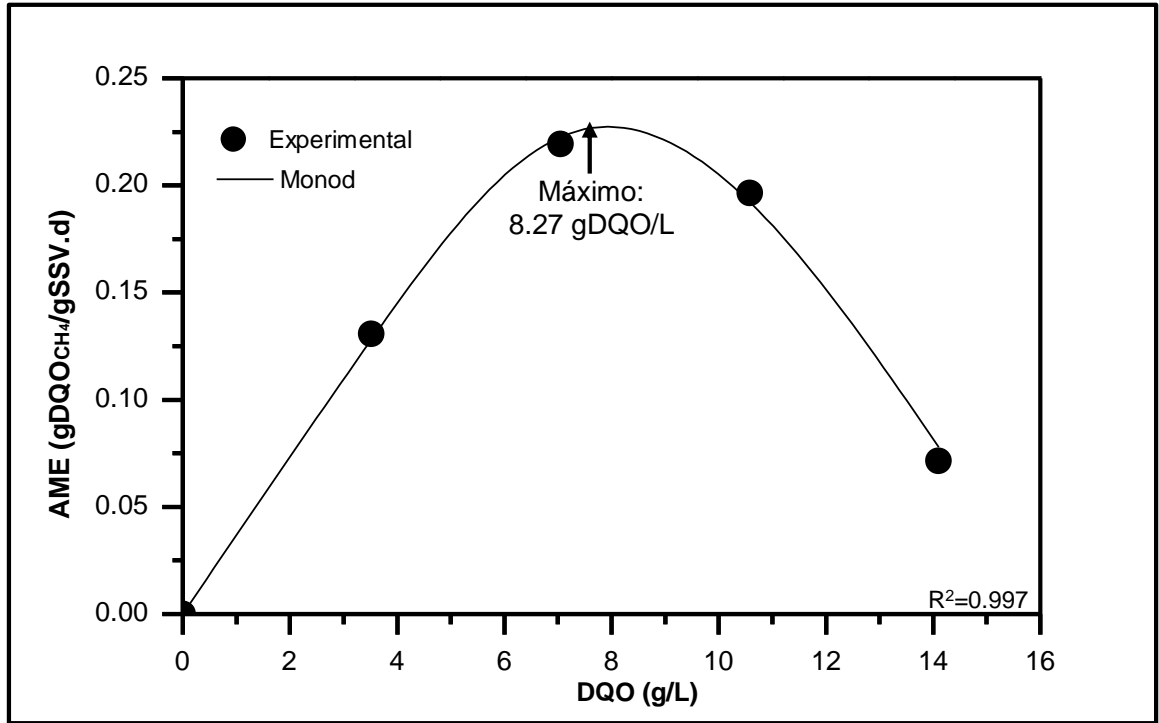
La cantidad de DQO presente en el jugo de melón afectó la producción de metano; ya que para las concentraciones de 3.52 a 10.58 gDQO/L se observó un aumento gradual en la producción de metano con una producción de 440 mL de biogás para la concentración de 10.58 gDQO/L a los 57 días, sin embargo en la concentración más alta (14.11 gDQO/L) se registró un decremento en la producción de biogás con una producción de 330 mL (Figura 5.2).



**Figura 5.2.** Producción de metano a concentraciones crecientes de materia orgánica (DQO) del jugo de melón verde.

En base al comportamiento de la producción de metano en la fase exponencial y de acuerdo a la Ecuación 4.1 se calcularon las actividades metanogénicas específicas de producción de metano (AME) para cada una de las concentraciones probadas las cuales se muestran en la Figura 5.3.

De acuerdo a Olgún-Lora *et al.*, (2003) el modelo cinético de Monod se puede ajustar para obtener los parámetros cinéticos en la actividad metanogénica específica, por lo que por analogía la  $AME_{max}$  es igual a la  $\mu_{max}$ . En la Tabla 5.2 se muestran los parámetros cinéticos  $\mu_{max}$ ,  $K_s$  y  $K_i$  con su respectivo coeficiente de determinación, los cuales fueron obtenidos mediante el ajuste de los valores experimentales de la AME al modelo de Monod con inhibición por sustrato (Ecuación 5.1) modificado por Cabranes *et al.*, (2005).



**Figura 5.3.** Comportamiento dinámico de los valores de AME experimental y los valores de AME calculados por el modelo de Monod.

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S + (S^{6.5} K_i)} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

$\mu$  = AME = Actividad Metanogénica Específica (gDQO<sub>CH4</sub>/gSSV.d)

S = Concentración de sustrato (g/L)

K<sub>i</sub> = Constante de inhibición (g/L)

K<sub>s</sub> = Constante de saturación (g/L)

n = Constante que ajusta al modelo.

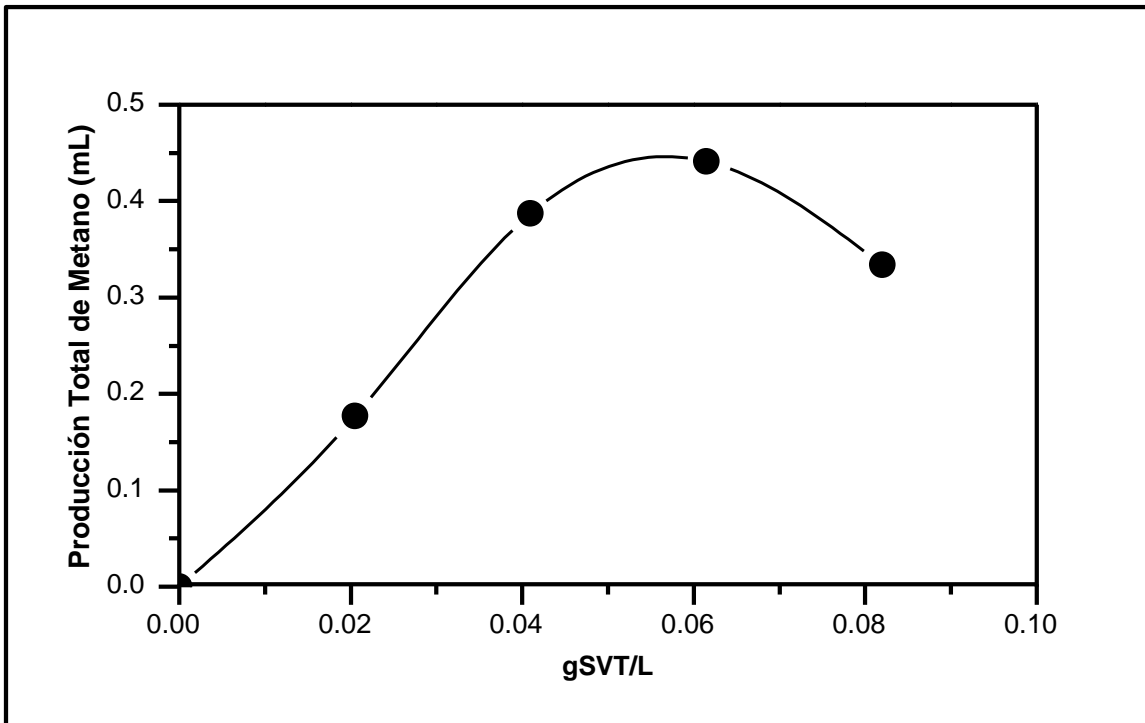
**Tabla 5.2** Parámetros cinéticos del modelo.

Parámetro	Valor
$\mu_{\max} = \text{AME}_{\max}$ (gDQOCH <sub>4</sub> /gSSV.d)	1.3525
K <sub>i</sub> (g/L)	6.6246*10 <sup>-6</sup>
K <sub>s</sub> (g/L)	33.6
n	6.5
R <sup>2</sup>	0.997

El comportamiento de la AME a las concentraciones crecientes de DQO probadas presentó dos zonas delimitadas por un máximo una de no inhibición y otra de inhibición. La primera zona se observó a valores entre cero y 7.05 gDQO/L, en donde la dependencia del valor de la AME con la concentración de DQO fue prácticamente lineal hasta llegar a un máximo de 8.27 gDQOCH<sub>4</sub>/L, valor que fue obtenido por medio de la derivada de la Ecuación 5.1 e igualándola a cero (Anexo 8.3) para después presentarse la zona de inhibición a las concentraciones de DQO de 10.58 y 14.11 g/L.

Al igual que la AME el comportamiento de la producción total de metano fue directamente proporcional al contenido de sólidos en las botellas y se redujo a partir de la concentración de 10.58 gDQO/L (Figura 5.4). En base a los volúmenes totales de metano producidos por Kg de jugo de cada uno de los ensayos, en este estudio se estimó que se produjeron 38 L de metano por kilogramo de jugo de melón verde equivalentes a 9.43 LCH<sub>4</sub>/gSVT. Estos datos fueron superiores a los reportados por otros autores como Bouallagui *et al.*, (2004) quienes obtuvieron una producción en promedio de 0.7 LCH<sub>4</sub>/gSVT utilizando una mezcla de frutas digeridas en un reactor tubular, mientras que Viswanath *et al.*, (1992) reportaron una producción de biogás de 0.6 LCH<sub>4</sub>/gSVT utilizando desechos de frutas en estudios en lote. Así pues, en este estudio, al utilizar el jugo de la fruta se obtuvo una mayor producción de biogás debido a la disponibilidad de los azúcares para ser biometanizados. Tal es el caso

de Arvizu Fernández (2015) quien reportó que la producción de biogás fue el doble cuando se utilizó el jugo de nopal que cuando se utilizó el nopal molido.



**Figura 5.4.** Producción total de metano a concentraciones crecientes de jugo de melón verde.

Con ayuda de la Ecuación 5.2 y tomando en cuenta la producción de biogás por kilogramo de jugo de melón se obtuvo la cantidad de energía que éste puede producir:

$$\left(\frac{38 \text{ L de biogás}}{\text{Kg de Jugo}}\right) \left(\frac{0.6 \text{ Kg de Jugo}}{1 \text{ Kg de melón}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right) \left(\frac{6 \text{ KWh}}{1 \text{ m}^3}\right) = 0.1368 \frac{\text{KWh}}{\text{Kg melón}} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

$$\left(\frac{0.1368 \text{ KWh}}{\text{Kg de melón}}\right) \left(\frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ Ton melón}}\right) = 136.8 \frac{\text{KWh}}{\text{Ton melón}} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Esto es importante ya que el aprovechamiento de biomasa, biogás y biocombustibles para la generación de energía eléctrica se ha convertido en una

alternativa considerablemente relevante en regiones como Europa y Norteamérica, mientras que en México aún se encuentra en crecimiento, ya que en el 2012 se produjeron 137 GWh/a de energía eléctrica a partir de bioenergía, sin embargo esta producción de energía es irrelevante considerando la que se produce por las fuentes convencionales (Ríos *et al.*, 2016 y SENER, 2013).

### 5.3. Digestión Anaerobia en dos Etapas del Jugo de Melón Verde

#### 5.3.1. Hidrólisis del jugo de melón verde

Como se muestra en la Tabla 5.3 la temperatura no afectó la velocidad específica de consumo del azúcar en ambas condiciones. Durante la hidrólisis del jugo a condiciones mesofílicas y termofílicas se observó que el consumo de los azúcares reductores ocurrió en los primeros dos días para ambas cinéticas (Figura 5.5).

**Tabla 5.3.** Digestión anaerobia en dos etapas del jugo de melón verde.

	<b>Consumo de Azúcar (gA-R/gSSV.d)</b>	<b>Producción de AGV's (mEq/gSSV.d)</b>	<b>Actividad Metanogénica (gDQO<sub>CH4</sub>/gSSV.d)</b>
Mesofílica	0.8641	7.3894	0.182
Termofílica	0.8773	3.2423	0.318



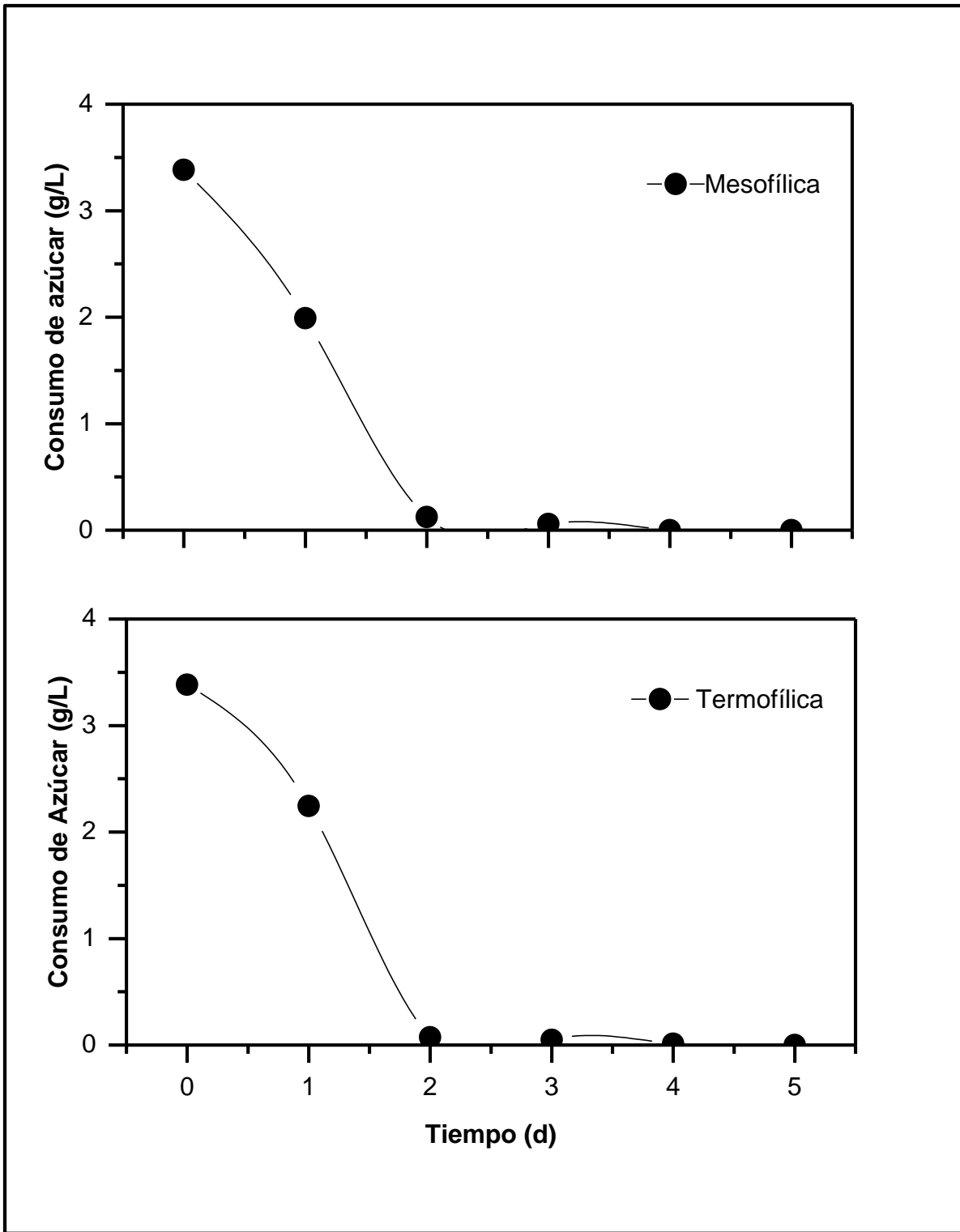
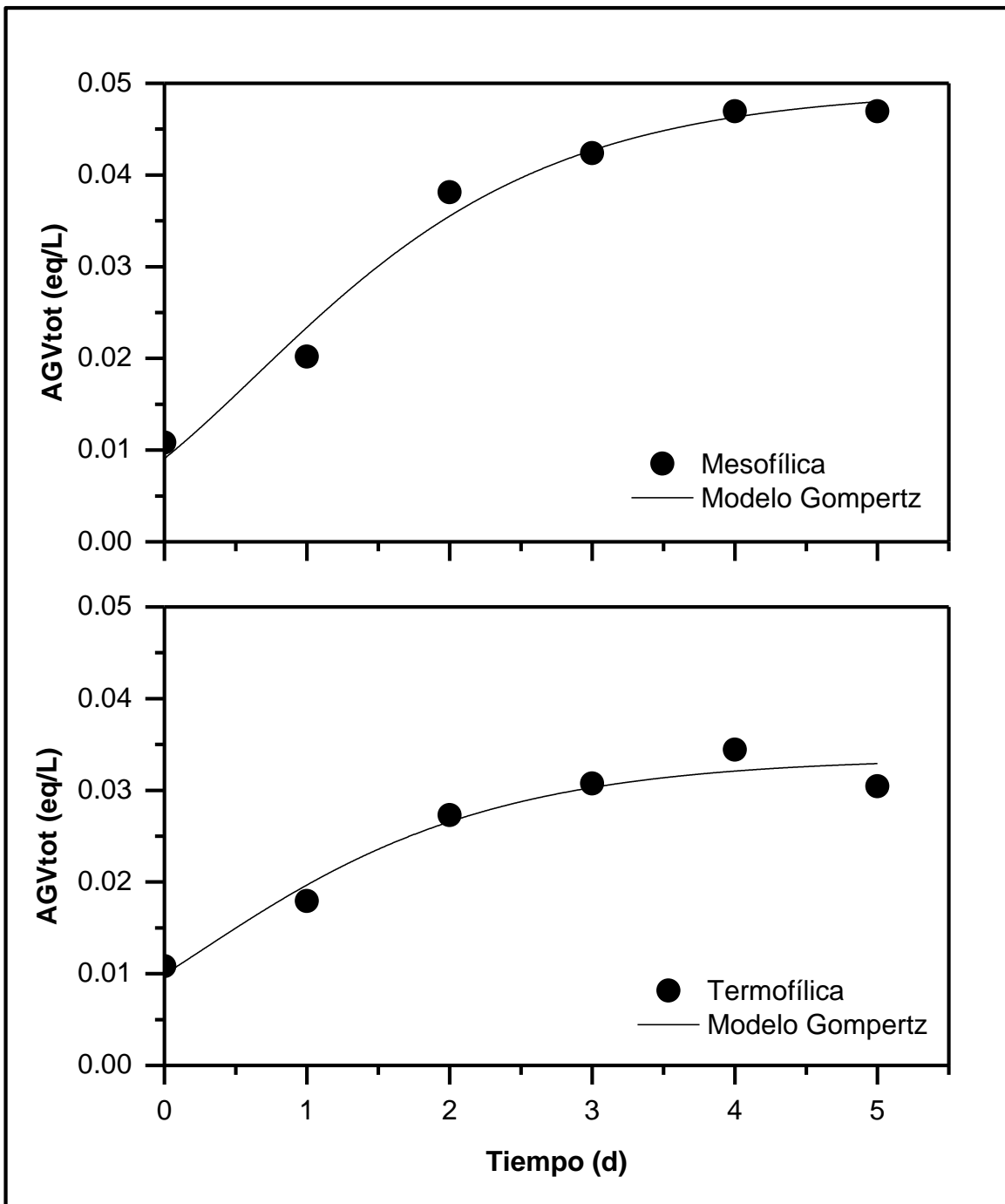


Figura 5.5. Consumo de azúcar (g/L)

Los AGV's son intermediarios clave de los procesos de digestión anaerobia en dos fases, ya que alrededor del 72% de su producción es convertido a metano. La producción de AGV's es un indicador importante de la etapa de la hidrólisis. Por lo tanto el propósito de la etapa hidrolítica es maximizar la producción de AVG's para proveer el sustrato adecuado para la fase metanogénica (Yang *et al.*, 2013).

Las condiciones mesofílicas favorecieron la producción de AGV's que las condiciones termofílicas. En la Figura 5.6, se observa que la máxima producción de AGV's para condiciones termofílicas se obtuvo en el día cuatro con una producción de 0.030 mEq/L, mientras que para condiciones mesofílicas se obtuvo en el día cinco con 0.047 mEq/L. Aunque el máximo de la producción de AGV's se logró en menor tiempo en condiciones termofílicas, al tomar en cuenta la velocidad de producción total de AGV's y la biomasa utilizada en el estudio tenemos que la velocidad específica de producción de AGV's fue el doble en las condiciones mesofílicas que en termofílicas como se muestra en la Tabla 5.3. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Yang *et al.*, (2013) quienes trabajando con desechos orgánicos de maíz y estiércol de cerdos observaron una menor producción de AGV's a condiciones termofílicas alcanzando el máximo a los 9 días; mientras que en las condiciones mesofílicas la máxima producción se alcanzó a los 10 días.

La mayor producción de AGV's a condiciones mesofílicas pudo deberse a que la temperatura óptima de las bacterias acidogénicas se encuentra en un rango de 20-35 °C (Yang *et al.*, 2013) y las condiciones termofílicas no fueron favorables para estas bacterias.



**Figura 5.6.** Producción de AGV's durante la hidrólisis del jugo de melón en condiciones mesofílicas y termofílicas.

La velocidad de producción de AGV's de los estudios en lote para ambas condiciones puede ser predicha por el modelo de Gompertz de la siguiente manera:

$$y = a * e^{(-e^{(-k*(x-x_c))})}$$

Ecuación 5.4

Condiciones mesofílicas:

$$y = 0.04937 * e^{(-e^{(-0.81909*(x-0.64348))})}$$

Ecuación 5.5

Condiciones termofílicas:

$$y = 0.03357 * e^{(-e^{(-0.82643*(x-0.24019))})}$$

Ecuación 5.5

Donde:

y: Producción de AGV's  $\left(\frac{\text{eq}}{\text{L}}\right)$

a: Producción máxima

$x_c$ : Tasa específica de producción.

k: Constante del modelo de Gompertz

En la Tabla 5.4 se muestran los parámetros correspondientes al modelo de Gompertz que ajusta a la hidrólisis del jugo de melón verde.

**Tabla 5.4.** Parámetros numéricos del modelo de Gompertz en la producción de AGV's

Modelo	Mesofílica	Termofílica
Chi <sup>2</sup>	7.205*10 <sup>-6</sup>	5.3871*10 <sup>-6</sup>
R <sup>2</sup>	0.968	0.9339
	a = 0.04937	a = 0.03357
Parámetros	$x_c = 0.64348$	$x_c = 0.24019$
	k = 0.81909	k = 0.82643

### 5.3.2. Producción de biogás de los ácidos orgánicos producidos durante la hidrólisis del jugo de melón verde

Una vez terminada la cinética de producción de AGV's se procedió con la etapa de metanización con el fin de completar el ciclo de la digestión anaerobia en dos etapas. Los resultados revelaron un efecto significativo de la temperatura en la producción de biogás a partir de AGV's. En la Figura 5.7 se observa que la producción de biogás en condiciones mesofílicas fue menor que en condiciones termofílicas con 109 y 210 mL de CH<sub>4</sub> a los 12 días respectivamente. Así mismo se obtuvo una mayor velocidad de producción de biogás en las condiciones termofílicas como se muestra en la Tabla 5.3. Esto debido al hecho de que la temperatura es un parámetro potencialmente operacional en los procesos de digestión anaerobia. Zinder *et al.*, (1984) sugieren que la metanogénesis funciona de manera óptima a 55-60°C y se inhibe completamente a 65°C.

La velocidad de producción de biogás de los estudios en lote para ambas condiciones puede ser predicha por el modelo de Gompertz de la siguiente manera:

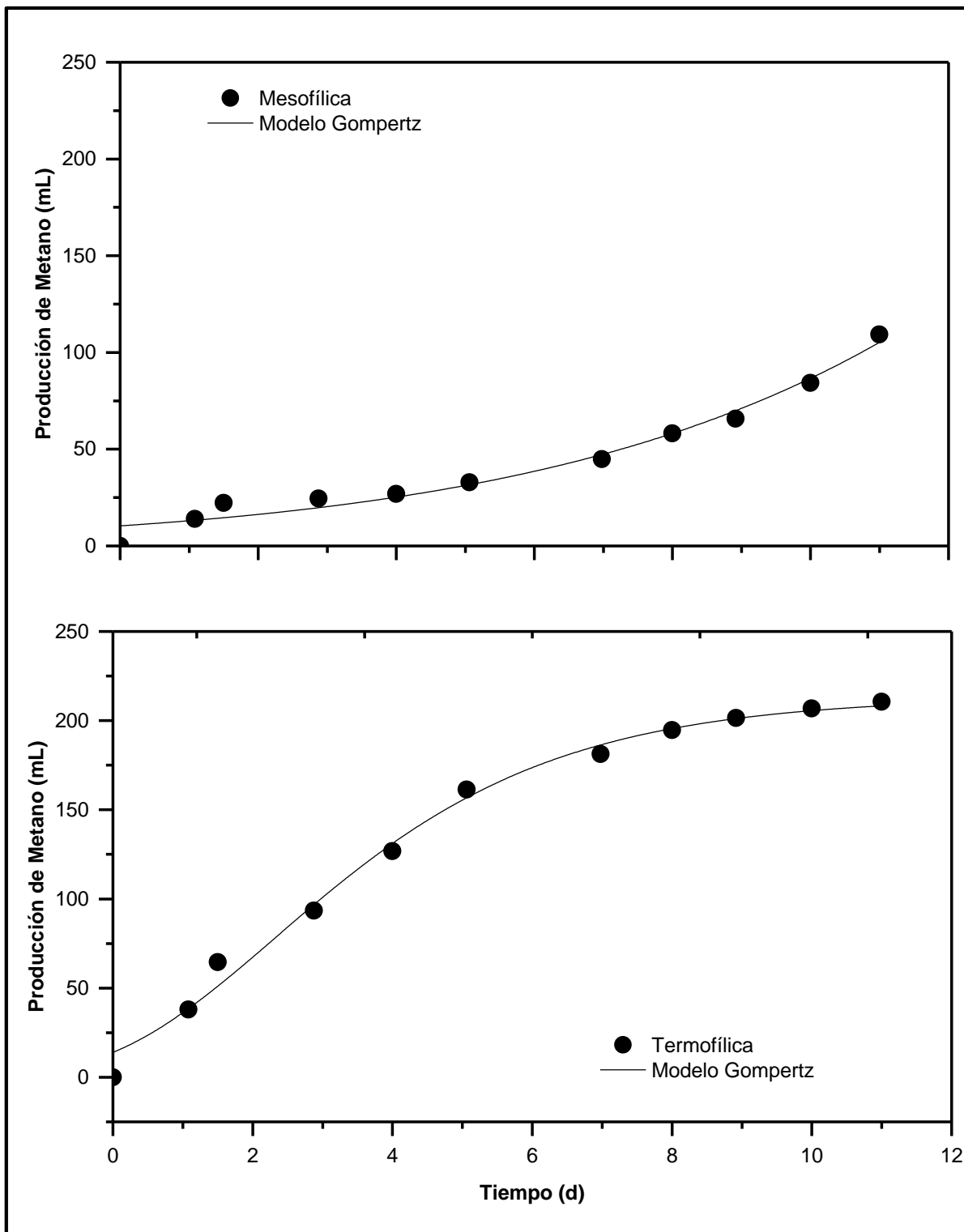
Condiciones mesofílicas:

$$y = 2.6238 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\left(-e^{(-0.01553 \cdot (x-173.232))}\right)} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Condiciones termofílicas:

$$y = 213.2843 \cdot e^{\left(-e^{(-0.4309 \cdot (x-2.3293))}\right)} \quad \text{Ecuación 5.7}$$

En la Tabla 5.5 se muestran los parámetros correspondientes al modelo de Gompertz que ajusta producción de biogás.



**Figura 5.7.** Producción de biogás de los ácidos orgánicos producidos durante la hidrólisis del melón verde.

**Tabla 5.5.** Parámetros numéricos del modelo de Gompertz en la producción de Metano

<b>Modelo</b>	<b>Mesofílica</b>	<b>Termofílica</b>
Chi <sup>2</sup>	29.84	57.30
R <sup>2</sup>	0.972	0.989
	a = 2.6238*10 <sup>-6</sup>	a = 213.2843
Parámetros	x <sub>c</sub> = 173.232	x <sub>c</sub> = 2.3293
	k = 0.01553	k = 0.4309

Cabe resaltar que al separar la digestión anaerobia en dos etapas se mejoró la biometanización de los residuos de melón verde en un 51% para las concentraciones de 7.05 gDQO/L en condiciones mesofílicas con producciones de 93.71 y 61.9 mL de metano para las digestiones anaerobias de dos y una etapa respectivamente para el día 12.

Boullagui *et al.*, (2005) menciona que los procesos de digestión anaerobia en dos etapas son altamente eficientes para la digestión anaerobia de desechos de frutas, ya que la primera etapa funciona como una etapa reguladora permitiendo cargas orgánicas más altas y así controlando la carga que se alimentará a la segunda etapa metanogénica.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados en este estudio demuestran que los residuos agroindustriales de melón verde pueden ser una buena fuente para obtener energía a partir de biogás por medio del proceso de la digestión anaerobia, ya sea en una o dos etapas.

El análisis de los parámetros físico químicos del jugo de melón verde permitió conocer las características que pueden influir en la biometanización como el alto contenido de azúcar y el bajo contenido de nitrógeno.

El alto contenido de azúcares en el jugo de melón verde es un buen sustrato disponible para el proceso de biometanización. En este estudio se logró una producción de 38 L de CH<sub>4</sub> por kilogramo de jugo, lo cual es significativo si tomamos en cuenta la gran cantidad de residuos generados durante los procesos de producción.

Durante los estudios del potencial bioquímico de metano en una etapa es importante controlar la carga orgánica ya que altas concentraciones ocasionan una rápida producción elevada de AGV's y por ende una disminución en el pH lo que ocasiona la inhibición de las bacterias metanogénicas disminuyendo la producción de biogás.

La digestión anaerobia en dos etapas permitió el buen control de los procesos individuales ya que los ácidos orgánicos que se produjeron en la primera etapa fueron suministrados de manera controlada en la segunda etapa para producir biogás y con ello se mejoró significativamente la metanización.

La temperatura es un parámetro importante que influyó en los procesos de hidrólisis y metanización del jugo de melón. En la etapa hidrolítica el rango de temperatura óptima estuvo en la región mesofílica con una mayor producción de AGV's, mientras que en la etapa metanogénica fue más eficiente el rango de temperatura termofílico.



## 7. REFERENCIAS

Acosta, R., Galván, L., Quiñones, P., Chávez, S. N. (2010). *Melón*. Paquete Tecnológico Agrícola. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias – Chihuahua. En línea: <http://es.slideshare.net/casuza/paquetes-tecnologicos>

Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., y Dewil, R. (2008). *Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge*. Progress in Energy and Combustion Science 34: 755–781.

Appels, L., Lauwers, J., Degrève, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., Impe, J. y Dewila, R. (2011). *Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15: 4295– 4301

Arvizu, J. (2015). *Producción de biogás con nopal*. Tendencia Tecnológica. Boletín IIE. Abril-Junio: 64-72.

Barragán, B., Téllez, Y., Laguna, A. (2008). *Utilización de Residuos Agroindustriales*. Revista Sistemas Ambientales, Vol. 2, No 1, 2008 págs. 44-50

Bouallagui, H., Cheikh, R., Marouani, L. y Hamdi, M. (2003). *Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester*. Bioresource Technology 86: 85–89.

Bouallagui, H., Haouari, O., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., Marouani, L. y Hamdia, M. (2004). *Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste*. Process Biochemistry 39: 2143–2148.

Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben, R., Hamdi, M. (2005). *Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes*. Process Biochemistry 40: 989–995.

Cabranes, Y., Núñez R., Martínez, J., Ortiz, E. (2005). *Parámetros Cinéticos de la degradación del ciclohexano por dos bacterias del género Bacillus*. [En línea]. Disponible en:

<http://www.revistaciencias.com/publicaciones/EEFklykppAiKXerEFL.php>

Çelik, I. y Demirer, G. (2015). *Biogas production from pistachio (Pistacia vera L.) processing waste*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 4: 767–772.

Chanakya, H. y Sreesha, M. (2012). *Anaerobic retting of banana and arecanut wastes in a plug flow digester for recovery of fiber, biogas and compost*. *India. Energy for Sustainable Development* 16: 231–235.

DisToro Inc. (2016). *Melón*. Disponible en: <http://distoro.com/melon.html>

Domínguez-Bocanegra, A., Torres-Muñoz, J., López, R. (2015). *Production of Bioethanol from agro-industrial wastes*. *Fuel* 149: 85–89.

Figuroa, G. (2013). *Biosorción de Cu y Fe con biomasa anaerobia acidogénica en Clinoptilolita*. Tesis Maestría. Universidad de Sonora: 1-127.

Gali et al., 2009. (Citado de: Rosenkranz F. (2013). *Estudio del comportamiento de reactores anaerobios de tipo ASBR frente a compuestos de difícil degradación y/o efectores negativos*. Tesis Doctoral. Universidad Santiago de Compostela.

Ganesh, R., Torrijos, M., Sousbie, P., Lugardon, A., Steyer, J., Delgenes, J. (2014). *Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: Comparison of start-up, reactor stability and process performance*. *Waste Management* 34: 875–885

Graminha, E., Goncalves, A., Pirota, R., Balsalobre, M., Silva, R. y Gomes, E. (2008). *Enzyme production by solid-state fermentation: Application to animal nutrition*. *Animal Feed Science and Technology* 144: 1–22.

Grolleaud, M. (2002). *Post-harvest losses: discovering the full story. Overview of the phenomenon of losses during the Post-harvest System*. FAO, Rome (Italy). Agricultural Support Systems Div.

Gustavsson, J., C. Cederberg, R. Van Otterdijk, A. Meybeck (2011). *Global Food Losses and Food Waste*. Düsseldorf, Germany.

Kader Adel A. (2003). *A Perspective on Postharvest Horticulture*. California, HortScience. Vol 38(5): 1004-1008.

Kumaran, P., Hephzibah, D., Sivasankari, R., Saifuddin, N. y Shamsuddin A. (2016). *A review on industrial scale anaerobic digestion systems deployment in Malaysia: Opportunities and challenges*. Malasia. Renewable and Sustainable Energy Reviews 56: 929–940.

Kummu, M., de Moel, H., Porkka, M., Siebert, S., Varis, O. y Ward, P. (2012). *Lost food, wasted resources: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use*. Science of the Total Environment 438: 477–489.

Madigal, M.T., Mertinko, J.M., Parker, J. (1998). *Brock Biology of microorganisms*. Edit. Prentice may International (UK) Ltd 8<sup>a</sup> ed.

Mata-Álvarez, J. (2005). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA publishing. Vol 4: 1-18

Montalvo Martínez, Silvio J. y Lorna E. Guerrero Saldes. (2003). *Tratamiento anaerobio de residuos: Producción de biogás*. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María. 416 p.

Neethu, C., Rahiman, K., Rosmine, E., Saramma, A. y Mohamed, A. (2015). *Utilization of agro-industrial wastes for the production of lipase from Stenotrophomonas maltophilia isolated from Arctic and optimization of physical parameters*. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 4: 703–709.

Okonkwo, U., Onokpite, E. y Onokwai, A. (2016). *Comparative study of the optimal ratio of biogas production from various organic wastes and weeds for digester/restarted digester*. Journal of King Saud University – Engineering Sciences. Vol 30: 1-7.

Olguín-Lora, P. y Razo-Flores, E. (2003). *Anaerobic biodegradation of phenol in sulfide-rich media*. México DF. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. J Chem Technol Biotechnol 0268–2575.

Olguin-Lora P., Puig-Grajales L. y Razo-Flores E. (2003). *Inhibition of the acetoclastic methanogenic activity by phenol and alkyl phenols*. Environmental Technology. (24): 999-1006.

Oliveira, L., Porto, A. y Tambourgi, E. (2006). *Production of xylanase and protease by Penicillium janthinellum CRC 87M-115 from different agricultural wastes*. Bioresource Technology 97: 862–867.

Olugasa, T., Odesola, I. y Oyewola, M. (2014). *Energy production from biogas: A conceptual review for use in Nigeria*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 32: 770–776.

Parfitt<sup>1</sup>, J., Barthel, M. y Macnaughton, S. (2016). *Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050*. Phil. Trans. R. Soc. B 365: 3065–3081.

Piwozar, A., Dzikuc M. y Adamczyk, J. (2016). *Agricultural biogas plants in Poland selected technological, market and environmental aspects*. Polonia. Renewable and Sustainable Energy Reviews 58: 69–74.

Rios, M. y Kaltschmitt, M. (2016). *Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 54: 384–395.

Rosenkranz, F. (2013). *Estudio del comportamiento de reactores anaerobios de tipo ASBR frente a compuestos de difícil degradación y/o efectores negativos*. Tesis doctoral.

SAGARPA (2010). *Información técnica de melón mexicano para exportación*. México D.F.

SAGARPA (2011). *Sonora, Panorama agroalimentario y pesquero*. México DF. Primera Edición.

SAGARPA (2011). *Monitor Agroeconómico*. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios. En línea:

<http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/Documentos/monitor%20estados/Sonora.pdf>

Saval, S. (2012). *Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro*. México, DF. BioTecnología, Vol. 16 No. 2: 14-46.

Scano, E., Asquer, C., Pistis, A., Ortu L., Demontis, V. y Cocco, D. (2014). *Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilotscale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant*. Italia. Energy Conversion and Management 77: 22–30.

SENER (2013). *Prospectiva de Energías Renovables 2013-2027*. México: 1-97

Shokri, Sh. (2011). *Biogas Technology, Applications, Perspectives and Implications*. International Journal of Agricultural Science and Research Volume 2, Number 3, (Serial #4): 53-60.

SIAP (2014). *Producción Agrícola en Sonora*. Disponible en línea: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>

Sitorus, B., Sukandar, B., y Panjaitan, S. (2013). *Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit -vegetable wastes*. Energy Procedia 32: 176 – 182.

Speece, R. (1996). *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*. Edición Illustrated, publisher Archae Press. pp: 394

Uddin, W., Khan, B., Shaukat, N., Majid, M., Mujtaba G., Mehmood, A. Ali, S., Younas, U., Anwar, M. y Almeshal, A. (2016). *Biogas potential for electric power generation in Pakistan: A survey*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 54: 25–33.

- Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez., J. y Hernández-Santiago, C. (2010). *Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 2147–2153.
- Visser A (1995). *The anaerobic treatment of sulfate containing wastewater*. Doctoral thesis. Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Viswanath, P., Sumithra, S. y Nand, K. (1992). *Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Processing Wastes for Biogas Production*. India. Bioresource Technology 40: 43-48.
- Wua, Y., Cuia, E., Zuoa, Y., Chenga, W., Rensingb, C., Chena, H. (2016). *Influence of two-phase anaerobic digestion on fate of selected antibiotic resistance genes and class I integrons in municipal wastewater sludge*. Bioresource Technology 211: 414–421.
- Yang, S., Li, Y., Ding, Y., Zhao, B., Liu, Z., Pang, J., Wang, T., Shang, C. (2013). *Effects of Mesophilic and Thermophilic Temperature on Hydrolysis and Acidification of Organic Wastes Two-Phase Anaerobic Digestion*. Applied Mechanics and Materials. Vols. 448-453, pp 1599-1604.
- Yuanyuan, W., Hailing, M., Mingyue. Z, y Kaijun, W. (2015). *Lactic acid production from acidogenic fermentation of fruit and vegetable wastes*. Bioresource Technology 191: 53–58.
- Zainab, Z. y Talib, R. (2016). *Recycled medical cotton industry waste as a source of biogas recovery*. Journal of Cleaner Production 112: 4413-4418.
- Zinder, S., Anguish, T. y Cardwell, S. (1984). *Effects of Temperature on Methanogenesis in a Thermophilic (58°C) Anaerobic Digestor*. APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY, p. 808-813 Vol. 47, No. 4.

## 8. ANEXOS

### 8.1. Cálculos de la Actividad Metanogénica Específica

A continuación se ejemplifica la forma de utilizar las ecuaciones mostradas en la sección 4.4.

Al momento de graficar la producción de metano para la concentración de 3.52 gDQO/L se obtuvo una pendiente de  $0.5014 \frac{\text{LCH}_4}{\text{h}}$ , esta pendiente es la que se tiene que convertir a condiciones estándar (stp):

$$V_0 = 0.5014 \frac{\text{LCH}_4}{\text{h}} * \frac{273^\circ\text{K}}{308^\circ\text{K}} * \frac{0.97 \text{ atm}}{1 \text{ atm}} = 0.4311 \quad \text{Ecuación 8.1}$$

$$V_0 = 0.4311 \frac{\text{LCH}_4}{\text{h}} \quad \text{Ecuación 8.2}$$

$$\text{AME} = \frac{0.4311 \frac{\text{LCH}_4}{\text{h}} * 24}{\left(0.35 \frac{\text{LCH}_4}{\text{gDQO}}\right) * (0.02264 \text{ g SSV})} \quad \text{Ecuación 8.3}$$

$$\text{AME} = 0.1305 \frac{\text{gDQO}_{\text{CH}_4}}{\text{gSSV. L. d}} \quad \text{Ecuación 8.4}$$

## 8.2. Curva de Calibración de Azúcares

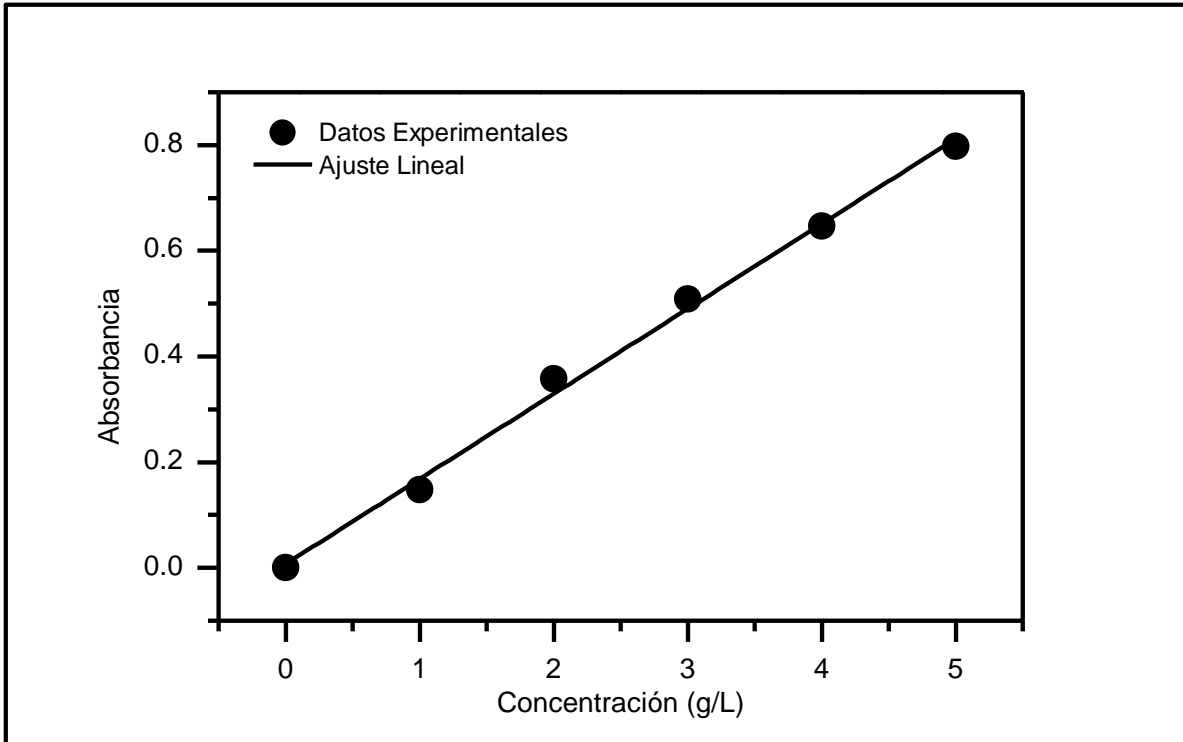


Figura 8.1. Curva de calibración de azúcares

## 8.3. Cálculos de la AME Máxima

Partiendo de la ecuación del modelo de Monod:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S + (S^{6.5} K_i)} \quad \text{Ecuación 8.5}$$

Donde:

$$D_1 = \mu_{\max} S$$

$$D_2 = K_s + S + (S^{6.5} K_i)$$

$$\frac{dD_1}{dS} = \mu_{\max}$$



$$\frac{dD_2}{dS} = 1 + 6.5 * K_i * S^{5.5}$$

Sustituyendo los valores anteriores para encontrar la derivada de  $\mu$  con respecto a S:

$$\frac{d\mu}{dS} = \frac{\mu_{\max} * K_s + S + (S^{6.5} K_i) - (1 + 6.5 * K_i * S^{5.5}) * \mu_{\max} S}{(K_s + S + (S^{6.5} K_i))^2} \quad \text{Ecuación 8.6}$$

Igualando a cero la derivada anterior para encontrar el valor máximo de S, tenemos:

$$\frac{d\mu}{dS} = \frac{\mu_{\max} * K_s + S + (S^{6.5} K_i) - (1 + 6.5 * K_i * S^{5.5}) * \mu_{\max} S}{(K_s + S + (S^{6.5} K_i))^2} = 0 \quad \text{Ecuación 8.7}$$

Despejando S:

$$\cancel{\mu_{\max}} * K_s + S + (S^{6.5} K_i) - (1 + 6.5 * K_i * S^{5.5}) * \cancel{\mu_{\max}} S = 0 \quad \text{Ecuación 8.8}$$

$$K_s + S + (S^{6.5} K_i) - S * (1 + 6.5 * K_i * S^{5.5}) = 0 \quad \text{Ecuación 8.9}$$

$$K_s + \cancel{S} + S^{6.5} K_i - \cancel{S} - 6.5 * K_i * S^{6.5} = 0 \quad \text{Ecuación 8.10}$$

$$K_i (S^{6.5} - 6.5 * S^{6.5}) = -K_s \quad \text{Ecuación 8.11}$$

$$K_i (-5.5 * S^{6.5}) = -K_s \quad \text{Ecuación 8.12}$$

$$S = \sqrt[6.5]{\frac{-K_s}{-5.5 * K_i}} \quad \text{Ecuación 8.13}$$

Sustituyendo los valores mostrados en la Tabla 5.2:

$$S = \sqrt[6.5]{\frac{-33.6}{-5.5 * 6.6246 * 10^{-6}}} \quad \text{Ecuación 8.14}$$

$$S = 8.27 \frac{gDQO}{L} \quad \text{Ecuación 8.15}$$