

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD DE LOS EXTRACTOS DE YUCA  
AMARGA PROVENIENTES DE UNA CAZABERA ARTESANAL MEDIANTE UNA  
DIGESTIÓN ANAERÓBICA**

**Realizado por:**

**CARLOS ALFREDO COA GARCÍA  
JOSE LEONARDO VELÀSQUEZ GARCÍA**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial  
para optar al título de  
**INGENIERO QUÍMICO**

Puerto La Cruz, enero de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD DE LOS EXTRACTOS DE YUCA  
AMARGA PROVENIENTES DE UNA CAZABERA ARTESANAL MEDIANTE UNA  
DIGESTIÓN ANAERÓBICA**

**ASESOR**

---

**Ing. Quím. Milena Amundaraín, MSc.**

Puerto La Cruz, enero de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD DE LOS EXTRACTOS DE YUCA  
AMARGA PROVENIENTES DE UNA CAZABERA ARTESANAL MEDIANTE UNA  
DIGESTIÓN ANAERÓBICA.**

---

**Ing. Quím. Milena Amundaraín, MSc.**  
Asesor académico

---

**Licdo. Rafael Alemán.**  
Jurado Principal

---

**Dra. Ana Teresa Ciarfella**  
Jurado Principal

Puerto La Cruz, enero de 2011

## RESOLUCIÓN

***De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado:***

***“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo al Consejo Universitario, para su autorización”.***

## DEDICATORIA

*A Dios todo poderoso porque a su lado he crecido en este mundo maravilloso que me ha regalado para vivir.*

*A toda la gran familia UDO, que gracias a su constancia del día a día contribuyen a la formación de hombres y mujeres profesionales con aptitudes y capacidades óptimas en pro del desarrollo de una mejor Venezuela.*

*A todos nuestros grandes maestros de esta casa más alta del oriente venezolano que gracias a sus grandes consejos, anécdotas y enseñanzas la cima del éxito se hace presente, por ello siempre serán los mejores.*

**A ustedes  
Nuestras eternas gracias.**

## AGRADECIMIENTOS

Encontrar palabras para decir “Gracias” casi siempre es muy difícil; es más fácil dar un abrazo mientras el brillo de los ojos se encarga de hablar por nosotros, pero como ahora solo cuento con letras, es necesario explotar al máximo el corazón para dejar salir lo que ha guardado.

En primer lugar doy mil gracias a Dios por hacerme quien soy y por darme todo lo que tengo, desde el aire que respiro hasta el último rayo de sol que regala la tarde mientras la observo al lado de un ser especial.

A mis padres por darme la oportunidad de vivir, para así luchar y formarme como hombre de bien, soñador, emprendedor en todo lo que he logrado hasta ahora.

A mis tíos María Velásquez y Freddy Velásquez por ser en todo momento mis segundos padres.

A toda mi gran familia Carabobeña, que gracias a su amor comprensión me fortalecieron muchísimo en momentos difíciles, los mejores de mi vida que mientras yo exista nunca los olvidare, se les quiere mucho.

A todos mis grandes amigos: Nackerid Valdez, Gusmarys Arenas, Rudy Leal, Gusmarly Calzadilla, Marvesi Laya, Rosleni Calzadilla, Elio Castañeda, Yulianny Materano, Luis Castañeda, Carlos Coa, Luis Rivero, Luis Bravo, Xiomara Gutierrez, Jaigimar Zapata, Yamira Lizeth, Cristian Ramírez, María Tomé, Orlando Martínez, Angela Elbittar, Vanessa Velásquez, René Prato, Anyela Rizales, Alirio Chacón, Carmen Martínez, Karen Hernández. Que en todo momento me hicieron saber que una constante lucha tiene su recompensa brillante, llena de emociones, alegrías y un poco de tristezas que son muy gratificantes.

Al Postgrado de Ingeniería de los alimentos en especial a la profesora Ana Ciarfella, que gracias a su gran apoyo e iniciativa se logró esta gran investigación.

A la Profesora Milena Amundaraín que gracias a su constancia y a sus excelentes instrucciones este trabajo de investigación se llevo a cabo.

A mi honorable técnico Gladys Peña del laboratorio de sistemas dispersos y ambiente, por su gran ayuda pionera en el inicio de esta investigación.

Al Laboratorio de Tecnología de Alimentos, técnico Lizeth Colón que gracias profesionalismo mostrado hacia esta investigación, hoy por hoy es una realidad.

Al Laboratorio de análisis químico del postgrado de Ingeniería Química.

Al laboratorio de estudios ambientales.

Al profesor Lucas Alvares por sus excelentes recomendaciones para este trabajo de investigación mil gracias...

A la profesora Shirley Marfissi por facilitarnos en todo momento el acceso a las instalaciones del laboratorio de análisis químico y sistemas dispersos.

Al departamento de ingeniería química al profesor Pascual Rodríguez, por su gran aporte que en un momento sirvió de mucho para el avance de esta investigación.

A mis grandes maestros: Yanuary Martorelli, Arturo Ramírez de la escuela de matemáticas del Núcleo de Sucre.

A la Lcda. Denisse Lucith Vargas por su gran apoyo incondicional en el inicio de mi carrera en el Núcleo de Sucre, gracias a ti nine por esas grandes ayudas en aquellos momentos tan difíciles que fueron superados, sabes que en mi sembraste ese profesionalismo con mucha perseverancia y eso nunca lo olvidaré ...tqm..!

A todos aquellos que no quisieron que se llevara a cabo esta investigación mil éxitos también....

***Gracias a todos.***  
**JOSE LEONARDO VELÁSQUEZ GARCÍA**

Gracias a DIOS por la vida que me ha dado, por brindarme justo lo que necesito cuando lo necesito para vivir el día a día en esta vida, por la oportunidad de alcanzar este logro en mi vida, por sus muchas bendiciones especialmente en mí transitar por la universidad, suya es la sabiduría y la inteligencia.

A mi madre Marbelis García que me enseñó a valorar la vida con dedicación y esfuerzo, a mi padre Freddy Coa que siempre confió en que podía asumir este reto y alcanzarlo satisfactoriamente exhortándome cada día desde el principio de mi carrera a estudiar y seguir adelante en cualquiera situación de la vida, gracias padres por depositar su confianza en mí y por todo ese apoyo incondicional que hasta el momento me han brindado.

A Argenis Coa fuiste el que me enseñó a dar mis primeros pasos de mi vida a verla con humildad, responsabilidad pero sin preocupaciones, ese amor y pasión por la naturaleza y el trabajo quedaron plasmados en mi mente y en mi corazón aunque te hallas ido para mí siempre estarás presente en cualquier contacto que tenga con estas montañas de los Altos de Sucre.

A mis hermanos Magalys, Freddy, Danis y Alfredo siempre los tengo en mi mente y en mi corazón y me regocijo en tener una familia como ustedes gracias por su apoyo y paciencia.

A Yesenia Serra gracias por reforzar mis intenciones de seguir adelante en esta vida y valorar a mi familia como se lo merecen. Gracias por tu apoyo incondicional y por el amor, cariño y paciencia que me has ofrecido durante estos tiempos, que DIOS te guarde y siga cultivando ese amor tan especial que tú me ofreces.

A mis otros padres Hugo y a Rosilda la negrita gracias porque en ustedes siempre encontré ese apoyo moral y esa sabiduría que me brindaban con sus enseñanzas y consejos gracia a DIOS por haberme dado la oportunidad de escoger otros padres como ustedes los quiero mucho.

A la Universidad de Oriente por haberme dado la oportunidad de ser udistas y gozar del privilegio de salir de la casa más alta de estudio del oriente de donde nos formamos como profesionales así como de personas sociales. Y a todo el personal que labora en esta universidad.

A él postgrado de tecnología de alimentos de la Universidad de Oriente por darnos la oportunidad de desarrollar este proyecto en sus instalaciones y bajo su supervisión.

A la profesora Milena Amundaraín por brindarme su ayuda en este proyecto y siempre orientarme con sabiduría en las cosas que debía hacer, permitiéndome relacionarme más con la naturaleza que nos ofrece este mundo el cual necesita urgente que todos tomemos conciencia y le echemos una mano para evitar que se nos caiga a pedazos.

Al profesor Hernán Raven que siempre me brindo de sus conocimientos cuando los necesite, enseñándome a darle una visión a la vida desde un sentido práctico y sencillo.

A mi amiga Gladis técnico del laboratorio de sistemas dispersos, por abrirnos las puertas de esos espacios con amabilidad y siempre optimista con nuestro proyecto eres una especial persona y sobretodo muy buen amiga.

A Xiomara esa amiga que siempre entiende tal cual las circunstancias de mi vida diaria, me abriste las puertas de tu casa con confianza y eso te lo agradezco siempre estaré a tu orden para lo que sea xiomí.

A Yuli amiga gracias por este tiempo que compartimos juntos por tu apoyo brindado y compartir momentos especiales, cuando a veces tendía a desmayar siempre me distes ánimos para salir de esas situaciones que parecían tan complicadas, espero que la vida nos permita siempre estar juntos.

A Alfredo Toledo aunque en diferentes carreras siempre nos comunicamos nuestras flaquezas en el transcurrir de esta vida y la universidad, dándonos fuerzas el uno al otro para llegar a estos momentos finales para ambos en nuestras carreras.

A Deinor Larez siempre mi amiga de corazón gracias por siempre estar hay enseñándome los primeros pasos en la universidad aun cuando ni siquiera había iniciado mis estudios, motivándome a perseverar y esperar por esa oportunidad, eedddy! Simplemente se te quiere mucho.

**Muchas gracias a todos!**  
**Carlos Alfredo Coa García**

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se planteó el estudio de la biodegradabilidad a través de un proceso biológico anaeróbico, donde las muestras tratadas fueron los extractos de yuca amarga obtenidos del proceso de la elaboración artesanal del cazabe, donde se consideró como zona de estudio Zurita perteneciente al municipio Sucre del estado Sucre, en una hacienda sin ninguna denominación comercial, donde se observó una buena cosecha de esta gran materia prima como lo son los tubérculos de yuca empleados para tal fin. Se realizó un muestreo de los extractos de yuca que son considerados un contaminante debido a su alto contenido de cianuro, componente nocivo para la vida humana y animal, donde se almacenaron en recipientes identificados para luego ser trasladados al laboratorio de la Universidad de Oriente donde se le realizaron los análisis fisicoquímicos. Primeramente se caracterizaron los extractos evaluándose los niveles de sólidos, obteniendo los siguientes resultados: sólidos totales 42,82 g/L, sólidos disueltos 36,35g/L, sólidos suspendidos 6,36 g/L, sólidos volátiles 30,01g/L, sólidos sedimentables 13,5 g/L, pH 4,38, temperatura 26,00 °C, DQO (demanda química de oxígeno) 35.647,48 mgO<sub>2</sub>/L, acidez 32,5 mg CaCO<sub>3</sub>/L y cianuro (CN<sup>-</sup>) 28,45 ppm. Para el tratamiento de estos extractos se utilizó un reactor anaeróbico por carga considerando una relación 1:2 de extracto de yuca y excretas de bovino homogenizadas a través de una agitación magnética con un tiempo de operación de 66 días, y un volumen de biogás desplazado de 153 mL, donde se obtuvo un lodo floculento con un pH de 8,12 que sirvió de inóculo para la biodegradabilidad de los extractos de yuca. Finalmente se planteó como alternativa una medida de tratamiento a través de unos reactores anaeróbicos de menor capacidad en un recipiente de 250 mL donde se monitorearon variables de control en cuanto a pH y DQO en mgO<sub>2</sub>/L de manera natural, pero debido a que no fue exitoso porque se mantuvieron los niveles de pH se utilizó como base comercial NaOH para controlar el contenido de ácidos presentes hasta un pH de 8,11 y un porcentaje de remoción para los diferentes reactores de : 71,06%(reactor 1), 74,46% (reactor 2) y 79,24 % (reactor 3) entre los 5 y 20 días de operación, para una relación de inóculo/extracto 50/100 mL, la cual se plantea como la mejor relación estudiada. Mediante los resultados obtenidos en este trabajo se pudo observar, que esta técnica se puede implementar como un sistema de pre tratamiento (bajo este tipo de condiciones) para la mejora del sistema de tratamiento de efluentes de esta casabera artesanal, con el fin de disminuir el impacto negativo que esta provoca en medio ambiente que le rodea.



## CONTENIDO

RESOLUCIÓN .....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
CONTENIDO.....	xii
LISTA DE TABLAS .....	xv
LISTA DE FIGURAS .....	xvii
CAPITULO I .....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General .....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO II .....	4
2.1 Antecedentes.....	4
2.2 Generalidades de la yuca .....	5
2.3 Toxicidad de la yuca .....	6
2.4.2 Biodegradabilidad anaeróbica.....	8
2.4.3 Criterios para determinar la prueba de biodegradabilidad anaeróbica....	8
2.5 Inóculo.....	10
2.6 Biodigestión anaeróbica .....	11
2.6.1 Microbiología.....	11
2.7 Bioquímica.....	12
2.7.1 Etapa fermentativa .....	14
2.7.2 Etapa acidogénica.....	15
2.7.3 Etapa metanogénica .....	15
2.7.4 Variables de control en un proceso anaeróbico .....	17
2.7.4.1 Agitación.....	17
2.7.4.2 Temperatura .....	18
2.7.4.3 pH.....	19
2.7.4.4 Nutrientes .....	19
2.7.4.5 Tiempo de retención (TR).....	20
2.7.4.6 Producción de biogás .....	21

2.8	Ventajas del proceso de biodigestión .....	22
2.9	Tipos de Biodigestores Anaeróbicos .....	24
2.9.1	Digestores por lote .....	25
2.9.2	Tanques Sépticos .....	26
2.9.3	Biodigestores Rurales .....	27
2.9.4	Biodigestores de gran capacidad .....	28
2.9.5	Filtros anaeróbicos .....	29
CAPÍTULO III .....		32
3.1	Caracterización de los extractos de yuca amarga proveniente de la cazabera artesanal .....	32
3.2	Evaluación los niveles de cianuro presente en los extractos de yuca provenientes del proceso de la elaboración del cazabe .....	38
3.2.1	Preparación de la solución estándar para la calibración del electrodo selectivo de cianuro (CN <sup>-</sup> ) .....	38
3.2.2	Medición de cianuro en las muestra de extracto de yuca amarga .....	38
3.3	Preparación del inóculo en una relación de extractos de yuca y excretas de bovino .....	39
3.4	Caracterización del inóculo mediante un análisis de pH, sólidos totales, sólidos volátiles y DQO (Demanda química de oxígeno).....	40
3.5	Medición de las variables de control de proceso anaeróbico en una porción de extracto de yuca amarga para el proceso de la digestión anaeróbica .....	41
3.5.1	Arranque 1 (inóculo/extracto de yuca) .....	41
3.5.2	Arranque 2 (inóculo/extracto de yuca/NaOH) .....	42
3.6	Evaluación de la factibilidad del uso del reactor anaeróbico para la depuración de los extractos de yuca provenientes de la cazabera artesanal	42
3.6.1	Cálculos estadísticos .....	43
3.7	Equipo, materiales, sustancias y herramientas empleados .....	44
CAPITULO IV.....		46
•	Cantidad de extracto producido.....	46
4.1	Caracterización de los extractos de yuca amarga proveniente de la cazabera artesanal .....	47
4.2	Evaluación los niveles de cianuro presente en los extractos de yuca provenientes del proceso de la elaboración del cazabe .....	48

4.3 Preparación del inóculo en una relación de extractos de yuca y excretas de bovino .....	49
4.4 Caracterización del inóculo mediante un análisis de pH, sólidos totales, sólidos volátiles y DQO (Demanda química de oxígeno).....	51
4.5 Medición de las variables de control de proceso anaeróbico en una porción de extracto de yuca amarga para el proceso de la digestión anaeróbica .....	52
4.5.1 Medición de pH y contenido de cianuro. ....	52
4.6 Evaluación de la factibilidad del uso del reactor anaeróbico para la depuración de los extractos de yuca provenientes de la cazabera artesanal	58
4.7 Conclusiones .....	59
4.8 Recomendaciones .....	60
BIBLIOGRAFIA .....	62
ANEXOS .....	65
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO .....	84

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 tipos de inóculos de distintos orígenes (Moreno, 2003) .....	10
Tabla 2.2 Características de inóculos de distintos orígenes (Moreno, 2003) .....	11
Tabla 2.3 Producción de metano para diferentes tipos de material orgánico.....	23
Tabla 2.4 Composición del biogás. ....	23
Tabla 2.5 Producción de biogás para diferentes tipos de material orgánico. ....	24
Tabla 2.6 Equivalencia energética para 1 m <sup>3</sup> de biogás.....	25
Tabla 3.1 Ensayos para la caracterización de las aguas residuales de acuerdo con el Standard Methods. ....	32
Tabla 3.2 Relación de inóculo/extracto de yuca para la prueba de arranque1. ....	41
Tabla 3.3 Frecuencia de muestreo para la prueba de arranque 1 .....	42
Tabla 3.4 Frecuencia de muestreo para la prueba de arranque 2 .....	42
Tabla 4.1 Características de los extractos de yuca amarga.....	47
Tabla 4.2 Niveles de cianuros presentes en los extractos de yuca amarga recientes del proceso de elaboración del cazabe .....	49
Tabla 4.3 Caracterización del inóculo utilizado para la biodigestión anaeróbica ..	51
Tabla 4.4 Comportamiento del pH de los extractos de yuca amarga en agua de uso doméstico .....	52
Tabla 4.5 Niveles de cianuro presentes en los extractos de yuca amarga viejos obtenidos del proceso de elaboración del cazabe .....	53
Lista de tablas de los resultados de los análisis realizados a las muestras de inóculo y extractos de yuca .....	66
Tabla A.1 Variables medidas para el arranque 1 sin agregar el NaOH.....	67
Tabla A.2 Variables medidas para el arranque 2 con el NaOH en un tiempo de 8 días .....	68
Tabla A.3 Producción de biogás producto de la digestión anaeróbica usando los extractos de yuca amarga y las excretas de bovino.....	69
Tabla A.4 Variables medidas para el arranque 2 con el NaOH en un tiempo de 20 días .....	70
Tabla A.5 Valores de la media aritmética y desviación estándar de los parámetros de control en el primer arranque de los reactores anaeróbicos .....	71

Tabla A.6 Valores de la media aritmética y desviación estándar de los parámetros de control para el segundo arranque de los reactores anaeróbicos empleando una base comercial .....	72
Tabla A.7 Valores de la media aritmética y desviación estándar de los parámetros de control para el segundo arranque de los reactores anaeróbicos empleando una base comercial .....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema general de la planta artesanal de elaboración del cazabe...47	47
Figura 2.2 Curva de producción de biogás en la prueba de biodegradabilidad anaeróbica .....9	9
Figura 2.3 Secuencia simplificada de la biodigestion anaeróbica (Horta, 1986)... 14	14
Figura 2.4 Descripción de la fase metanogénica (Horta, 1986). .... 18	18
Figura 2.5 Digestor de lote (Horta, 1986)..... 26	26
Figura 2.6 Tanque séptico Imhoff (Horta, 1986)..... 27	27
Figura 2.7 Biodigestor rural tipo Hindu (Horta, 1986)..... 28	28
Figura 2.8 Esquema del proceso de contacto anaeróbico (Horta, 1986). .... 29	29
Figura 2.9 Filtro anaeróbico (Horta, 1986). .... 31	31
Figura 3.1 Curva de calibración de la demanda química de oxígeno..... 35	35
Figura 3.1. Reactor anaeróbico y dispositivo de medición de biogás utilizado .... 40	40
Figura 4.1 Producción de biogás con respecto al tiempo..... 50	50
Figura 4.2 Comportamiento de la demanda química de oxígeno con respecto al tiempo, para el primer arranque de los reactores anaeróbicos. .... 54	54
Figura 4.5 Comportamiento de la demanda química de oxígeno con respecto al tiempo de operación, empleando una base comercial (NaOH)..... 55	55
Figura 4.6 Comportamiento del pH con respecto al tiempo de operación usando una base comercial (NaOH)..... 57	57
Figura 4.3 Comportamiento de la demanda química de oxígeno con respecto a un tiempo de 20 días de operación empleando una base comercial (NaOH) ..... 57	57
Figura 4.4 Comportamiento del pH con respecto al tiempo de operación de 20 días, empleando una base comercial (NaOH) ..... 58	58
Figura B.1 Cultivos de Yuca Amarga de los altos de Sta. Fe, Edo .Sucre ..... 75	75
Figura B.2 Equipos artesanales utilizados en el procesamiento de la yuca..... 75	75
Figura B.4 presencia abundante de almidón en extracto de yuca amarga ..... 76	76
Figura B.5 Reactores anaeróbicos utilizados para la evaluación de los parámetros de control en la biodegradabilidad de los extractos de yuca amarga..... 77	77
Figura B.6 Vista frontal del termo reactor para el tiempo de reacción de la DQO. 77	77
Figura B.7 Vista frontal del Espectrofotómetro empleado para la medición de absorbancia..... 78	78

Figura B.8 Vista frontal del equipo para la medición de pH ..... 78

## **CAPITULO I INTRODUCCIÓN**

El Estado Sucre está ubicado en el extremo oriental de la costa caribeña. Son tan variados e importantes los ecosistemas existentes en esta región, que Sucre es uno de los estados venezolanos que cuenta con una gran extensión de tierra y diversidad agrícola. Este está situado casi en su mayor parte en la cordillera Oriental; en la parte norte se encuentra la doble península, que por el este es la península de Paria y por el oeste es la de Araya, dividiendo en sí las vertientes de los ríos, que desembocan en los golfos de Paria y Cariaco, respectivamente.

Las alturas principales de la cordillera Oriental, son las de Cerro Negro, Peonía, Majagual y Arrempuja, todas ellas a más de 1900 m; siendo su punto culminante el pico de Turimiquire con sus casi 2600 m. Es el principal productor pesquero del país, efectivamente, casi el 50% de la producción nacional le corresponde a este estado y suple el 95% de la materia prima a la industria elaboradoras de productos pesqueros, tales como sardinas, atún, jurel, lisa, mero, camarones, langostas, etc. En este estado se concentra casi la mitad de la flota pesquera y artesanal del país.

La agricultura no es muy importante, sin embargo es el principal productor de mapuey y aguacate del país, también es importante en la producción de ocumo, yuca, cacao, coco, café, ñame, cambur y caña de azúcar (baja producción). Uno de los productos típicos y tradicionales entre la gran gama que se ofrece, es el cazabe, el cual se elabora con la yuca amarga y en algunos casos yuca dulce, y se viene elaborando de manera artesanal desde hace mucho tiempo en esta y otras zonas del país.

En Venezuela, el cazabe es el producto alimenticio más importante elaborado a partir de la yuca y tradicionalmente ha formado parte de la dieta del venezolano. Se elabora principalmente en algunas comunidades campesinas de los estados Bolívar, Monagas, Anzoátegui, Sucre, Miranda, Guárico y Carabobo (Carrizales, 1997). El consumo de este producto es muy desigual en el país, alcanzando altos niveles en algunos estados, particularmente los de la región oriental, mientras que en otros se consume en bajas proporciones o no se consume (CONICIT, 1990).

Los métodos de preparación del cazabe son bastante similares en Venezuela, Guayana, Brasil, Colombia, Cuba, República Dominicana y otras islas del Caribe, y prácticamente los mismos han estado en uso en los últimos 500 a 700 años (Montaldo y Barrios, 1973). Los cambios que se han producido son en forma muy lenta a través del tiempo y algunos no han sido todavía incorporados para la mejora del sistema de procesamiento (Carrizales, 1997). En el estado Sucre se encuentran a lo largo de su extensión muchas cazaberías artesanales donde se producen grandes cantidades de cazabe y otros sub



productos como el almidón y el yare e incluso hasta picantes. La extracción de harina y almidón de yuca genera grandes volúmenes de subproductos sólidos y líquidos, generalmente llamados "residuos". Estos materiales deben ser valorizados para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia del proceso productivo y reducir la contaminación ambiental causada principalmente sobre los ríos y corrientes. Tradicionalmente, los residuos sólidos han sido arrojados directamente en los arroyos y ríos más cercanos a la planta de producción.

El residuo líquido (agua de lavado y extracto de yuca amarga producto del prensado) contiene una alta carga contaminante de materia orgánica (Demanda Química de Oxígeno - DQO y Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO) que causa un impacto negativo sobre el ambiente si es descargado directamente, haciendo esta agua menos adecuada para otros usos.

Es precisamente el objetivo de esta investigación verificar la biodegradabilidad anaeróbica de los extractos de yuca amarga con mira a que se implementen tecnologías para el mejoramiento de la calidad de estos extractos antes de ser dispuestos al ambiente.

### **1.1 Planteamiento del problema**

Actualmente existe una gran demanda de productos provenientes de la yuca, principalmente el cazabe, este producto se viene elaborando desde hace muchos años, tanto a nivel artesanal como a nivel industrial arrastrando consigo una serie de subproductos y de efluentes.

La actividad agroindustrial de la yuca se realiza en áreas de alta importancia ecológica, cerca de manantiales y cabeceras de ríos. Las actividades que se realizan de manera artesanal, la gran mayoría no disponen de instalaciones y/o proceso para el tratamiento de sus aguas residuales.

La Universidad de Oriente consciente de esta problemática incentiva a sus estudiantes de ingeniería química a plantear soluciones a este tipo de problemas, razón por la cual se requiere de investigaciones científicas, ya que en la actualidad se dispone de poca información técnica para el tratamiento de este tipo de efluentes, sobre todo que estas tienen un contenido importante de ácido cianhídrico.

La siguiente investigación se realizará a través de una evaluación de un digestor anaeróbico inoculado con excretas de ganado vacuno, diluidas en agua de yare; en el cual se controlan parámetros operacionales tales como: demanda química de oxígeno (DQO) de entrada y salida, pH, sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos volátiles, acidez y niveles de cianuro. Esta investigación aporta material científico para el desarrollo y ejecución de nuevas tecnologías, basado en el tratamiento de este tipo de extractos producto de las plantas artesanales para la elaboración de este gran producto alimenticio como lo es el cazabe.



### 1.2 Objetivos

#### 1.2.1 Objetivo General

Estudiar la biodegradabilidad de los extractos de yuca amarga provenientes de una cazabera artesanal mediante una digestión anaeróbica.

#### 1.2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar los extractos de yuca, obtenidos en el proceso de la elaboración del cazabe, determinando, la temperatura, pH, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, sólidos volátiles, sólidos sedimentables, DQO (demanda química de oxígeno), acidez.

2. Evaluar los niveles de cianuro presente en los extractos de yuca provenientes del proceso de la elaboración del cazabe.

3. Preparar el inóculo en una relación de extractos de yuca y excretas de bovino.

4. Caracterizar el inóculo mediante un análisis de pH, sólidos totales, sólidos volátiles y DQO (demanda química de oxígeno).

5. Medir las variables de control del proceso anaeróbico en una porción de extracto de yuca amarga para el proceso de la digestión anaeróbica.

6. Evaluar la factibilidad del uso del reactor anaeróbico para la depuración de los extractos de yuca provenientes de la cazabera artesanal.

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

Amundaraín (2002), estudió el efecto del uso de un biocida sobre los procesos de digestión anaeróbica, utilizando este biocida comercial en la inhibición de olores de baños portátiles. Su investigación consistió en la realización de bioensayos con varias concentraciones de biocida en el agua residual, alimentando un reactor anaeróbico con el agua residual de los baños con un contenido de 25 ppm de biocida. Después de 289 días de operación, se obtuvo un rendimiento de producción de biogás de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ CN biogás/ kg DQO}_{\text{rem}}$  y una remoción de DQO de 93 por ciento.

Rodríguez (1993), estudió la producción de biogás a partir de desechos líquidos de los procesos de la elaboración de cazabe, utilizó un biodigestor anaeróbico de flujo ascendente (UASB), la fase experimental constó de dos etapas; en la primera se estudió el comportamiento del digestor anaeróbico UASB con excretas de bovino diluidas, tanto en régimen estacionario como en régimen semi -continuo. Este último con tiempo de retención de 10, 20 y 30 días, en la segunda etapa se utilizó desechos de industria del cazabe (yare).

Los resultados obtenidos de la operación del digestor UASB en régimen semi-continuo con excretas de bovino alcanzaron porcentajes máximos de remoción de DQO del 44,62 % para TR de 10 días, y de sólidos volátiles de 55,32 % para el TR de 20 días, los valores máximos de productividad y rendimiento obtenidos correspondientes al TR de 10 días fueron de  $0,491 \text{ m}^3 \text{ biogás/m}^3 \cdot \text{día}$  y  $0,469 \text{ m}^3 \text{ biogás/kg DQO degradado}$ , respectivamente. Los intentos de tratar de estabilizar los procesos de digestión anaeróbica del yare fueron infructuosos, solo se dió la fase acidogénica presentando problemas de acidez. El porcentaje de DQO removido alcanzó un valor máximo de 27,18 %, aparentemente no hubo producción de metano.

Viñas et al (1992), estudiaron el tratamiento de efluentes de producción de levaduras (para la producción de levaduras se utilizaron melazas de azúcar y remolacha) en biodigestores simples anaeróbicos de flujo ascendente (UASB). Utilizó un reactor UASB simple, otro con reciclo y posteriormente la combinación de ambos reactores operando en serie. La carga máxima alcanzada que permite un funcionamiento seguro del reactor fue de  $10 \text{ Kg DQO/m}^3 \cdot \text{día}$  para un tiempo de retención hidráulica de 36 horas. La remoción de DQO está por el orden del 60%, para estas condiciones.

Cargas mayores provocan disminución en la eficiencia, ya que se producen alteraciones en el funcionamiento del reactor. Se verificó que el reactor con



reciclo soportó una carga máxima levemente superior. Concentración de ácidos volátiles del orden de 11000 mg/L no provocaron inhibición de las bacterias metanogénicas.

Núñez (1988), estudió el tratamiento anaeróbico de los desechos generados en el proceso de producción de cazabe, éstos están constituidos por conchas de yuca, material desechado en la operación de tamizado (capino) y líquido de prensa denominado comúnmente "yare". Estas investigaciones se realizaron en un digestor de 12 litros, con concentraciones de sólidos totales de 8,4 y 2%, obtenidas mezclando todos los residuos de la cazabera y diluyendo con agua. El inóculo utilizado se obtuvo de una planta de lodos activados.

### 2.2 Generalidades de la yuca

La yuca (*MANIHOT ESCULENTA*, CRANTZ), es considerada como una de las plantas más útiles de los países tropicales, sea en la alimentación humana o animal, o ya en la elaboración de almidón, alcohol y más aún en la elaboración de cervezas (Obregón, 1975). Desde tiempos remotos se especula sobre el llamado veneno de la yuca constituido al parecer por el HCN, el cual se haya posiblemente en todos los órganos de la planta.

Existen muchas opiniones acerca de la verdadera toxicidad de la yuca, aduciendo algunos que su contenido es muy pequeño y que se requerirían grandes ingestas para que la raíz u hojas resulten tóxicas. Por esta razón algunos investigadores han señalado la presencia de otros principios, además del HCN responsable de las intoxicaciones. Para la utilización racional de la planta y tubérculos de la yuca en la alimentación animal y/o humana, es necesario conocer las reacciones adversas que el contenido de ácido Cianhídrico pueda tener en la salud de los consumidores.

Las raíces de yuca con un contenido de HCN menor de 5 mg/100g de peso fresco, se consideran "dulces, mientras que aquellas con concentraciones de HCN entre 5-10 mg/100 g de peso se clasifican como de "toxicidad media" (Arismendi, 1976). Según Jones (1959), las raíces de yuca con un contenido de HCN mayor de 10 mg/100g de peso fresco, son muy tóxicas para ser utilizadas en forma conocida y sólo es conveniente su uso para la industria. El contenido de HCN en los clones de yuca varía principalmente con la región y con la edad de las plantas.

El riesgo de intoxicación cianogénica sólo es posible en la yuca mal procesada. Las enfermedades nutricionales detectadas en poblaciones tropicales consumidoras de yuca se deben a dietas no balanceadas y no a problemas de consumo de yuca (Medina, 1980). Un análisis practicado a seis cultivares de yuca, reportó que, en promedio, las hojas jóvenes tienen un contenido más alto de glucósidos cianogénicos 1,84g de HCN/kg de peso verde



que las hojas adultas 1,34 g de HCN / kg de peso verde. En el parénquima reservante las concentraciones más bajas de HCN, en la peridermis variaron entre 0,24 g de HCN/ kg de peso verde hasta valores indeterminados. La yuca contiene cantidades variables de glucósidos cianogénicos, linamarina y, en menor escala, lotaustralina. También contiene una enzima, linamarasa, capaz de hidrolizar a ambos glucósidos a glucosa y Cianohidrininas, y que rápidamente libera Cianuro libre. La velocidad de descomposición de las cianohidrininas a HCN y la cetona correspondiente depende de la temperatura y pH.

La linamarina cristalizada es amarga como la quina y, es probable que sea el compuesto responsable del sabor de la yuca. En ocasiones este sabor podría estar enmascarado con azúcares libres en concentraciones variables y presentan sabores “dulces amargos” independientemente de la concentración de glucósidos cianogénicos presentes. Algunos cultivares “dulces” contienen mas glucósidos cianogénicos que cultivares clasificados como “amargos”. Conociendo el factor genético, causante de las variaciones en el contenido de glucósidos Cianogénicos, podría lograrse la obtención de clones con niveles bajos de cianuro en el parénquima, órgano reservante de carbohidratos (Pereira, 1977).

### 2.3 Toxicidad de la yuca

El principal problema de la yuca como cultivo alimenticio es su toxicidad. La toxicidad de la yuca fue conocida desde muy temprano por los antiguos amerindios cultivadores de la planta, quienes inventaron varios métodos de procesamiento, incluyendo el secado al sol, lixiviación, seguida por secado, remojo en agua caliente con la subsiguiente extracción de almidón, o fermentación seguida por secado o tostado, para reducir la toxicidad y a la vez convertir un producto fresco altamente perecedero en un producto estable y mejorar la palatabilidad (Coursey, 1973). Si el procedimiento es realizado inadecuadamente, los consumidores está expuestos a altas ingesta de cianuro, lo cual puede causar desórdenes neurológicos (Cliff, 1986).

Todas las variedades de yuca y todas las partes de la planta son venenosas, excepto posiblemente las semillas (Dufour, 1989). Dentro de *Manihot esculenta* hay un amplio rango de niveles de cianuro entre los cultivares, desde unos pocos ppm hasta 1000 ppm. La concentración de los glucósidos cianogénicos se incrementa desde el centro del tubérculo hacia afuera y generalmente el HCN de la cáscara es sustancialmente más alto que el de la pulpa (Gondwe, 1974; citado por Lancaster, 1972).

La dosis letal de HCN es de 0,5-3,5 mg/kg de peso corporal. El consumo diario puede alcanzar 750 g correspondiendo a 30-35 mg de HCN, lo cual es



aproximadamente la mitad de la dosis letal cuando es tomada de una sola vez por un adulto de un peso promedio de 70 kg (Seigler, 1975). Como ya se dijo antes el cianuro en yuca puede ser considerado de dos tipos, cianuro combinado o enlazado (linamarina y lotaustralina) y cianuro libre, no glucósido (Cooke, 1978).

Los glucósidos cianogénicos por ser compuestos poco tóxicos, con una  $DL_{50}$  unas veinte veces menor que la aspirina, y su poca toxicidad en animales se debe a la predominancia de las rodanasas sobre la B-glucosidasas. En presencia de azufre la enzima rodanasa convierte al cianuro en tiocianato, el cual es poco tóxico y, en presencia de tiocianato la hemoglobina convierte el cianuro en cianato (Chung y Wood, 1971). Un efecto nocivo de la ingesta de cianuro es debido a su conversión a tiocianato cuando entra a la corriente sanguínea. El tiocianato es un compuesto azufrado, el principal metabolismo del cianuro, es excretado por la orina, es anti tiroideo, y bocio génico (Cliff, 1986).

De esta manera, el cianuro ejerce su acción tóxica al utilizar el azufre del organismo durante el proceso de destoxificación, incrementando así los requerimientos de aminoácidos esenciales azufrados o interfiriendo en el metabolismo tiroideo, promoviendo la aparición de bocio, enfermedad muy común en los países en desarrollo (Obidoa et al, 1991). Sin embargo el mismo autor refiere más adelante, que es muy difícil asegurar con precisión la contribución del cianuro a trastornos clínicos porque muchas de las evidencias son epidemiológicas o basadas sobre estudios de campo sin condiciones experimentales controladas.

Las fatalidades debidas a envenenamiento agudo producido por yuca, son raras, aunque no desconocidas. Potencialmente más graves son los efectos tóxicos producidos a largo plazo, entre ellos neuropatía ataxia (falta de coordinación neuro - muscular), bocio endémico, cretinismo y retardo mental (Doroznski, 1978).

El consumo prolongado de yuca con ingesta ocasional de proteínas, es mencionado también como causante de un desarrollo lento de neuropatía tropical, caracterizada por atrofia óptica, sordera y ataxia, debido a una complicación sensitiva de los nervios espinales (Ononogbu, 1978; citado por Obidoa, 1991). Otras manifestaciones patológicas incluyen dermatitis escrotal, estomatitis y glotitis (inflamación de la lengua).

Obidoa (1984), reportó lesiones citogénicas a niveles subcelulares, resultantes de dietas a base de yuca. Sin embargo, Ezeala y Okoro (1986), argumentaron que la incidencia de neuropatía atáxica tropical asociada con dietas a base de yuca bien procesada podría no ser debida a intoxicación por cianuro. Estos investigadores basaron sus argumentos en el hecho de que una gran proporción del HCN contenido en la yuca se pierde durante el



procesamiento. La intoxicación crónica con cianuro no se ha registrado en áreas asiáticas o latinoamericanas con altas ingestas de yuca; lo cual refuerza la hipótesis de que estas enfermedades son debidas a una compleja interacción de factores.

En América Latina los niveles de consumo de yuca son generalmente mucho más bajos que en África; el consumo diario per cápita entre algunas tribus del AMAZONAS es más de un kilogramo de yuca fresca, y aproximadamente tres litros de licor de yuca fermentada (cachiri). Los estudios realizados al respecto no han detectado la neuropatía atáxica, debido probablemente a que en las dietas de las mencionadas tribus están incluidas cantidades significativas de carnes y pescados (productos de la caza y de la pesca), lo que representa altos niveles de aminoácidos azufrados (Cock, 1990).

### **2.4.2 Biodegradabilidad anaeróbica**

Es un tipo de prueba que permite evaluar la susceptibilidad de un efluente a ser tratado por esta vía, así mismo se conocen las velocidades de reacción, tiempos de latencia, los posibles efectos inhibitorios y las máximas eficiencias de remoción esperadas durante el tratamiento del efluente (Moreno y Buitrón, 1997).

Existen factores que se deben cuidar para que exista la realización de las pruebas de biodegradabilidad anaeróbica, las cuales son principalmente las condiciones fisicoquímicas (pH, temperatura, concentración de nutrientes en el medio, etc.), la cantidad de sustrato que se desea degradar, y la cantidad de inóculo en la prueba. Los dos primeros factores pueden ser fácilmente controlados, pero la cantidad de inóculo es un factor que puede variar por su origen (Nyholm et al, 1984) lo que va a repercutir en la población de bacterias vivas (Thouand et al, 1995) y la adaptación de las bacterias al sustrato a degradar (Barkay y Pichard, 1988; Thouand y Block, 1993).

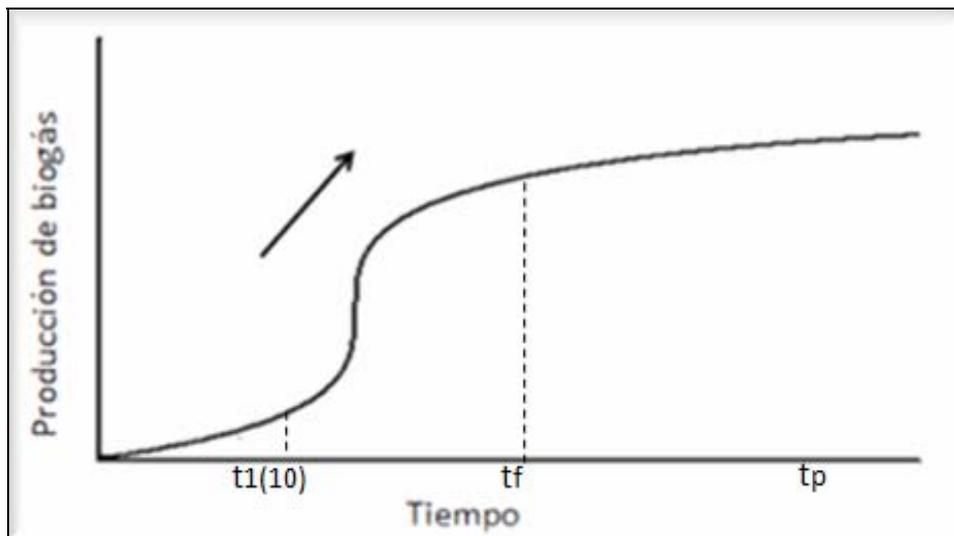
El número de células usadas en la prueba va a determinar las tasas de biodegradabilidad (SimpKins y Alexander, 1984), el tiempo de latencia (Chudoba et al, 1992) y la probabilidad de que la degradación de sustrato se realice en el tiempo de duración de la prueba (Thouand et al, 1995). Por lo cual es importante controlar la cantidad de células, en especial de organismos degradados que se van a adicionar a la prueba (Nyholm, 1991).

### **2.4.3 Criterios para determinar la prueba de biodegradabilidad anaeróbica**

Ya que las pruebas de biodegradabilidad deben tener un tiempo determinado se tienen los siguientes criterios para detener la prueba (figura 2.2): tiempo de 60



días tiempo máximo para llevar a cabo la degradación de un compuesto, degradación total del compuesto ( $t_f$ ) tiempo en el cual se llega a la fase estacionaria de la curva de producción de biogás, es decir la máxima producción tiempo de paro ( $t_p$ ): cuando la máxima producción no es el 100% y no se observa mas producción de biogás por lo que se decide detener la prueba,  $t_p = 1,5t_f$ .



**Figura 2.2 Curva de producción de biogás en la prueba de biodegradabilidad anaeróbica (Moreno,2002)**

Los resultados que se obtienen de una curva de producción de biogás en la prueba de biodegradabilidad anaeróbica son: a) tiempo de latencia  $Tl_{(10)}$  (degradación del 10 % del sustrato): es el tiempo para obtener el 10% de la degradación del sustrato probado y b) porcentaje de biodegradabilidad está dada por la Ec 2.1.

$$\% \text{ biodegradabilidad} = 100 * \left( \frac{CE}{CT} \right) \quad (\text{Ec 2.1})$$

Donde:

CE: es la cantidad de  $CH_4$  producida experimentalmente

CT: es la producción teórica de  $CH_4$

Los resultados se expresan como producción neta de metano (valores promedio), es decir restando la producción de metano en el blanco.



### 2.5 Inóculo

El origen del inóculo es uno de los factores más importantes que afectan la prueba de biodegradabilidad anaerobia, ya que de éste va a depender la cantidad, actividad y especies de microorganismos presentes en el mismo. Dentro de las estandarizaciones que se han propuesto no se ha tomado en cuenta las características que debe tener un inóculo para la realización de prueba de biodegradabilidad anaerobia. En el proceso de inoculación existen bacterias vivas y activadas, listas para ser sembradas o inoculadas en un nuevo medio que puede ir desde un caldo de cultivo hasta biorreactores y procesos de compostaje (Pacheco, 2003).

- **Tipos de inóculos**

En la tabla 2.1 se muestran inóculos de distintos orígenes e influentes

**Tabla 2.1 tipos de inóculos de distintos orígenes (Moreno, 2002)**

Inóculo	Influente
Planta de tratamiento anaerobia de la industria cervecera	Aguas residuales de la industria cervecera
Planta de tratamiento anaerobia de una industria química	Aguas residuales de la producción de ácido tereftálico
Planta de tratamiento anaerobia Municipal	Aguas residuales de una Universidad
Estiércol de vaca	-----
Planta de tratamiento de lodos activados municipales	Agua residual municipal

- **Características de un inóculo**

En la tabla 2.2 se muestran las características de inóculos de diversos orígenes, a través de los siguientes parámetros fisicoquímicos: sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos fijos (SSF), sólidos suspendidos volátiles (SSV), índice volumétrico de lodo (IVL), potencial oxidoreductor (ORP), velocidad de sedimentación (Vel. Sed.), actividad metanogénica y granulometría.



Tabla 2.2 Características de inóculos de distintos orígenes (Moreno, 2002)

	CERVECERA	IND. QUIMICA	MUNICIPAL	LODOS ACTIVADOS	ESTIERCOL DE VACA
SST (g/L)	12,12	23,15	121,8	3,8	28,4
SSF(g/L)	7,53	13,85	74,32	0,82	17,06
SSV(g/L)	4,59	8,9	47,48	2,98	11,34
IVL	82,51	43,23	13,95	98,4	---
Vel. Sed.(m/h)	8,77	1,019	0,76	11,4	---
Actividad metanogénica (g CH <sub>4</sub> /gSSV.d )	0,42	0,48	0,34	2,3	1,4
ORP	-312	-232,1	-258,7	-204,6	4,6
Granulometría (%)					
< 6 mm	20,32	20,47	33,2	4,7	---
>6 -< 42mm	11,37	21,33	22,3	12,45	---
>42-<149 mm	23,49	28,87	17,9	36,72	---
>149 mm	44,73	29,36	26,6	48,13	---

---- Parámetro no reportado

## 2.6 Biodigestión anaeróbica

La biodigestión anaeróbica de los residuos orgánicos es un proceso bioquímico que utiliza acción bacteriana para fraccionar compuestos complejos y producir gas combustible, ("biogás"), compuesto de metano y dióxido de carbono. El local donde se desenvuelven estas reacciones de descomposición es el digestor o biodigestor, pudiendo operar de modo continuo, o sea, siendo alimentado de materia orgánica durante el funcionamiento, simultáneamente a la retirada del producto descompuesto, o por carga donde es cargado apenas una vez, en el inicio del período de funcionamiento, siendo descargado cuando la producción de gas llegue a sus niveles más bajos (Horta, 1986).

### 2.6.1 Microbiología

Los principales microorganismos en los sistemas anaeróbicos son las bacterias. Hay un gran número de grupos de diferentes bacterias, y muchas especies dentro de cada grupo. Desde un punto de vista práctico no es necesario conocer las diferentes especies de bacterias, solamente los grupos generales, puesto que las especies más eficientes son las que predominan bajo ciertas



condiciones dadas. El mayor grupo de bacterias son las facultativas, que hidrolizan la materia orgánica suspendida a compuestos orgánicos solubles más simples. Con esto se inicia la degradación de la materia orgánica a varios compuestos intermedios tales como ácidos, aldehídos, cetonas y alcoholes. Estas bacterias han sido agrupadas conjuntamente como bacterias formadoras de ácidos.

Los compuestos orgánicos que tienen más de dos átomos de carbono son metabolizados por un grupo de bacterias llamadas acetogénicas, debido a que ellas forman ácido acético como producto principal e hidrógeno como producto secundario.

En un tercer grupo, las bacterias metanogénicas, son las responsables de la producción de metano, durante el proceso de biodigestión anaeróbica. Hay dos tipos de bacterias metanogénicas, las que utilizan hidrógeno para reducir el dióxido de carbono y producir metano, el otro tipo de bacterias metanogénicas desdobla ácido acético a metano y dióxido de carbono.

Las bacterias metanogénicas incluyen los siguientes géneros identificados hasta la fecha: *Metanococcus*, *Metanobacterium*, *Metanosarcina*, *Metanospirillum* y *Metanobacillus*; estas bacterias se clasifican entre los microorganismos más estrictamente anaeróbicos conocidos (concentraciones de oxígeno disuelto del orden de 0,001 ppm inhiben completamente su crecimiento), y se encuentran en forma natural en el rumen y en el conducto gastrointestinal del ganado bovino, en los lodos, sedimentos y suelos inundados, tanto de origen marino como de agua dulce y en los digestores anaeróbicos de procesamiento de residuos orgánicos (Stafford, 1986).

Si los desechos acuosos contienen considerable cantidad de sulfatos, las bacterias reductoras de sulfatos serían el cuarto mayor grupo de importancia en el sistema anaeróbico. Las bacterias reductoras de sulfatos son grupos necesarios que ayudan a crear condiciones adecuadas para la metanogénesis, pero cuando existe una alta concentración de sulfatos se presentan problemas en el sistema (Mc Kinney, 1985).

### 2.7 Bioquímica

Las bacterias metabolizan la materia orgánica, obteniendo energía para la síntesis de biomasa. La biomasa es similar para los grupos de bacterias señalados anteriormente, independientemente de los compuestos orgánicos inicialmente presentes, si los nutrientes adecuados están disponibles para la normal formación de protoplasma celular. Las bacterias tienen alrededor de 4,7 kcal/g de sólidos volátiles suspendidos (SVS) de biomasa. Las bacterias obtienen esta energía de la metabolización de los compuestos orgánicos. Al mismo tiempo deben obtener la energía necesaria para producir todos los



## Capítulo II. Marco Teórico

compuestos químicos que caracterizan la biomasa a partir del substrato. Las bacterias requieren alrededor de 2,3 kcal/g SSV para las reacciones energéticas. La energía para la biomasa y su síntesis proviene de los compuestos orgánicos presentes en los residuos acuosos (Mc Kinney,1985). Las reacciones bioquímicas llevadas a cabo durante la digestión anaeróbica para la formación de metano son esencialmente reacciones de oxidación – reducción, donde los compuestos orgánicos son oxidados, con la correspondiente remoción de hidrógeno. El dióxido de carbono, a su vez, es reducido dando lugar a la formación de metano. El hidrógeno producido puede ser reemplazado por alguno de los ácidos orgánicos o alcoholes como reductores directos del dióxido de carbono.

El mecanismo básico de las conversiones bioquímicas ocurridas durante la digestión anaeróbica de moléculas complejas, es el siguiente:



Los ácidos y alcoholes pueden ser oxidados directamente vía deshidrogenación:



Los microorganismos descritos anteriormente son los responsables de esta gran variedad de transformaciones bioquímicas (ver figura 2.3), que involucran el desdoblamiento de polímeros complejos, tales como celulosa, grasas y proteínas, en ácidos grasos de cadena larga y cortas que finalmente son convertidos en metano, dióxido de carbono y agua (Stafford,1986).

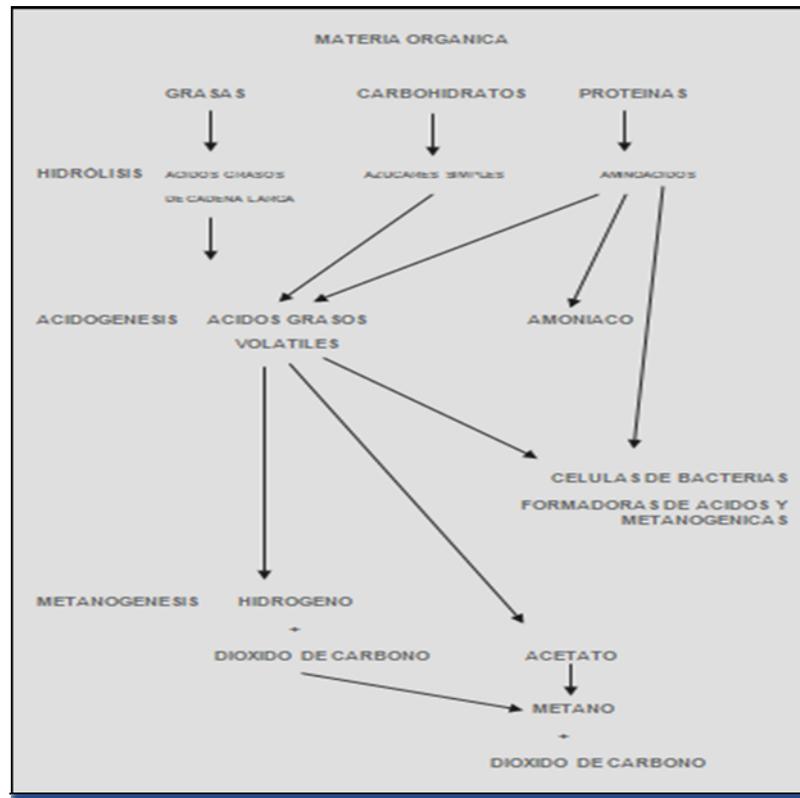


Figura 2.3 Secuencia simplificada de la biodigestión anaeróbica (Horta, 1986).

El proceso de biodigestión anaeróbica consta de tres etapas: fermentativa, acidogénica y metanogénica.

### 2.7.1 Etapa fermentativa

Un grupo amplio de microorganismos facultativos, principalmente bacterias celulolíticas actúan sobre los polímeros orgánicos u otros materiales complejos, desdoblándolos enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos sencillos. Estos compuestos experimentan a continuación procesos de fermentación ácida que originan diferentes productos intermedios, principalmente ácidos grasos de cadenas largas y cortas y, en menor proporción, dióxido de carbono e hidrógeno (Stafford, 1986).

Las bacterias productoras de ácidos deben primero hidrolizar los sólidos complejos suspendidos para obtener sustancias más pequeñas, o sea compuestos solubles que pueden moverse a través de la pared celular y ser metabolizadas. La celulosa y los almidones son hidrolizados a glucosa, fórmico y propiónico. La energía proviene de la ruptura de los enlaces carbono – carbono,



cambiando los enlaces de oxígeno e hidrogeno. Aproximadamente 0,32 kcal de energía es obtenida por las bacterias por cada gramo de glucosa metabolizada a estos tres compuestos ácidos. Puesto que la glucosa contiene 3,84 kcal/g de energía, se necesitaría tomar 1,22 g de glucosa para proporcionar la energía en 1,0 g de SSV de biomasa y 7,19 g de glucosa para proporcionar la energía para la síntesis de 1,0 g de SSV de biomasa, para un total de 3,41 g glucosa / g SSV biomasa ó 0,12 g SSV /g glucosa (Mc Kinney, 1985).

### 2.7.2 Etapa acidogénica

Actúan bacterias acidofílicas, las cuales a partir del ácido propiónico o de los ácidos de cadenas más largas, producen ácido acético junto con dióxido de carbono e hidrógeno. La estequiometría es la siguiente:



Las bacterias acetogénicas son más importantes que las productoras de ácidos. Estas bacterias seleccionan ácidos orgánicos, aldehídos cetonas y alcoholes que tengan más de tres átomos de carbono y los fraccionan para producir ácido acético e hidrógeno si los compuestos orgánicos tienen un número par de átomos y ácido acético, hidrógeno y ácido fórmico si los compuestos orgánicos tienen un número impar de átomos de carbonos. Esto muestra que los aminoácidos aminos y amidas, así como también los compuestos que poseen anillos aromáticos en su estructura, son metabolizados por diferentes especies de bacterias acetogénicas (Mc Kinney, 1985).

### 2.7.3 Etapa metanogénica

Un amplio grupo de bacterias estrictamente anaeróbicas actúan sobre los productos resultantes de las etapas anteriores y lo transformaron en metano y dióxido de carbono. La mayor parte del ( $\text{CH}_4$ ) producido proviene de la descarboxilación del ácido acético, Y el resto del ácido fórmico, metanol y ácido carbónico, únicos substratos sobre los cuales pueden actuar las bacterias metanogénicas de acuerdo con la reacción:





- **Las bacterias metanogénicas**

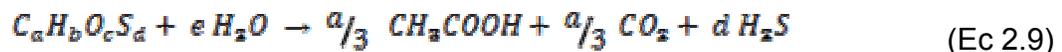
Son un grupo especial de bacterias que desdoblan al ácido acético y lo transforman en metano y dióxido de carbono. La energía producida por estas reacciones está alrededor de 0,20 kcal / g ácido acético metabolizado (ver figura 2.4). El ácido acético contiene alrededor de 3,46 kcal de energía / g. La biomasa necesita 1,36 g de ácido acético / g SSV de biomasa y 11,5 g de ácido acético / g SSV de biomasa para obtener energía, dando un total de 12,86 g de ácido acético por cada 1,0 g de SSV sintetizado a 0,08 g SSV / g de ácido acético.

Mc Carty (1968), estableció que el metabolismo de la glucosa proporciona un incremento mayor de sólidos suspendidos volátiles (SSV) que el metabolismo de los ácidos grasos. Sus investigaciones mostraron pequeñas diferencias entre ácidos grasos y aminoácidos o entre ácido acético y ácido butírico.

- **Las bacterias reductoras de sulfatos**

Son capaces de usar sulfatos como aceptores de electrones en las reacciones energéticas, produciendo sulfuros como principal producto final. Estas obtienen más energía de su metabolismo que las otras bacterias, dándole esta ventaja a las bacterias reductoras de sulfatos, desde el punto de vista energético. La desventaja de este tipo de bacterias es la producción de sulfuro de hidrógeno como el principal producto final (ver figura 2.4).

La ecuación general es:



El sulfuro de hidrógeno es un gas que tiene una solubilidad definida tanto en la fase líquida como en la fase gaseosa. En los sistemas anaeróbicos los gases metano y dióxido de carbono producidos contienen gran cantidad de sulfuro de hidrógeno.

En vista de que las bacterias reductoras de sulfuros y las bacterias metanogénicas necesitan compuestos orgánicos solubles para su metabolismo, ambos grupos son capaces de sobrevivir conjuntamente en la mayoría de los sistemas anaeróbicos. Para bajas concentraciones de sulfato, las bacterias reductoras de sulfatos son capaces de obtener suficiente materia orgánica para reducir completamente todo el sulfato a sulfuro.

Para altas concentraciones de sulfato, ambos grupos de bacterias crecen en proporción a su capacidad para metabolizar compuestos orgánicos específicos. Con ácido acético como sustrato, las bacterias metanogénicas tienen un sistema metabólico más simple que las reductoras de sulfatos. Las bacterias metanogénicas degradan fácilmente el ácido acético a metano y dióxido de



carbono. Las bacterias reductoras de sulfatos deben remover los electrones del ácido acético y transferirlos a los sulfatos en el interior de la célula, en tanto que adicionan agua y ácido acético.

Existen límites de complejidad en el metabolismo de las bacterias reductoras de sulfatos, aunque ellas tienen una ventaja energética. Cuando se usan productos orgánicos complejos, las bacterias metanogénicas deben compartir secuencialmente su metabolismo entre dos o más grupos. Mientras las bacterias reductoras de sulfatos son capaces de metabolizar completamente los compuestos orgánicos dentro de sus propias células. El resultado neto es que las bacterias reductoras de sulfatos son capaces de competir nuevamente, de una manera más eficiente, que las bacterias metanogénicas (Mc Kinney, 1985).

De todos los productos intermedios formados durante el proceso de biodigestión anaeróbica, los ácidos grasos juegan el papel más importante, previo a la formación del metano. De estos, es el ácido acético el que predomina en los sistemas perfectamente estabilizados encontrándose en una proporción cercana al 70% con respecto al total de los ácidos presentes. Es por esta razón que la acidez total de estos sistemas se expresa normalmente en forma de ácido acético (Stafford, 1986).

### **2.7.4 Variables de control en un proceso anaeróbico**

#### **2.7.4.1 Agitación**

La agitación del contenido del biodigestor es esencial para que el metabolismo alcance su máxima rapidez. Es esencial que las bacterias, los residuos orgánicos, las sustancias alcalinas, los nutrientes y las trazas metálicas sean mezclados al mismo tiempo para que las bacterias puedan realizar su metabolismo a la máxima velocidad, aunque la agitación excesiva no mejora la rapidez del metabolismo. La agitación de la mezcla en el digestor ayuda a establecer un mejor contacto entre las bacterias y el substrato, proporcionando además una temperatura interna más uniforme. Esta agitación puede hacerse por medios mecánicos o por recirculación de la mezcla (Mandujano et al, 1979).

El mínimo de agitación en un biodigestor anaeróbico es de 6 veces por tiempo de desplazamiento. Si un biodigestor tiene un tiempo de retención hidráulico de 1 día, el tiempo entre cada agitación del fluido no debe ser mayor de 4 horas. La agitación también es importante porque crea un equilibrio óptimo de gas-liquido para la remoción rápida del gas (Mc Kinney, 1985).

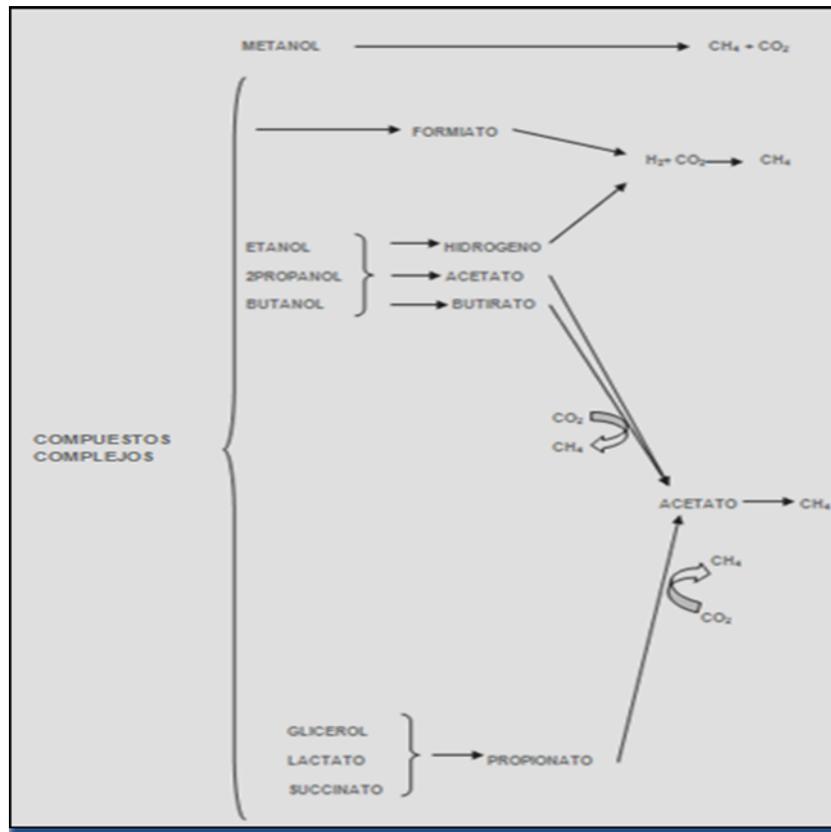


Figura 2.4 Descripción de la fase metanogénica (Horta, 1986).

#### 2.7.4.2 Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes que afectan los sistemas anaeróbicos. La biodigestión anaeróbica puede llevarse a cabo en un intervalo que va desde 15 hasta 60 °C. Las bacterias cuyo ciclo biológico se lleva a cabo entre 15 y 35 °C son llamadas mesofílicas, proliferando en forma óptima a 35 °C, y aquellas que cumplen su ciclo en temperaturas que van de 35 a 60 °C son llamadas termofílicas, encontrándose su temperatura óptima en 55 °C (Mandujano et al ,1979).

A pesar de que el proceso en el rango termofílico es más efectivo desde el punto de vista de producción de biogás y de mayor rendimiento de bioconversión, en la práctica ha tenido poca aceptación debido a que las bacterias termofílicas son más sensibles a cualquier cambio en las condiciones del proceso (Vallés et al ,1980). Es más conveniente trabajar con bacterias mesofílicas aunque son sumamente sensibles a cambios bruscos de temperatura. Debiéndose procurar una temperatura de operación de 30 a 35 °C



para lograr una buena eficiencia del proceso ya que la producción total de biogás aumenta al acercarse la temperatura óptima (Mandujano et al ,1979).

Es ampliamente conocido que las bacterias mesofílicas mueren cuando se eleva el rango termofílico. La destrucción de patógenos mesofílicos ha sido una de las razones para usar temperaturas termofílicas en la digestión de sedimentos, esto muestra que las bacterias termofílicas pueden no ser tan eficientes como las mesofílicas, en el metabolismo. La mayoría de los digestores anaeróbicos mesofílicos contienen algunas bacterias termofílicas, desde luego ellas pueden crecer a temperaturas más bajas. El aumento de la temperatura debido a la actividad digestiva de los sedimentos, de 37 a 55 °C, aniquilarían las bacterias mesofílicas, esto permite a las bacterias termofílicas metabolizar los compuestos orgánicos remanentes. La nueva población de bacterias termofílicas creció prontamente hasta alcanzar un nivel metabólico igual al que tienen las bacterias mesofílicas (Mc Kinney, 1985).

### 2.7.4.3 pH

Las bacterias metanogénicas aparentan ser bastante sensitivas al pH, retardando sus velocidades de metabolismo cuando el pH desciende a 6,2 ó menos. El pH será tóxico si este cae por debajo de 6,0 por un largo período de tiempo. Las bacterias metanogénicas operan normalmente entre valores de pH 6,5 a 8,0. Cuando el pH se eleva mucho, por encima de 8,0 los fosfatos y trazas metálicas se precipitan a un nivel mayor, lo que retarda el metabolismo.

La mayoría de las veces el pH es mantenido por la alcalinidad del bicarbonato. Es importante mantener suficiente alcalinidad en los sistemas anaeróbicos para prevenir los cambios de pH durante el tratamiento de los residuos orgánicos. La degradación de las proteínas normalmente forma bicarbonato de amonio alcalino. Las sales de los ácidos orgánicos se rompen para formar bicarbonato alcalino en proporción a la cantidad de sales ácidas. Los ácidos orgánicos libres no crean alcalinidad y deben ser neutralizados antes de ser añadidos al biodigestor, a menos que una adecuada alcalinidad esté disponible en éste.

Los compuestos orgánicos neutros crean grandes problemas para los sistemas anaeróbicos. Los compuestos neutros son metabolizados para formar ácidos orgánicos y ser neutralizados dentro del digestor tan rápido como se van formando (Mc Kinney,1985).

### 2.7.4.4 Nutrientes

La síntesis de biomasa bacteriana requiere nitrógeno y fósforo como nutrientes esenciales, en adición al carbono, para que los desechos orgánicos sean



estabilizados. La masa bacteriana de sólidos suspendidos volátiles (SSV) es esencialmente 50% Carbono, 11% Nitrógeno, 2% fósforo. El nitrógeno se obtiene normalmente de las sales de amonio y el fósforo de los fosfatos. El azufre es esencial para las bacterias anaeróbicas, como trazas metálicas.

Los residuos domésticos y las excretas de aves, porcinas y bovinas son ejemplos de materiales ricos en nitrógeno, que suministran nutrientes para el crecimiento y multiplicación de los microorganismos anaeróbicos. Por otra parte, materiales que son pobres en nitrógeno, tales como grasa verde, hojas de maíz, etc., son ricos en carbohidratos y son esenciales para la producción de biogás. Sin embargo, la excesiva disponibilidad de nitrógeno conduce a la formación de amoníaco el cual inhibe el posterior crecimiento de los microorganismos. Esta inhibición puede ser evitada disminuyendo la alimentación o también por dilución.

En la práctica es importante mantener la cantidad de nitrógeno en el rango de 20:1 a 30:1 y la relación de cantidad de nitrógeno en el rango de 120:1 a 150:1 para alcanzar una tasa óptima de crecimiento (Da Silva, 1979). La mayoría de las bacterias requieren sodio, potasio, calcio y magnesio, lo mismo metálicas, para un buen crecimiento. Un análisis de las bacterias metanogénicas, realizado por Scherer et al (1983), indicó 1,0% de azufre, 0,8% sodio, 0,0035% de molibdeno, 0,0035% cobalto. Estos elementos minerales son necesarios para un crecimiento celular óptimo y normalmente están presentes en los residuos empleados en la biodigestión anaeróbica.

### 2.7.4.5 Tiempo de retención (TR)

El tiempo que permanecen los sólidos volátiles en un digestor es una parte fundamental del proceso y representa el tiempo promedio que la materia orgánica es atacada por los microorganismos, el cual determina la fracción de biogás que se obtiene. En digestores que trabajan en régimen estacionario el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga y descarga del sistema. En un sistema de carga diaria (semi continuo), el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será necesario alimentar al digestor:

$$V_{\text{digestor}} (\text{m}^3 / \text{TR días}) = V_{\text{carga diaria}} \text{m}^3/\text{día} \quad (\text{Ec 2.10})$$

El tiempo de retención está íntimamente relacionado con la concentración de sólidos y la tasa de alimentación. Basta fijar dos de ellos para que el tercero quede perfectamente establecido, si se conoce el volumen de líquido dentro del digestor. Así, el tiempo de retención puede ser reducido, bien incrementando la tasa de alimentación, manteniendo la concentración de los sólidos constantes o bien por la disminución de la concentración de sólidos, manteniendo constante la



rata de alimentación. La producción de biogás por unidad de masa de sólidos volátiles se incrementa asintóticamente cuando se aumenta el tiempo de retención, esto es, a mayor tiempo de residencia, mayor producción de biogás, pero el incremento diario en la producción va disminuyendo poco a poco.

Tiempo de retención pequeños dan alta producción de biogás con un gran contenido de metano. Por otra parte a menor tiempo de residencia menor es la bioconversión del sustrato. Valores típicos del tiempo de retención para excretas de animales están comprendidos entre 15 y 20 días y para residuos vegetales entre 12 y 20 días (Cowley and Wase, 1981).

### 2.7.4.6 Producción de biogás

La producción de biogás en un biodigestor anaeróbico está relacionada directamente con la composición química de la materia orgánica metabolizable y la energía liberada de las reacciones bioquímicas. Los principales gases en un sistema anaeróbico son metano y dióxido de carbono. Hay también algo de hidrógeno y nitrógeno.

El metabolismo del ácido acético resulta en la conversión de aproximadamente un 90% de la DQO en  $\text{CH}_4$ . En condiciones normales (1 atm de presión y 0 °C) el volumen de metano producido será de 350 ml/g DQO metabolizado para energía. Puesto que el ácido acético debe ser previamente neutralizado para el biotratamiento, el dióxido de carbono será retenido como bicarbonato de sodio con sólo una pequeña fracción de  $\text{CO}_2$ . El resultado neto es que el pH se elevaría hasta 8,0 y el porcentaje de gas metano ( $\text{CH}_4$ ) en el biodigestor estaría por encima del 95%.

La glucosa se transforma en cantidades iguales de metano y dióxido de carbono, pero necesita mantener la alcalinidad en el biodigestor porque si no los ácidos destruirían el sistema, esto causa la retención del  $\text{CO}_2$  y el gas producido contiene más del 50 % de  $\text{CH}_4$  la mayoría de las veces, las características del gas producido se aproximan a las de los compuestos orgánicos biodegradables (Mc Kinney, 1985).

El seguimiento de la velocidad de producción de biogás; puede diagnosticar una situación irregular en el proceso y es quizás unas de las señales de problemas que se manifiestan mas prontamente, ya que está relacionada directamente con la actividad bioquímica de los microorganismos en el biodigestor.

En operación normal la producción de biogás es bastante estable, con una composición más o menos constante y un cambio en la misma o en la velocidad de producción puede significar que esté ocurriendo una situación de inhibición por sobrecarga tóxica o cualquier otra perturbación que influya negativamente en el proceso. Se debe disponer de sistemas sencillos que permitan medir el curso

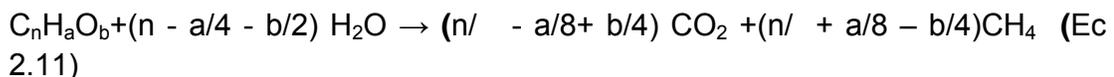


de estas dos variables, con la finalidad de controlar satisfactoriamente el proceso de biodigestión anaeróbica (Vallés et al ,1980).

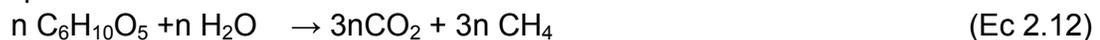
### 2.8 Ventajas del proceso de biodigestión

La biodigestión anaeróbica proporciona diversas ventajas, que se tornan más o menos interesantes desde cada punto de vista:

La producción de biogás, un gas compuesto aproximadamente por 60% de metano, gas combustible y 40% de dióxido de carbono, en la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos, es una de las ventajas más tangibles. Este ha sido el motivo principal del gran interés despertado por la biodigestión; y contra este beneficio es que se comparan los costos, siendo todas las otras ventajas como accesorias y secundarias. Como se ha citado, el biogás no es metano puro .Su composición y cantidad depende principalmente de los materiales añadidos al biodigestor, y pueden ser evaluados por la formula de Buswell:



Aplicando los valores de la celulosa tenemos:



Lo que lleva a concluir que, en términos teóricos, 1Kg de celulosa produce al máximo 0,415 m<sup>3</sup> de gas metano.

Aplicando la ecuación 2.11 de Buswell a otras clases de materiales orgánicos, se obtienen resultados como los mostrados en la Tabla 2.3 La mayoría de los residuos orgánicos están constituidos por una mezcla de estos tres elementos señalados en la Tabla 2.3, resultando una composición del gas como la presentada en la Tabla 2.4. La presencia de nitrógeno y oxígeno en el biogás por encima de sus contenidos normales, 3 y 1% respectivamente, probablemente indica que el sistema no está herméticamente sellado.

El hidrógeno es un producto normal de la etapa de formación de ácidos, además, como es empleado directamente por las bacterias metanogénicas, su concentración puede variar bastante. La formación de gas sulfídrico es gobernada por la concentración de compuestos sulfurados y por la actividad de las bacterias productoras de Sulfato (Horta, 1986).

Una ecuación entre otras, para calcular el metano producido fue presentada por Foree, tomando como base la destrucción del material estabilizado, a través de



## Capítulo II. Marco Teórico

la demanda química de oxígeno. El DQO representa el oxígeno necesario para que toda la materia orgánica sea químicamente oxidada, de forma total, así:

$$\text{DQO (mg)} = 2,86 * V_{\text{metano}} \text{ (mL a C.N de P y T)} \quad (\text{Ec 2.13})$$

Esta expresión debe ser utilizada con sumo cuidado por haber sido obtenida a partir de estudios sobre la digestión anaeróbica de aguas negras.

**Tabla 2.3 Producción de metano para diferentes tipos de material orgánico (Hobson, 1981).**

Material Orgánico	Volumen de gas (m <sup>3</sup> ) para 1 kg de materia seca.		% CH <sub>4</sub>
	Biogás	Metano	
Carbohidratos	0,75	0,37	50
Lípidos	1,44	1,04	72
Proteínas	0,98	0,48	50

**Tabla 2.4 Composición del biogás (Sodre, 1986).**

Gas	%
CH <sub>4</sub>	50-70
CO <sub>2</sub>	35-45
N <sub>2</sub>	0,5-3
H <sub>2</sub>	1-10
O <sub>2</sub>	0,1-1
H <sub>2</sub> S	0-1
H <sub>2</sub> O	Variable

Conforme se ha presentado, el volumen de biogás producido por unidad de peso de materia orgánica es variable, y depende de diversos factores como la temperatura, el tipo de digestor y, fundamentalmente del tipo de material orgánico empleado. En la Tabla 2.5 se representan valores de la producción de biogás para diferentes tipos de material orgánico.



El biogás producido puede ayudar a mantener la temperatura del digester dentro de los límites esperados. El poder calorífico del biogás obviamente depende de su contenido de metano y grado de humedad. El gas contiene grandes cantidades de vapor de agua, pues la digestión se da en un medio húmedo que se satura de vapor de agua el biogás producido (Horta, 1986). El poder calorífico del biogás saturado de agua (100% de humedad relativa), a 15 °C y 150 mm de H<sub>2</sub>O de presión puede ser relacionado con su contenido de metano por la ecuación:

$$\text{Poder calorífico} = 90,67 * \text{CH}_4 \text{ (Kcal /m}^3\text{)}. \quad (\text{Ec.2.14})$$

Un valor adoptado frecuentemente para el poder calorífico es 5500 Kcal/m<sup>3</sup>. Si el gas es deshumidificado, el poder calorífico aumenta, y si el dióxido de carbono es removido, haciendo burbujear el gas en solución alcalina, su valor se aproxima al correspondiente metano puro, 900 Kcal/m<sup>3</sup>. Cada metro cúbico de biogás equivale a una determinada cantidad de otro combustible, conforme se indica en la Tabla 2.6. En esta se puede observar que debido a su baja densidad, se necesitan grandes volúmenes de biogás para proporcionar la misma energía que algunos combustibles líquidos. Estos datos muestran que el biogás es un combustible de buenas características y siendo posible aislar a su principal constituyente, el metano se obtiene un combustible de gran valor.

**Tabla 2.5 Producción de biogás para diferentes tipos de material orgánico (Horta, 1986).**

Material orgánico	Biogás producido (m <sup>3</sup> /kg)
Estiércol de bovino	0,10- 0,31
Estiércol de aves	0,31- 0,62
Estiércol de porcino	0,37- 0,50
Residuos de vegetales	0,49 - 0,68
Residuos de mataderos	0,50 – 0,66

### 2.9 Tipos de Biodigestores Anaeróbicos

No existe un tipo ideal de biodigestor anaeróbico para cada situación. Hay realmente una gran variedad de ellos que deben ser conocidos y analizados, tanto en los aspectos de construcción como operacionales, para una aplicación específica.



### 2.9.1 Digestores por lote

En este tipo de Biodigestores la cantidad de material orgánico a ser digerido es colocado apenas una vez, el biodigestor es herméticamente sellado y dentro cierto tiempo se iniciará la producción de gas, la generación de gas prosigue hasta consumir toda la materia orgánica y el proceso termina. Los materiales orgánicos de origen animal, como estiércol bovino, contienen bacterias metanogénicas en números suficientes. Esto no se da en otros tipos de residuos, vegetales por ejemplo, siendo necesario inocularlos con estiércol de bovino para acelerar el inicio del proceso.

Normalmente consisten en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás, como muestra la figura 2.5, el material a ser dirigido se introduce en el digestor generalmente mezclado con agua. El gasómetro es colocado sobre el material con la llave inicialmente abierta para que todo el aire pueda salir. Cuando comienza la producción de gas, el gasómetro se eleva, indicando visualmente que el proceso se desarrolla normalmente.

**Tabla 2.6 Equivalencia energética para 1 m<sup>3</sup> de biogás (Horta, 1986).**

Combustible	Masa (Kg)	Volumen (L)
Carbón Vegetal	0,80	-
Leña	3,50	-
Aceite vegetal	-	-
Aceite diesel	-	0,55
Gasolina	-	0,61
Alcohol carburante	-	0,80
Querosén	-	0,62
GPL	1,43	0,74
Carbón mineral	0,74	
Pizarra	4,00	

La primera producción de gas no debe ser usada, ya que pueda contener aire en una porción explosiva. Una gran desventaja es la baja eficiencia y la pequeña producción de biogás. Son empleados básicamente como fuentes de inóculos para otros Biodigestores. Este tipo de digestor es aplicable en situaciones particulares como es la de materia orgánica que presentan problemas de manejo en un sistema continuo o cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente (Horta, 1986).



Otro ejemplo sería cuando el interés primordial es la obtención de fertilizante orgánico, el cual se requiere en épocas específicas del año, en este caso, las cargas se hacen al tener disponibles los desechos y la descarga una o dos veces por año, en época de la siembra (Mandujano et al, 1981).

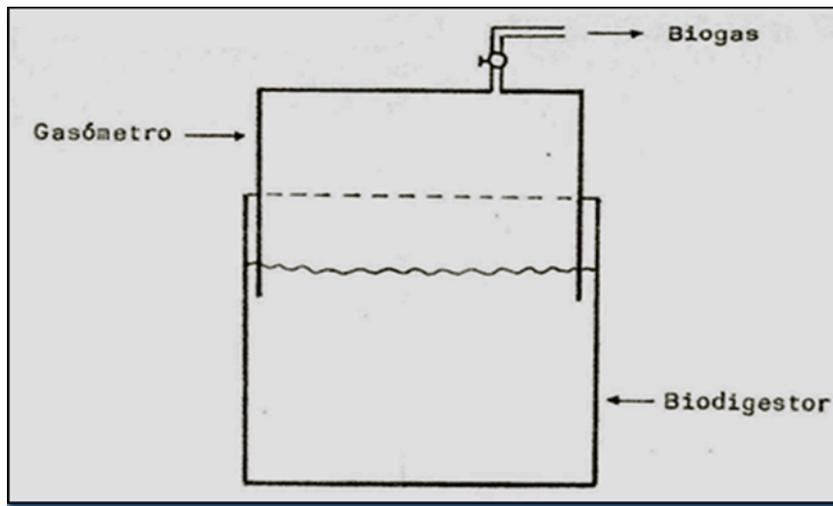


Figura 2.5 Digestor de lote (Horta, 1986).

### 2.9.2 Tanques Sépticos

Este tipo de biodigestor, cuya finalidad básica no es la producción de gas, sino la reducción casi total de los sólidos presentes en los efluentes domésticos, fue descubierto a inicios del siglo por Karl Imhoff. En éste, la alimentación y la descarga se realizan de manera continua, como se muestra en la figura 2.6. Una innovación hecha al Digestor Imhoff en la superposición de un decantador, en éste se precipitan las fracciones sólidas que pasan al digerir propiamente, donde se descomponen con la producción de gas y la reducción de los sólidos.

Es construido generalmente en concreto o en acero, con un tiempo medio de retención de 2 a 4 días, el biodigestor debe ser abierto cada 3 a 5 años, para retirar las fracciones no digeridas que se precipitan en el fondo. Eventualmente esta retirada se puede realizar de una manera continua, especialmente en modelos mayores. Sus desventajas más citadas son el elevado costo de fabricación y el largo tiempo de digestión de los sólidos (Horta, 1986).

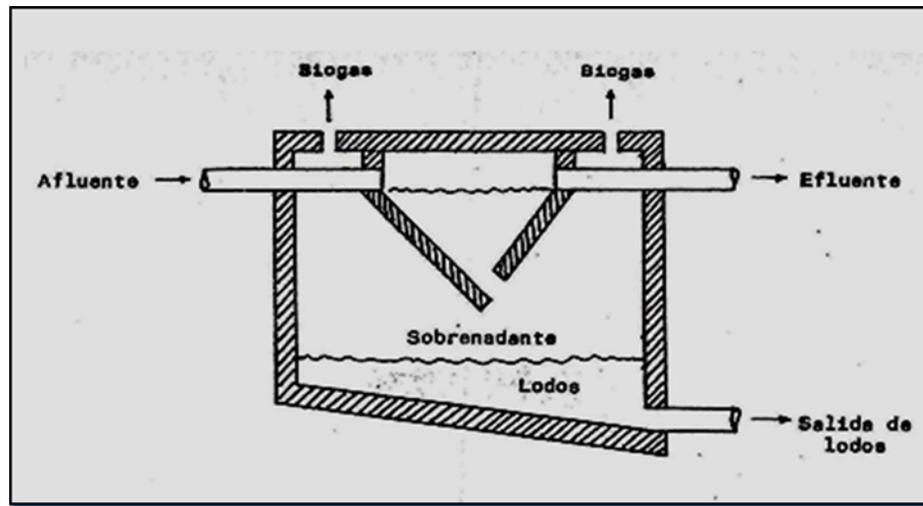


Figura 2.6 Tanque séptico Imhoff (Horta, 1986).

### 2.9.3 Biodigestores Rurales

Diversos Biodigestores pueden ser agrupados bajo este nombre, caracterizándose esencialmente por la simplicidad en la construcción y operación, proporcionando buena eficiencia a bajo costo. La alimentación y la retirada del material orgánico, estiércol animal en la mayoría de sus casos se efectúa de manera continua, por gravedad, sin necesidad de bombas. El término no impone una alimentación contante, más bien en intervalos regulares. Así, por ejemplo, el digestor puede ser cargado todos los días, o una vez al día. Simultáneamente, por la salida del biodigestor se retiraría un volumen igual de biofertilizante (Horta, 1986). Este es el tipo de Biodigestores mas usados en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños, para usos domésticos.

El modelo más popular de estos Biodigestores rurales es posiblemente el modelo Hindú, del cual existen varios diseños, pero en general son verticales y enterrados, semejando un pozo, como se ve en la figura 2.7. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación. El gasómetro está integrado al sistema, o sea que en la parte superior del pozo flota una campana donde se almacena el gas, balanceada por contrapesos, y de ésta sale el gas para su uso. El volumen del gasómetro es  $1/3$  del volumen de biogás generado al día.

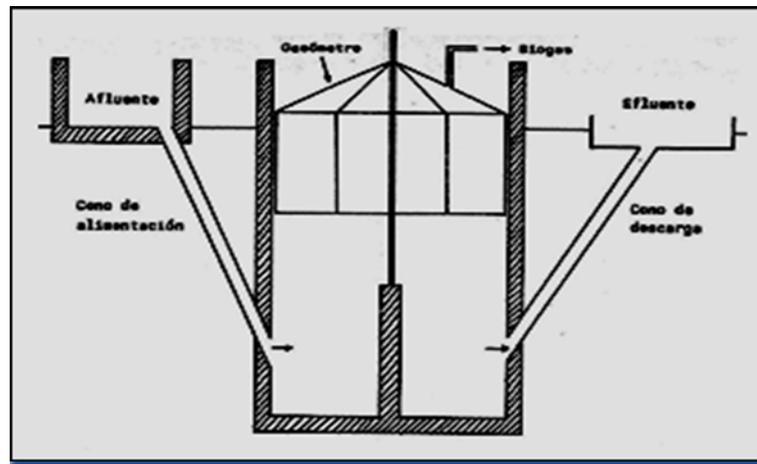


Figura 2.7 Biodigestor rural tipo Hindu (Horta, 1986).

La entrada de la carga diaria por gravedad hasta el fondo del pozo, además de producir agitación, provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos, lo que hacen fluir hasta una pileta para su aplicación como fertilizante. El digestor normalmente se construye de ladrillo y el gasómetro de acero, pero se pueden utilizar otros materiales. Una familia puede ser pulida de sus necesidades con un biodigestor de 6 metros cúbicos, alimentado con 100 kilogramo de estiércol por día, producido por 10 bovinos adultos, y genera 3 metros cúbicos de biogás por día. El gasómetro fluctuante debe ser capaz de almacenar de 50 al 100 por ciento de la producción diaria del biogás, el tiempo de retención varía entre 30 a 50 días.

#### 2.9.4 Biodigestores de gran capacidad

Sobre esta categoría se encuadran digestores de gran volumen; de régimen continuo, destinados a estaciones de tratamientos de influentes municipales o industriales. En estas situaciones la carga orgánica a ser biodigerida es generalmente elevada y la responsabilidad de operación es grande, debiendo existir un buen margen de seguridad. Su costo siempre es alto, lo que justifica un proyecto detallado y cuidadoso. Estos grandes digestores poseen siempre agitación y calefacción. A pesar que esto genera un alto costo operacional, se consigue reducir el tiempo de residencia para valores menores de 15 días.

Sus valores varían desde 500 a 4500 metros cúbicos. En estos digestores se genera una gran cantidad de biogás, el que a su vez se aprovechan en aplicaciones industriales. Una variante de estos digestores de gran capacidad es el de contacto anaeróbico, cuyo esquema se muestra en la figura 2.9. La diferencia consiste en que una parte del biofertilizante es retomada y mezclada



con el material orgánico a ser biodigerido. La idea es favorecer el crecimiento de la bacteria metanogénicas y, en consecuencia, aumentar la velocidad del proceso por lo que se disminuye el tiempo de residencia en el orden de un día y, a veces hasta 12 horas (Horta 1986).

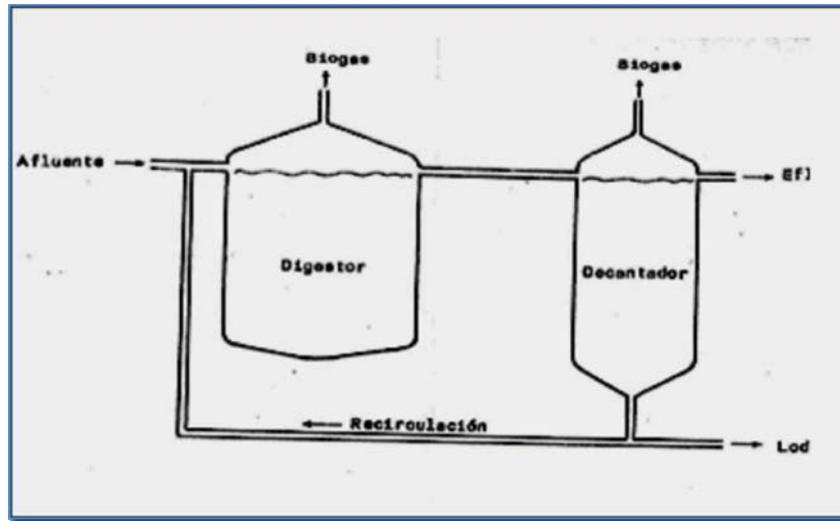


Figura 2.8 Esquema del proceso de contacto anaeróbico (Horta, 1986).

Esto muestra que las bacterias termófilas pueden no ser tan eficientes como los mesófilas, en el metabolismo. La mayoría de los digestores anaeróbicos mesófilas contendrán algunas bacterias termófilas, desde luego, ellas pueden crecer a temperaturas más bajas. El aumento de la temperatura debido a la actividad digestiva de los sedimentos de 37 a 55 °C, aniquilando las bacterias mesófilas. Esto permite a las bacterias termófilas metabolizar los compuestos orgánicos recientes. La nueva población de bacterias termófilas crecerá prontamente hasta alcanzar un nivel metabólico igual al que tienen las bacterias mesófilas, (Mc Kenny, 1985).

### 2.9.5 Filtros anaeróbicos

En los modelos de los biodigestores vistos hasta aquí, la población bacteriana es parcialmente retirada en cada salida de biofertilizante. Es un digestor con tiempo de residencia de 20 días, por ejemplo, un 20% del total de las bacterias es retirado todos los días, afectando su eficiencia. Los filtros anaeróbicos son biodigestores que evitan la salida de las bacterias, como se muestra en la figura 2.10. En este modelo; el biodigestor contiene material sólido como piedras, piezas plásticas, para retener las bacterias. Una película bacteriana



adherida a las partículas descompone el material orgánico del efluente más no sale con la retirada periódica del biofertilizante. Un problema serio es la deposición de fracciones sólidas del material a ser digeridos en el filtro lo que provoca su obstrucción (Horta, 1986).

Un desarrollo reciente de estos filtros anaeróbicos es el digester de flujo ascendente, UASB “Uoflow Anaerobic Sludge Blanket”; en el cual la alimentación es bombeada y distribuida a manera de suspensión, por el fondo del reactor. Las bacterias crecen en forma floculenta y se depositan en una especie de lecho, en la parte inferior del biodigestor. Los desechos acuosos son filtrados al ascender continuamente a través de estos sedimentos floculentos. Con esto se consigue reducir el tiempo de residencia, obteniéndose buenas eficiencias; sin embargo, existe una seria restricción: operan con biomasas fluidas y con contenidos de sólidos muy reducidos.

Durante el proceso de flujo ascendente las bacterias anaeróbicas digirieren el material orgánico presente en los desechos, generando una mezcla de metano y dióxido de carbono (biogás). El biogás producido por las bacterias en forma de pequeñas burbujas, que se mueven de manera ascendente es movido por separaciones de tres fases en el tope del reactor. Una zona libre de gas en la parte superior de los separadores, permite el ajuste de los sólidos dispersados en el fondo del reactor, mientras los efluentes clarificados salen por el tope (Maat and Habts, 1986).

Las experiencias con reactores UASB demuestran una clara y factible aplicación tecnológica en el tratamiento anaeróbico de desechos acuosos para diferentes tipos de industrias y aún parte algún tipo de desechos cloacales municipales. Su potencial no está limitado por la temperatura (15- 40 °C) o por cargas orgánicas (20 – 0 kg DQO/m<sup>3</sup> \* día).

Los sólidos suspendidos pueden ser tolerados en un cierto grado, dependiendo de su nivel de concentración. La eficiencia de remoción de la DQO es alta, alrededor de 60 a 80%. El reactor UASB es económico y goza de muchas ventajas técnicas: ocupa menos espacio y produce menos sedimentos que algún otro sistema de tratamiento de desechos acuosos. También, el biogás producido tiene un gran potencial para una ganancia neta de energía (Maat and Habts, 1986).

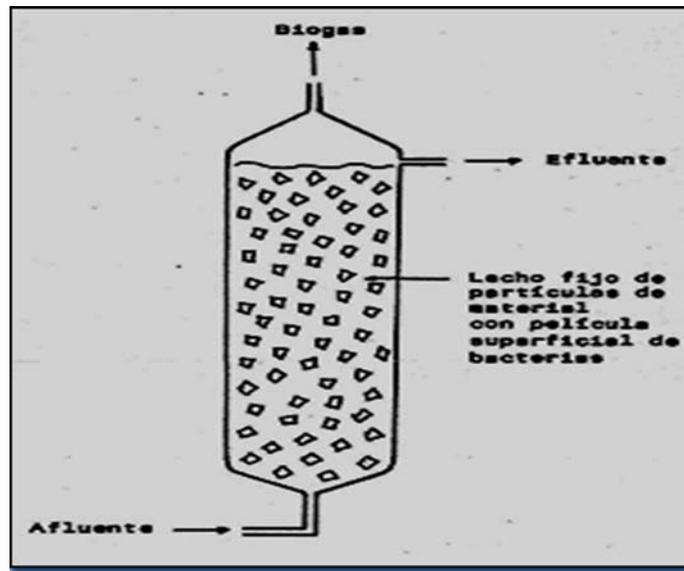


Figura 2.9 Filtro anaeróbico (Horta, 1986).

## CAPÍTULO III

### DESARROLLO DEL PROYECTO

En el desarrollo de este proyecto se realizaron muestreos de campo, ensayos y análisis experimentales, con lo cual se empleó la información obtenida para estudio de factibilidad de la biodegradabilidad anaeróbica de los extractos de yuca. Se contó con el apoyo de las instalaciones del laboratorio de tecnología de los alimentos, laboratorio de hidrocarburos y sistemas dispersos, así como el laboratorio de estudios ambientales de la Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui para el desarrollo de la investigación.

#### 3.1 Caracterización de los extractos de yuca amarga proveniente de la cazabera artesanal

Para la obtención de la muestra del extracto de la yuca amarga, se realizó una visita a la planta artesanal durante el tiempo de operación de la misma, se extrajo una cantidad representativa de varias muestras de “yare” en diferentes días, las cuales fueron refrigeradas y almacenadas en el laboratorio de sistemas dispersos de la Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui.

**Tabla 3.1 Ensayos para la caracterización de las aguas residuales de acuerdo con el Standard Methods.**

Ensayo	Método
Temperatura	2550 B
pH	423
Acidez	402
Sólidos Totales	2540-B
Sólidos Volátiles	2540- E
Sólidos Disueltos	2540- C
Sólidos Suspendidos	2540- D
Sólidos Sedimentables	2540- F
DQO	508- C

Con el propósito de conocer la carga contaminante que representan las corrientes de estos extractos líquidos (yare) que genera la planta cazabera artesanal se realizaron los análisis mostrados en la tabla 3.1, Estos análisis se llevaron a cabo empleando los procedimientos establecidos en el Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater.



### ➤ **Medición de temperatura**

Este parámetro se controló para verificar los cambios de temperaturas alcanzados durante el proceso se utilizó el método 2550 B del Standard Methods. Empleando un termómetro de mercurio ambiental de una escala de 150 °C. El cual se introdujo directamente en la muestra a analizar, se esperó su estabilización y se observaron los valores de temperatura a la cual se encuentre la muestra.

### ➤ **Medición de pH**

Esta fue el principal parámetro a controlar, el cual se estudió con especial interés debido a su influencia en la estabilidad y desarrollo de la digestión, este se controló añadiendo una solución de NaOH al 3%. Para medir el pH se utilizó un medidor de pH Multíparamétrico marca termo modelo Orión 5 Star. Se le determinó a los extractos de yuca provenientes de la cazabera artesanal y a él inóculo en todas las etapas del proceso, registrándose y comparándose con los resultados obtenidos en diferentes experiencias realizadas durante este trabajo.

### ➤ **Medición de acidez**

Se utilizó el método 402 del Standard Methods. Se analizaron muestras de 25 ml, cada una durante todas las etapas del proceso y en todos los digestores mediante el método 402 del Métodos Standard 1985 para la cual se utilizaron soluciones estandarizadas de NaOH 0,1N; 0,02 N; 0,5 N; 0,001 N y mediciones de pH hasta alcanzar el valor de pH de 8,3 los resultados se expresaron en CaCO<sub>3</sub>/L pH 8,3.

Para obtener el valor de la acidez se empleó la ecuación 3.1:

$$\text{Acidez (mg CaCO}_3\text{/L)} = \frac{F \times B \times C}{A} \quad (\text{Ec 3.1})$$

Donde:

F: factor = 50.000,00

A: volumen de muestra en (mL)

B: volumen de NaOH (mL)

C: normalidad de la solución de NaOH

Ejemplo de la acidez del extracto de yuca amarga obtenido del proceso de elaboración del cazabe

A= 50 mL



B = 1 mL

C = 0,10

F = 50.000,0

$$\text{Acidez (mg CaCO}_3\text{/L)} = \frac{50000 \times 1 \times 0,01}{50} = 10 \text{ mgCaCO}_3\text{/L}$$

#### ➤ Demanda química de oxígeno

La DQO es uno de los parámetros indicadores de la calidad del agua el cual depende de la cantidad de material orgánico que esta contenga tales como los sólidos disueltos y suspendidos, por lo cual este parámetro depende de la eliminación o remoción de estos últimos, para tratar de eliminar la mayor cantidad de materia orgánica contenida en los extractos se hizo un pre tratamiento el cual consistió en dejar en reposo la muestra de los extractos y luego se retiraron los sólidos sedimentables que en su mayoría eran restos de almidón provenientes de la unidad de prensado.

Se utilizó el método 508 C Standard Methods 1985 reflujo cerrado, método calorimétrico, en la que se utilizaron soluciones de dicromato de potasio 0,25 N y una solución de 167 mL de ácido sulfúrico concentrado, 33,3 g de sulfato de plata como catalizador, 0,20 g de sulfato de mercurio en cristales y los resultados se expresaron en mg/L.

Para obtener el valor de DQO mgO<sub>2</sub>/L se empleó la ecuación 3.2 ejemplo:

En muestra diluida

$$\text{DQO (mg O}_2\text{/L)} = \text{Valor de la curva de calibración} \times f \quad (\text{Ec 3.2})$$

Donde:

f : factor de dilución

f: volumen de dilución / volumen de muestra

DQO en el extracto, dilución 1 mL de muestra en 100 mL de de agua destilada

Lectura de la absorbancia = 0,192

Lectura de la curva de calibración (ver figura 3.1) = 478,22 mgO<sub>2</sub>/L

Sustituyendo:

$$\text{DQO del extracto de yuca (mgO}_2\text{/L)} = 478,22 \times 100 = 47.822,0 \text{ mgO}_2\text{/L}$$

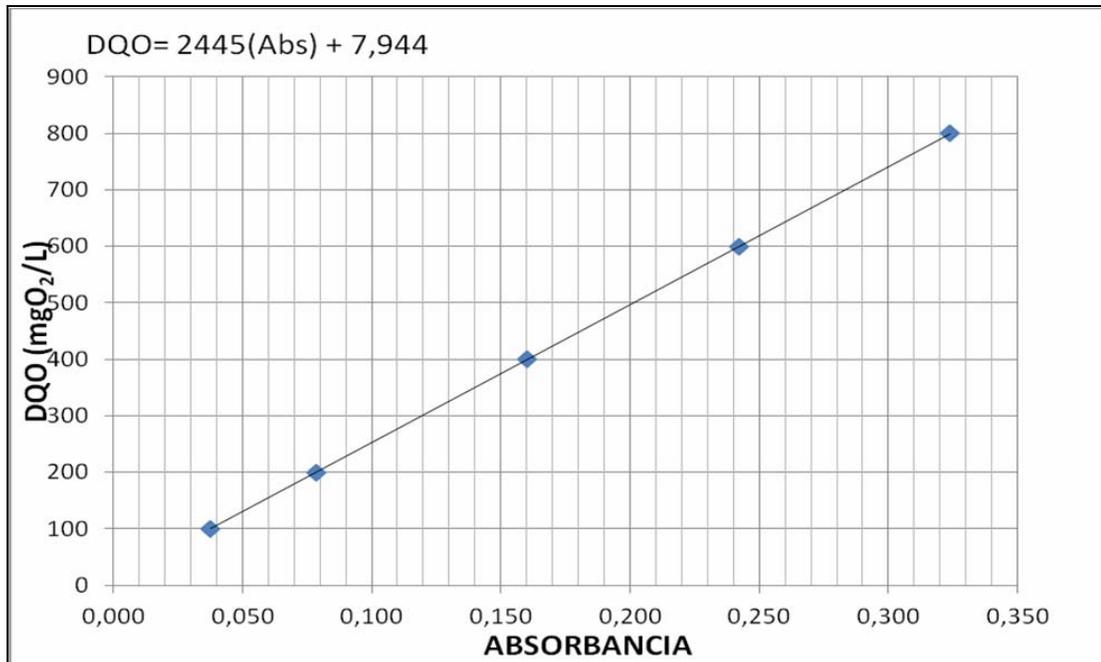


Figura 3.1 Curva de calibración de la demanda química de oxígeno

➤ **Sólidos totales**

Se empleó el método 2540 B del Standard Methods, donde se evaporó una muestra correctamente mezclada en una placa pesada y secada a peso constante en un horno a 103 – 105 °C. El aumento en el peso de la placa vacía representaron los sólidos totales.

Para obtener el valor de los sólidos totales se empleó la ecuación 3.3

$$\text{Sólidos totales } \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right) = \frac{(A-B)}{V} \times 1000 \quad (\text{Ec 3.3})$$

Donde:

A: gramos de residuo seco a 105 °C + peso de capsula vacía

B: peso de capsula vacía

V: volumen de muestra en (mL)

Sustituyendo:



$$\text{Sólidos totales } \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right) = \frac{(28,2143 - 27,5881)}{10} \times 1000 = 35,62 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

➤ **Sólidos totales disueltos**

Se empleó el método 2540C del Standard Methods. Donde se filtraron muestras bien mezcladas por un filtro estándar de fibra de vidrio; posteriormente el filtrado se evaporó hasta que se secaron en una placa pesada y secada a peso constante a 180 °C. El aumento del peso de la placa representaron los sólidos totales.

Para obtener el valor de los sólidos totales disueltos se empleó la Ec 3.4:

$$\text{Sólidos disueltos } \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right) = \frac{(A-B)}{V} \times 1000 \quad (\text{Ec 3.4})$$

Donde:

A: gramos de residuo seco filtrado + peso de capsula vacía.

B: peso de capsula vacía

V: volumen de muestra (mL)

Sustituyendo:

$$\text{Sólidos disueltos } \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right) = \frac{29,6195 - 29,2785}{10} \times 1000 = 34,1 \text{ g/L}$$

➤ **Sólidos suspendidos totales**

Se empleó el método 2540 D del Standard Methods, se tomó una muestra bien mezclada filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio estandarizado y calibrado, el residuo en el filtro se secaron con un peso constante a 103-105 °C. El aumento del peso del filtro representaron la totalidad de los sólidos suspendidos.

Para obtener el valor de los sólidos totales disueltos se empleo la ecuación 3.5

$$\text{Sólidos suspendidos} = ST - SD \quad (\text{Ec 3.5})$$

Donde:

ST: sólidos totales g/L



SD: sólidos disueltos g/L

Sustituyendo:

$$ST \text{ (g/L)} = (21,96 - 19,71) \text{ g/L} = 2,25 \text{ g/L}$$

#### ➤ **Sólidos fijos y volátiles**

Los residuos obtenidos con los métodos explicados en los métodos anteriores expuestos para la determinación de sólidos, se incineraron a peso constante, a una temperatura  $550 \pm 50$  °C, los sólidos remanentes representaron los sólidos totales fijos disueltos o en suspensión, mientras que la pérdida de peso por ignición representaron los sólidos volátiles.

Para obtener el valor de los sólidos fijos se empleó la ecuación 3.6:

$$\text{Sólidos fijos } \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right) = \frac{(A-B)}{V} \times 1000 \quad (\text{Ec 3.6})$$

Donde:

A: gramos de residuo seco luego de calcinar la muestra a 500 °C

B: gramos de capsula vacía

V: volumen de muestra (mL)

Sustituyendo:

$$\text{Sólidos fijos } \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right) = \frac{(116,3439 - 113,7789)}{100} \times 1000 = 2,565 \text{ g/L}$$

Luego se empleó la ecuación 3.7 para obtener los sólidos suspendidos volátiles

$$\text{Sólidos Suspendidos volátiles} = ST - SF \quad (\text{Ec 3.7})$$

Donde:

ST: sólidos totales (g/L)

SF: sólidos fijos (g/L)

Sustituyendo:



**Sólidos suspendidos volátiles (g/L) = (40,03 - 2,565) g/L = 37,465 g/L**

### ➤ **Sólidos sedimentables**

Se empleó el método 2540 F del Standard Methods. Se llenó un cilindro graduado hasta la marca de referencia con una muestra bien mezclada, se dejó sedimentar durante 45 minutos, removiendo suavemente las paredes del cono con una varilla o mediante rotación, se mantuvo en reposo 15 minutos más y se registró el volumen de sólidos sedimentados del cilindro como milímetros/L.

### **3.2 Evaluación los niveles de cianuro presente en los extractos de yuca provenientes del proceso de la elaboración del cazabe**

Teniendo en consideración la alta concentración de microorganismos y de componentes cianogénicos presentes en los extractos, se aplicó el Standard Method 412-E, del electrodo selectivo de ión  $\text{CN}^-$  en combinación con el electrodo de referencia de doble unión y un medidor de pH teniendo una escala de milivoltios expandidos con un medidor de ión selectivo. Para la determinación de la cantidad de cianuro (como  $\text{CN}^-$ ), se aplicaron las pautas siguientes:

#### **3.2.1 Preparación de la solución estándar para la calibración del electrodo selectivo de cianuro ( $\text{CN}^-$ )**

- Se calentó agua destilada durante dos horas en proporciones de 1200 a 1500 mL.
- Se pesaron 1,6 g de NaOH, para preparar una solución al 0,04 N con el agua destilada hervida, y mediante un sistema de agitación magnético se homogenizó con la finalidad de disolver todo el NaOH granulado.
- En un matraz aforado de 1L de capacidad se preparó la solución estándar, con 10 mL KCN concentrado y se enrazó con la solución de NaOH al 0,04 N.

Con esta solución se estimó una lectura de  $10\mu\text{m CN}^-/\text{mL}$  para el electrodo selectivo de cianuro.

#### **3.2.2 Medición de cianuro en las muestra de extracto de yuca amarga**



## Capítulo III. Desarrollo del Proyecto

- Se tomó una porción del extracto almacenado (aproximadamente 200 mL) y una tomada recientemente, para retirar la cantidad de almidón presente, a través de una filtración.
- Se distribuyeron en 4 muestras de 100mL cada una para realizar la medición de 2 muestras nuevas y 2 muestras almacenadas.
- Una vez calibrado el electrodo selectivo de cianuro (CN<sup>-</sup>), se procedió a medir la cantidad de ión cianuro presente en las muestras.

### 3.3 Preparación del inóculo en una relación de extractos de yuca y excretas de bovino

Para que la biodigestión se llevara a cabo con las condiciones óptimas de arranque debido a que es un proceso difícil de iniciar y de alcanzar, se preparó una relación de extractos de yuca y excretas. Las excretas de bovino frescas se diluyeron directamente con los extractos líquidos de la yuca amarga en una relación de 1 Kg de excretas por cada 2 L de extracto de yuca amarga, y no como se había realizado en investigaciones anteriores similares, donde se usó la misma relación de 1 Kg de excretas pero con 2 L de agua corriente, las cuales fueron pasadas por un tamiz para eliminar el material grueso.

La mezcla en relación de extracto y excretas, fue colocada en un recipiente de vidrio de 5L de capacidad, el cual contaba con un dispositivo de agitación magnética y sellado herméticamente con un tapón con conexiones para mangueras, del cual se le adaptó una columna graduada, que contenía una solución salina saturada de NaCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado al 98% (ver figura 3.1), para medir la cantidad de biogás producido por desplazamiento durante el proceso de biodigestión. La producción de biogás fue registrada durante todo el período de la biodigestión (ver tabla A.3 del anexo A), el cual sirvió para corroborar que el proceso se llevaba a cabo. El inóculo producido se utilizó posteriormente para el arranque de los reactores anaeróbicos para las pruebas de biodigestión.

A través de la Ec 3.8 se determinó el volumen de biogás producido en el proceso de biodigestión anaeróbica:

$$\text{Volumen de biogás producido (mL)} = V_{\text{ref}} - V_{\text{bd}} \quad (\text{Ec 3.8})$$

Donde:

$V_{\text{ref}}$ : volumen de referencia (mL)



Vbd: volumen de biogás desplazado (mL)

Sustituyendo los valores de la tabla A.3:

$$\text{Volumen de biogás producido (mL)} = 197 - 191 = 6 \text{ mL}$$



**Figura 3.1. Reactor anaeróbico y dispositivo de medición de biogás utilizado**

### **3.4 Caracterización del inóculo mediante un análisis de pH, sólidos totales, sólidos volátiles y DQO (Demanda química de oxígeno)**

Se tomó una muestra de 500 mL de la cual se le realizaron mediciones de:

- pH
- Sólidos totales
- Sólidos volátiles
- DQO

Para todas estas pruebas se aplicó el Standard Methods correspondiente a la tabla 3.1.



### 3.5 Medición de las variables de control de proceso anaeróbico en una porción de extracto de yuca amarga para el proceso de la digestión anaeróbica

Se instalaron tres reactores con características semejantes para obtener la repetitividad de los análisis, a los cuales se le agregó una porción similar de inóculo y posteriormente el extracto de yare, luego se sellaron para dar inicio al proceso de biodigestión.

La prueba de biodigestión se llevó a cabo en dos arranques los cuales se detallan a continuación:

#### 3.5.1 Arranque 1 (inóculo/extracto de yuca)

Para el primer arranque del proceso de biodigestión, se procedió a preparar la relación de la mezcla inóculo/extracto, de la manera siguiente.

- Se colocaron diferentes proporciones de inóculo/extracto (yare), en los reactores cerrados herméticamente y con agitación magnética. Ver tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Relación de inóculo/extracto de yuca para la prueba de arranque1.**

Muestra	Inóculo	Extracto
Reactor 1	50 mL	100 mL
Reactor 2	50 mL	80 mL
Reactor 3	50 mL	75 mL

- Se midieron los parámetros de pH, DQO, temperatura, sólidos totales y sólidos suspendidos volátiles, previo al proceso de biodigestión, luego se sellaron herméticamente los reactores para dar inicio al proceso.
- Se tomaron muestras de 5 mL en intervalos de 3 días para realizar los análisis correspondientes. Ver tabla 3.3.



**Tabla 3.3 Frecuencia de muestreo para la prueba de arranque 1**

Muestra	Intervalo de muestreo	Alícuota de muestreo	Tiempo de prueba
Reactor 1	Cada 3 días	5 mL	12 días
Reactor 2			
Reactor 3			

### 3.5.2 Arranque 2 (inóculo/extracto de yuca/NaOH)

Para el segundo arranque se verificó el proceso de biodigestión, aplicando un agente de control de la reacción (base comercial NaOH), para regular el pH.

- Se tomaron tres muestras de extracto de 100 mL previamente filtradas.
- A las muestras de extracto se le regulo el pH hasta aproximadamente 7, titulándolas con una solución de NaOH al 3%  $m/v$ .
- Una vez regulado el pH de las muestras se agregó 75mL de inóculo en cada una y se cerraron herméticamente y se le aplico agitación magnética.
- Se tomaron muestras de 5 mL en intervalos de 5 días para realizar los análisis correspondientes. Ver tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Frecuencia de muestreo para la prueba de arranque 2**

Muestra	Intervalo de muestro	Alícuota de muestreo	Tiempo de prueba
Reactor 1	Cada 5 días	5 mL	20 días
Reactor 2			
Reactor 3			

### 3.6 Evaluación de la factibilidad del uso del reactor anaeróbico para la depuración de los extractos de yuca provenientes de la cazabera artesanal

Esta parte del proyecto se dispone a analizar las técnicas y equipos empleados para los tratamientos de los extractos de la yuca amarga. A continuación se presenta la expresión matemática que permite determinar la media aritmética y desviación estándar del pH y DQO  $mgO_2/L$  mostrados por el primer arranque de los reactores anaeróbicos expuestos en la tabla 4.7:



- **Media aritmética** ( $\bar{X}$ ): es la sumatoria de todos los datos obtenidos entre el número total de mediciones. Se expresa como (Cermeño, 2000):

$$\bar{X} = \sum \frac{X_i}{n} \quad (\text{Ec 3.8})$$

- **Desviación estándar:** mide en cuanto se alejan los datos con respecto a la media. Se expresa como (Cermeño, 2000):

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{Ec 3.9})$$

#### 3.6.1 Cálculos estadísticos

Sustituyendo los valores del pH de la tabla 4.12 y usando las ecuaciones 3.8 y 3.9 se obtiene lo siguiente:

$$\bar{X} = \left( \frac{6,3 + 7,02 + 8,08 + 8,11}{4} \right)$$

$$\bar{X} = 7,3775$$

$(x - \bar{X})$	$(x - \bar{X})^2$
$6,3 - 7,3775 = -1,078$	1,162
$7,02 - 7,3775 = -0,358$	0,128
$8,08 - 7,3775 = 0,703$	0,494
$8,11 - 7,3775 = 0,733$	0,537

$$\sum (x - \bar{X}) = 2,321$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (2,321)}{4-1}} = 0,88$$



De igual forma se realizaron los cálculos para cada uno de los parámetros en estudio y los resultados se presentan en las tablas A.5, A.6 y A.7.

### 3.7 Equipo, materiales, sustancias y herramientas empleados

#### a) Equipos

- Electrodo indicador de pH Multiparamétrico.  
Marca: Termo, modelo: Orión 5 Star.
- Horno  
Marca: Memmer.
- Balanza Analítica Marca: Cole – Palmer, modelo: Symmetry.
- Bomba de vacío, marca: Gast
- Mufla, marca: Vulcan Box furnace with Automatic Controls.  
modelo: A-130 9493300.
- Electrodo indicador de pH, marca: Oaklon, modelo: waterproof.
- Centrifugadora de aire.
- Refrigerador.  
Marca: Electro lux.
- Balanza Analítica.  
Marca: Denver Instrument Company. Modelo: AA – 200.
- Agitador magnético.

#### b) Materiales

- Vasos precipitados de 10 y 50 mL.
- Buretas de 10 y 50 mL.
- Goteros de plástico.
- Cápsulas de porcelana.
- Erlenmeyer de 50 y 100 mL.
- Papel de filtro.
- Pinzas metálicas.
- Guantes.
- Tapones de goma.
- Embudos de vidrio.
- Soporte universal.
- Tubos de ensayo con tapa.
- Ganchos.



- Gradillas metálicas y de plástico.
- Envases de vidrio de 1,0 a 5,0 litros.
- Mangueras de plástico.
- Magnetos.

### c) Sustancia

- Excretas de bovino vacuno.
- Agua destilada.
- Extractos de yuca amarga.
- Solución Estándar de pH 10,00 +/- 0.01 a 25 Celsius, marca: singles, modelo: 35653 – 03.
- Solución Estándar de pH 4,01 +/- 0.01 a 25 Celsius, marca: singles, modelo: 35653 -01.
- Ferroína.
- Dicromato de Potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ).
- Solución de ( $Ag_2SO_4$ ).
- Cianuro de potasio (KCN).
- Hidróxido de Sodio (NaOH).

Los equipos materiales y sustancias utilizados durante este trabajo se encuentran el departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui.

## CAPITULO IV

# DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta planta opera de manera discontinua o por cargas, a la cual entran alrededor de unos 1000 kg de yuca la cual se lavó, empleándose una cantidad de agua de aproximadamente 400L con el fin de retirar residuos de arena y tierra, esta se le retiró la concha, a través del pelado de la yuca y luego pasó a una etapa de rallado con rallos de metal en forma cilíndrica acoplados a un motor eléctrico. Este producto rallado se llevó a unas prensas llamadas sebucanes los cuales prensaron este producto hasta retirar en casi su totalidad el líquido asociado a el rallado, obteniéndose, un extracto rico en ácidos grasos volátiles, como en ácido cianhídrico y una alta cantidad de sólidos, los cuales representa un compuesto conocido como “yare”.

Una vez prensada la yuca rallada, se recogieron directamente del proceso las muestras que se utilizaron para el desarrollo de los experimentos de esta investigación, luego se envasaron en unos recipientes y se trasladaron a las instalaciones de la Universidad de Oriente donde se procedió a su pronta caracterización y almacenamiento; luego de haberse retirado la mayor cantidad de extracto posible, se paso el rayado prensado por un tamiz para luego pasar por el proceso de cocción y secado en los hornos donde se calientan a unos 900 °C, liberándose la mayoría de los residuos de yare y agua asociada. Cabe destacar que este proceso requiere de dos días para la obtención del cazabe como producto final, ya que la etapa de cocción se realiza el siguiente día con el fin de permitir la mayor liberación de agua y extracto por evaporación así como la volatilización de los ácidos grasos volátiles y la pronta degradación del ion cianuro así como el acido cianhídrico. Ver figura 2.1.

- **Cantidad de extracto producido**

Tomando en cuenta que la corriente a estudiar es solo la del extracto que sale de la unidad de presando la cantidad de agua que pudiera arrastrarse hasta la unidad de lavado, es despreciable debido a que en el proceso de lavado solo queda apenas una pequeña película de agua que es la que recubre la yuca, por lo cual se puede considerar que todo el líquido que sale de esta unidad es extracto de yuca (yare) y el agua asociada a la composición fisicoquímica original de la misma; con un estimado de carga de yuca amarga que entra al proceso de 1000 kg, se obtienen unos 200 L de extracto.

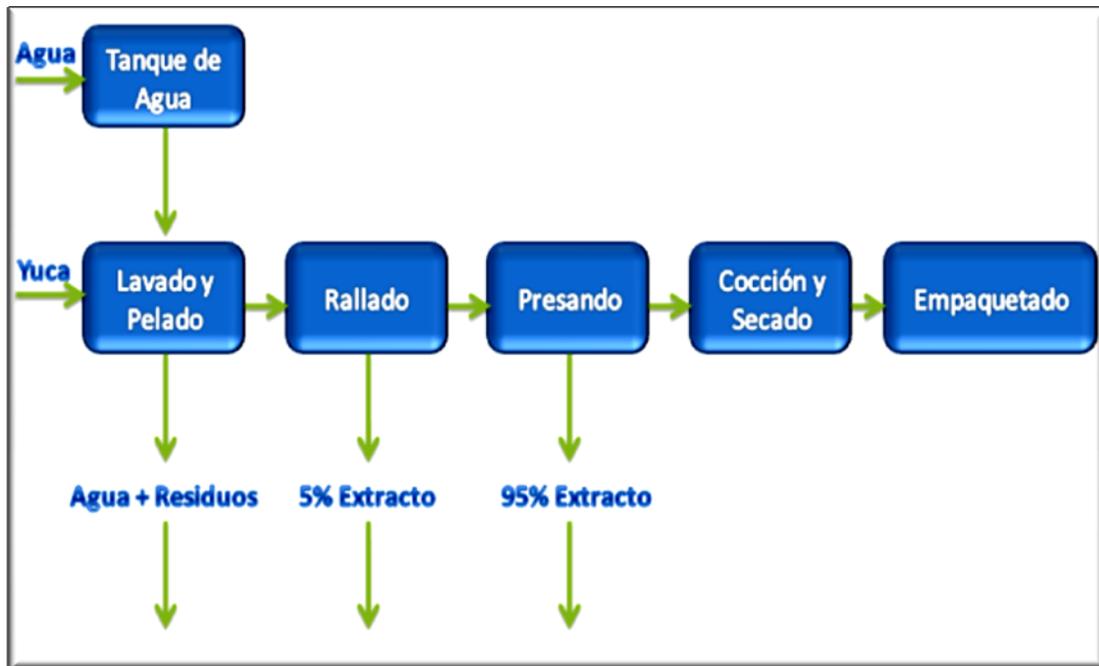


Figura 4.1 Esquema general de la planta artesanal de elaboración del cazabe.

#### 4.1 Caracterización de los extractos de yuca amarga proveniente de la cazabera artesanal

En la tabla 4.1 se muestra las características fisicoquímicas de los cuatro (4) extractos de yuca utilizados en la biodigestión anaeróbica. Como vemos, posee en promedio un alto contenido de sólidos totales (42,817 g/L), sólidos disueltos (36,353 g/L), sólidos suspendidos (6,355 g/L) y sólidos suspendidos volátiles (30,009 g/L), por lo que podría considerarse como un sustrato adecuado para la biodigestión anaeróbica con la finalidad de producir biogás, ya que los sólidos volátiles son los transformables en metano mediante este proceso.

Los altos valores promedio de sólidos sedimentables (14 mL/100mL) también son indicativos de la problemática de la carga orgánica que poseen estos extractos, razón por la cual debe considerarse una remoción primaria de estas sustancias.

En cuanto al pH se obtuvo un valor promedio de 4,38 y la acidez promedio fue de 32,5 mg CaCO<sub>3</sub>/L, en estudio realizado por Ciarfella (1992) obtuvo valores promedios de 6,5; cabe destacar que esta medición se realizó en campo mientras que la de esta investigación se obtuvo en el laboratorio, después de 24 horas de haber sido colectada la muestra, cuando ya la muestra ha sufrido un proceso deteriorativo como consecuencia de la presencia natural de la microflora



## Capítulo IV. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

láctica, la cual es capaz de transformar el azúcar (glucosa) residual disponible en ácido láctico en menos de 20 horas, tal como fue observado por Ciarfella (1992).

**Tabla 4.1 Características de los extractos de yuca amarga**

Parámetros fisicoquímicos	Fecha				Media aritmética
	10/10/2009	20/11/2009	30/11/2009	12/02/2010	
T (°C)	25	27	26	26	26,00±1,41
ST (g/L)	40,03	66,46	21,96	-----	42,82±28,08
SD (g/L)	34,03	55,32	19,71	-----	36,35±22,86
SS (g/L)	5,68	11,134	2,25	-----	6,35±5,63
SSV (g/L)	37,466	42,36	10,2	-----	30,01±20,11
Sólidos sedimentables mL/100mL	13	14	14	13	13,50±0,79
pH	4,15	4,75	4,5	4,1	4,38±0,44
Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	10	20	40	60	32,50±26,28
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	47.822,00	47.096,00	28.911,90	18.760,00	35.647,48±17.377,33

Temperatura (T), Sólidos Totales (ST), Sólidos Disueltos (SD), Sólidos Suspendidos (SS), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Química de Oxígeno (DQO).

----- Parámetro no realizado

La demanda química de oxígeno del yare fue de 35.747,00 mgO<sub>2</sub>/L, lo que indica que el yare es una sustancia que contiene una alta carga orgánica contaminante disuelta, que no debe ser vertida al medio ambiente sin ser sometida a tratamiento previo. Este valor es alto comparado con otros efluentes agroindustriales como los provenientes de la industria de almidón 17.150,00 mgO<sub>2</sub>/L y de la industria de papel 76.000,00 mgO<sub>2</sub>/L (Blakebrough, 1967).

### 4.2 Evaluación los niveles de cianuro presente en los extractos de yuca provenientes del proceso de la elaboración del cazabe

El ácido cianhídrico (HCN) es el principal responsable de la toxicidad de las raíces de yuca. El estudio de sus propiedades organolépticas lo describen como un ácido con un olor fuerte a almendras amargas que no todas las personas pueden detectar, Está comprobado que la capacidad de detectarlos, está en un gen recesivo asociado al cromosoma X femenino y su límite de detección de olor es muy cercano a la concentración donde comienza a hacer tóxico. El cianuro



## Capítulo IV. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

puede ingresar al cuerpo por inhalación, ingestión y absorción a través de los ojos y la piel; es potencialmente letal, ya que puede inhibir el complejo citocromo oxidasa, bloqueando la cadena transportadora de electrones, sistema central del proceso de respiración celular.

En la tabla 4.2 se muestran los niveles de cianuro presentes en los extractos de yuca al inicio del proceso. El promedio de HCN fue de 28,45 ppm, menor al reportado por Silva (1993) de 33,9 ppm. La diferencia en estos valores pueden ser consecuencia a los tiempos de cosecha en las zonas rurales objeto de estudio, a las diferentes condiciones climáticas, al tipo de suelo y a la variedad de yuca utilizada en el proceso.

**Tabla 4.2 Niveles de cianuros presentes en los extractos de yuca amarga recientes del proceso de elaboración del cazabe**

Muestra	Volumen de muestra (mL)	Contenido de CN <sup>-</sup> en los extractos (mg/L)
Extractos de yuca (nuevos)	100	29,7
		27,2
Media aritmética		28,45 ± 1,77

La cantidad de cianuro presente en estas aguas es muy elevado comparado con el máximo permitido decretado por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (M.P.P.A), el cual ha establecido un valor de 0,2 ppm a descargar en cuerpos de agua, lo que muestra el alto riesgo que significa la presencia de este desecho en el medio ambiente natural.

### 4.3 Preparación del inóculo en una relación de extractos de yuca y excretas de bovino

La preparación del inóculo se realizó de una manera innovadora, al mezclar a la digestión las excretas de bovino con los extractos de yuca amarga en una relación de 1 kg de excretas por cada 2 L de extracto de yuca amarga, y no como se había realizado en investigaciones anteriores similares, donde se usó la misma relación de 1 kg de excretas pero con 2 L de agua corriente para la obtención del inóculo y luego se procedía a incorporar la sustancia a tratar en el biodigestor (Rodríguez, 1993). El uso del extracto en lugar de agua se realizó con el objetivo de que las bacterias se aclimaten al yare.

Los niveles de biogás obtenido se encuentran registrados en la tabla A.3 (ver sección de anexos). Se observó una pronta producción de biogás en el arranque del biodigestor el día 19/11/09 incrementándose diariamente en una

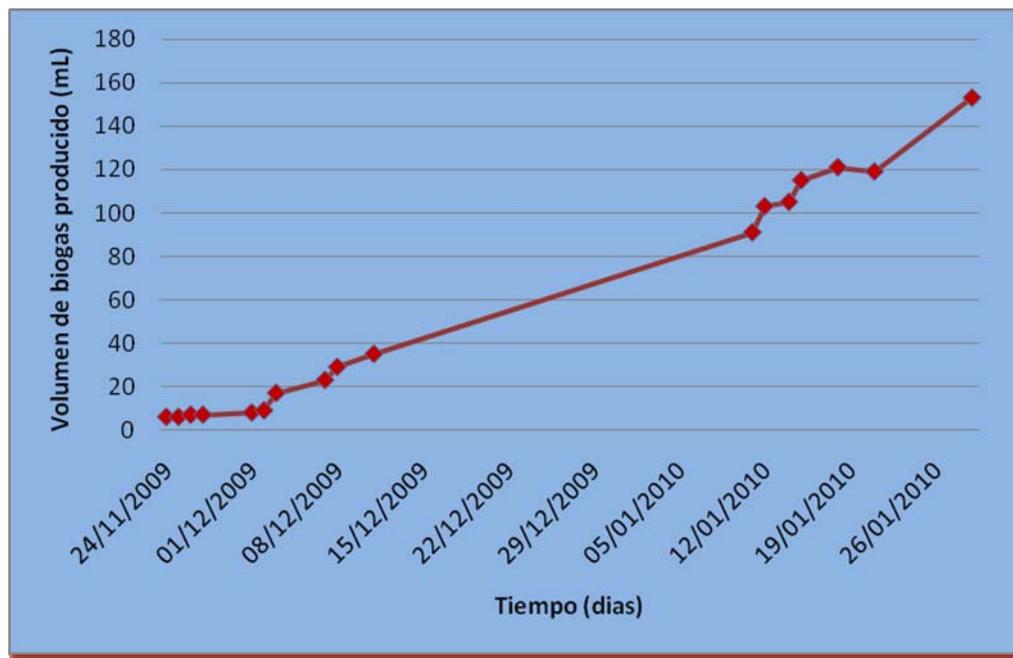


## Capítulo IV. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

relación considerable, debido al proceso de fermentación de los extractos de yuca amarga frescos, realizado por el sistema de microorganismos y bacterias como impulso para su actividad en las fases de la digestión anaeróbica. Como puede observarse la agitación jugó un papel fundamental en la producción de biogás debido a que el incremento en la producción fue más notable en presencia de la misma.

Los niveles de biogás obtenidos van desde 6 mL, al inicio del proceso, hasta alcanzar valores máximos de 153 mL en 66 días de operación, valor que permaneció constante durante 7 días. La agitación formó parte importante del proceso ya que esta permitió mantener un lodo homogéneo liberando la fase gaseosa atrapada dentro del lodo de digestión.

En la figura 4.2 se muestra el comportamiento de la producción de biogás con respecto al tiempo. Al inicio del proceso el volumen permanece casi constante, incrementándose considerablemente a partir de los 9 días de operación, lo que indica que la biomasa bacteriana presente en dicho reactor estaba en actividad, descomponiendo las sustancias presentes en los extractos.



**Figura 4.2 Producción de biogás con respecto al tiempo**

Los días donde se observaron anomalías en los puntos de la recta corresponden a los días donde se agitó el contenido del digestor, lo que ratifica la importancia de mantener una agitación para homogeneizar el flog biológico.



#### 4.4 Caracterización del inóculo mediante un análisis de pH, sólidos totales, sólidos volátiles y Demanda química de oxígeno (DQO)

El inóculo se caracteriza con el objetivo de garantizar la propiedad del mismo, que permitan hacer sus funciones en un proceso de biodegradabilidad anaeróbica como son: El pH fue de 7,83 valor que se encuentra ligeramente por encima del rango óptimo de operación (6,5 – 7,5) según lo expuesto por (Speece et al, 1986). Debido a que el extracto de yuca amarga que entró al proceso con un pH de 4,77, en comparación con el valor obtenido se consideró aceptable por su elevado valor de pH.

Además, Este proceso requiere de una biomasa activa para biodegradar el sustrato (yare) y esta se verificó a través de los siguientes análisis: sólidos totales (ST), sólidos fijos (SF), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y por último la demanda química de oxígeno (DQO) que permitió la contribución del inóculo con carga orgánica propia de él. En la tabla 4.3 se tiene los valores correspondientes al análisis del inóculo, realizado en tres (3) oportunidades distintas.

Tabla 4.3 Caracterización del inóculo utilizado para la biodigestión anaeróbica

Volumen de muestra (mL)	pH	ST (g/L)	SF (g/L)	SSV (g/L)	DQO real mgO <sub>2</sub> /L	Fecha
50	7,66	454,66	342,2	112,4	6.662,40	14/06/2010
	8,12	476,38	380,79	95,59	17.320,00	26/01/2010
	7,7	470,82	365,99	104,83	6.351,90	03/02/2010
Media aritmética	7,83 ± 0,35	407,29 ± 95,05	361,50 ± 27,47	103,99 ± 11,39	10.111,43 ± 8.421,78	

A este inóculo también se le realizaron otros análisis importantes, como fueron: sólidos totales, fijos y suspendidos volátiles, obteniéndose valores de 407,29 g/L, 361,50g/L y 103,99 g/L, respectivamente. Moreno y Buitrón (2002) caracterizaron inóculos provenientes de una industria cervecera y observaron que presentó valores de sólidos totales de 12,12 g/L, sólidos filtrables de 7,53 g/L y sólidos suspendidos volátiles de 4,59 g/L, muy por debajo de los obtenidos en esta investigación. Estos autores también caracterizaron inóculos



## Capítulo IV. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

---

provenientes de una planta de tratamiento de aguas municipales, reportando valores de sólidos totales de 121,8 g/L , sólidos filtrables de 74,32 g/L y sólidos volátiles de 47,38g/L , más cercanos a los obtenidos en el extracto de yuca. La mayor cantidad de sólidos totales puede ser debida a que este inóculo se realizó de manera diferente a los mencionados por los autores anteriores, ya que las excretas de bovino no estaban diluidas en ningún medio y el extracto de la yuca amarga contiene una gran carga de sólidos. Recordando además que la muestra de extracto de yuca fue obtenida directamente del proceso (unidad de prensado) donde se arrastró una gran cantidad de almidón de la yuca, ya que esta unidad no cuenta con proceso de filtración o sedimentación.

Otra medida de importancia que se realizó fue el análisis de la demanda química de oxígeno, para la cual se obtuvo un valor de 10.111,43 mgO<sub>2</sub>/L. Esto se debe como se mencionó anteriormente a la gran carga orgánica con que vienen los extractos de la yuca amarga, con un contenido importante de almidón en donde se indica que la caracterización y comportamiento de los inóculo va a depender de la composición, relación de carga y propiedades físico químicas de los componentes del inóculo.

Lo cual pareciera un valor muy alto al ser comparado con otras investigaciones sobre inóculos. Pacheco y Magaña (2003) estudiaron inóculos por carga obteniendo valores de DQO promedio de 342,33 mgO<sub>2</sub>/L, valor que se considera muy aceptable para este tipo de procesos; Rodríguez (1993) reportó que un inóculo preparado con excretas de cerdo en agua corriente, al que luego se le añadió el extracto de yuca amarga, tuvo al final de su proceso una DQO de 7.619,05 mgO<sub>2</sub>/L.

Cabe destacar que se consideró utilizar el agua de yare en la proporción del inóculo en la búsqueda de que las bacterias anaeróbicas a utilizar en la biodigestión, ya se encuentren aclimatadas al nuevo sustrato que en este caso es el yare; cuestión que se percibe que la DQO del yare en promedio fue 35.647,48 mgO<sub>2</sub>/L y ya en el inóculo los valores bajaron sustancialmente a un promedio de 10.111,43 mgO<sub>2</sub>/L.

### **4.5 Medición de las variables de control de proceso anaeróbico en una porción de extracto de yuca amarga para el proceso de la digestión anaeróbica**

#### **4.5.1 Medición de pH y contenido de cianuro.**

En vista de que el yare tuvo un pH promedio de 4,38 y éste no es el recomendado para iniciar el proceso anaeróbico (se recomienda entre 6,5 a 7,5) ya que las bacterias anaeróbicas son muy sensibles a cambios de pH y no es su



## Capítulo IV. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

pH óptimo de crecimiento, se procedió a realizar una dilución con agua de chorro para incrementar el valor de pH. En la tabla 4.4. Se muestran los valores de agua y de extracto de yuca que se mezclaron, así como los valores de pH resultantes. Como se observa, con ninguna dilución se lograron alcanzar valores de pH óptimos para el crecimiento bacteriano, con lo que se descartó la dilución como medio eficaz para el tratamiento del inóculo.

**Tabla 4.4 Comportamiento del pH de los extractos de yuca amarga en agua de uso doméstico**

Volumen de H <sub>2</sub> O (mL)	Volumen de extracto de yuca (mL)	pH
50	50	4,69
40	60	4,71
30	70	4,62
20	80	4,72
10	90	4,73
70	30	4,68
90	10	4,81
100	2	6,01
100	5	5,12

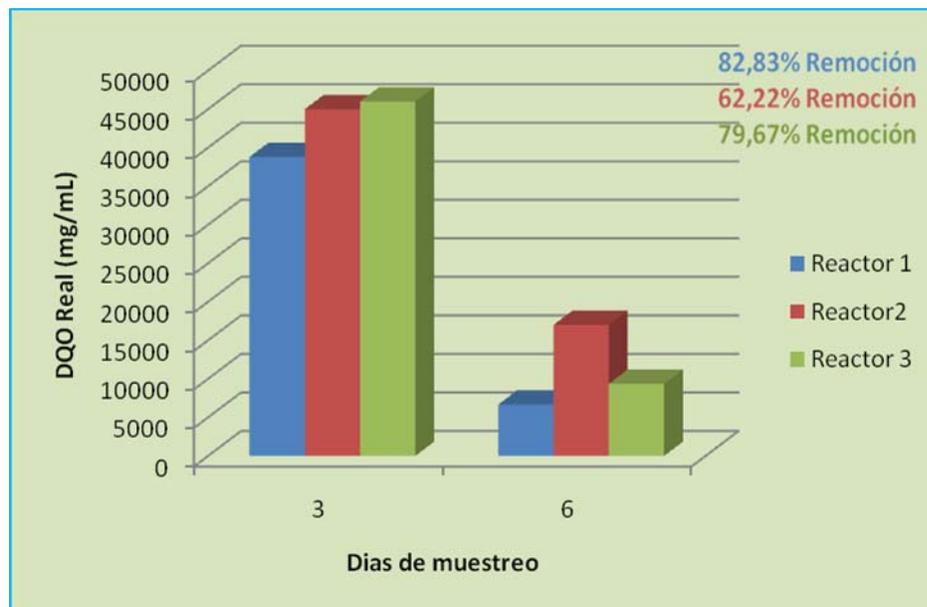
En la tabla 4.5 se muestran los niveles de cianuro presentes en los extractos de yuca amarga con un tiempo de almacenamiento de 180 días a 15 °C, pudiéndose observar una gran diferencia con respecto a los mostrados en la tabla 4.2, donde se midió el contenido de cianuro al inicio del proceso. El valor promedio obtenido fue de 2,01 ppm de CN<sup>-</sup> y su disminución en almacenamiento se debe probablemente a la volatilización del mismo.

**Tabla 4.5 Niveles de cianuro presentes en los extractos de yuca amarga almacenados obtenidos del proceso de elaboración del cazabe**

Muestra	Volumen de muestra (mL)	Contenido de CN <sup>-</sup> en los extractos (mg/L)
Extractos de yuca (almacenados)	100	2,1
		1,92
Media aritmética		2,01±1,43



#### 4.5.2 medición de DQO en la biodigestión anaeróbica



**Figura 4.3 Comportamiento de la demanda química de oxígeno con respecto al tiempo, para el primer arranque de los reactores anaeróbicos.**

En la grafica 4.3 se muestra el comportamiento de la DQO con respecto al tiempo, se observa que una vez iniciado el arranque de los reactores anaeróbicos sin añadir ningún tipo de químicos al cabo de tres días de operación la mayor de demanda química de oxígeno (DQO) la obtuvo el reactor 3 con una diferencia mínima respecto al reactor 2 y por último el reactor 1, al cabo de haber transcurrido los 6 días de operación se observó un brusco cambio de la DQO mostrando mayor valor el reactor 2 y disminuyendo respectivamente para los reactores 3 y 1, obteniéndose un importante porcentaje de remoción para cada uno de los reactores (en el anexo C.1), donde el reactor 1 mostró un porcentaje de remoción mayor con un 82.83 % entre los 6 primeros días, seguido del reactor 3 con un 79.67 % seguido del reactor 2 con un 62.22 % para un mismo lapso de 6 días.



4.5.2.1 mediciones de DQO en la biodigestión anaeróbica empleándose NaOH.

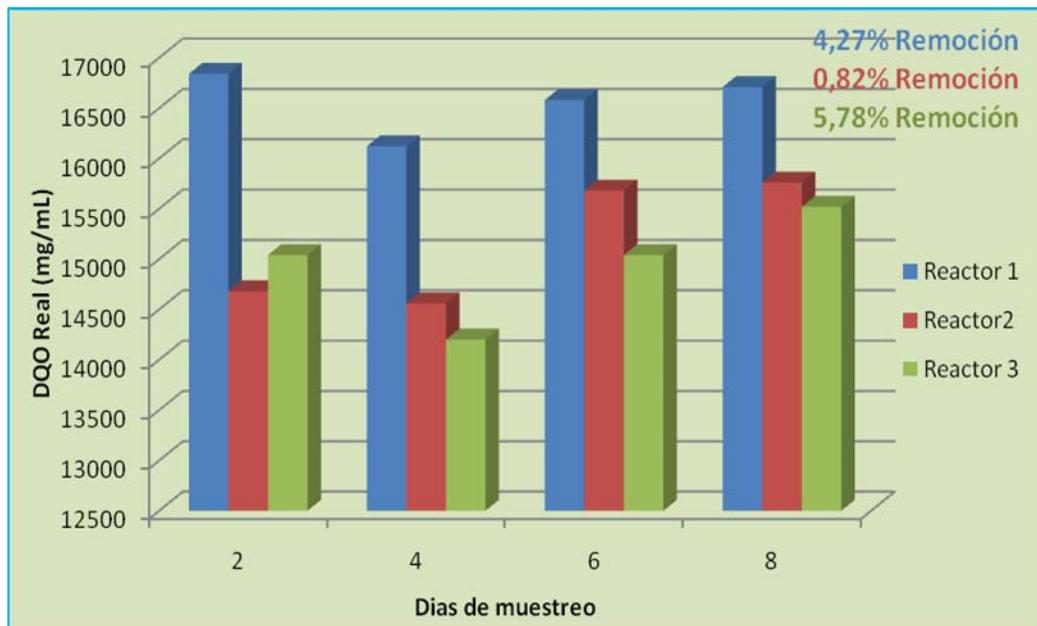


Figura 4.4 Comportamiento de la demanda química de oxígeno con respecto al tiempo de operación, empleando una base comercial (NaOH).

En la grafica 4.4 se muestra el comportamiento de la DQO mostrado al cabo de 8 días de operación, donde en los dos primeros días los reactores muestran un comportamiento inestable, estando la mayor remoción de DQO en el reactor 2, luego el reactor 3 y por último el reactor 1. Mientras que a los 4 días el reactor 3 muestra una disminución en comparación con el reactor 2 y 1, ahora considerando un periodo de prueba de 6 días el comportamiento de estos reactores se muestra desfavorecido ya que hay un aumento en la DQO ligeramente para el reactor 1 pero intermedia para los reactores 2 y 3.

A diferencia de los 8 días que solo existe una disminución mínima en el reactor 2 aumentando el reactor 1 mostrándose más baja DQO en el reactor 3 sin embargo esto no representan resultados satisfactorios como se esperaba empleándose base comercial de NaOH. Ya que si observamos los porcentajes de remoción considerando un periodo de 8 días en un segundo arranque (anexo C 2), se obtuvo mayor remoción en los primeros 4 días de operación siendo el reactor 3 el que presento la mayor remoción de DQO seguido del reactor 1 con un 4.27 % de remoción y por último el reactor 2 con apenas un 0.82 %,



## Capítulo IV. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

mostrándose de igual manera una poca remoción a partir de estos primeros días de operación, siendo estos valores infructuosos para este segundo arranque podemos suponer que el sistema se inhibió.

### 4.5.2.2 mediciones de pH en la biodigestión anaeróbica empleándose NaOH.

En la grafica 4.5 se muestra el comportamiento de pH con respecto al tiempo en los reactores 1, 2 y 3 mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH) como base comercial para elevar los niveles de pH. Para un tiempo de 2 días se observó que los reactores 1 y 2 alcanzaron un pH de 7 mientras que en el reactor 3 fue de 7,30. Al cabo de 4 días se observó una disminución del pH en todos los reactores, debido posiblemente a la variación de la consistencia en la mezcla inóculo/ extracto.

A los 6 días, se observó un incremento de pH para todos los reactores, siendo mayor para los reactores 1 y 3. Al cabo de 8 días se observaron valores aún más altos de pH en los tres reactores, mostrando el reactor 2 el valor más bajo.

Entre la figura 4.4 y 4.5, se puede observar que la remoción esperada de DQO no se logró a pesar de que el pH en el proceso se mantuvo dentro de los rangos establecidos, es de hacer notar que estos procesos son biológicos y los microorganismos son los responsables de la biodegradabilidad, sin embargo son inhibidos en presencia de un alta carga orgánica que se consideró que esta ocurrió.

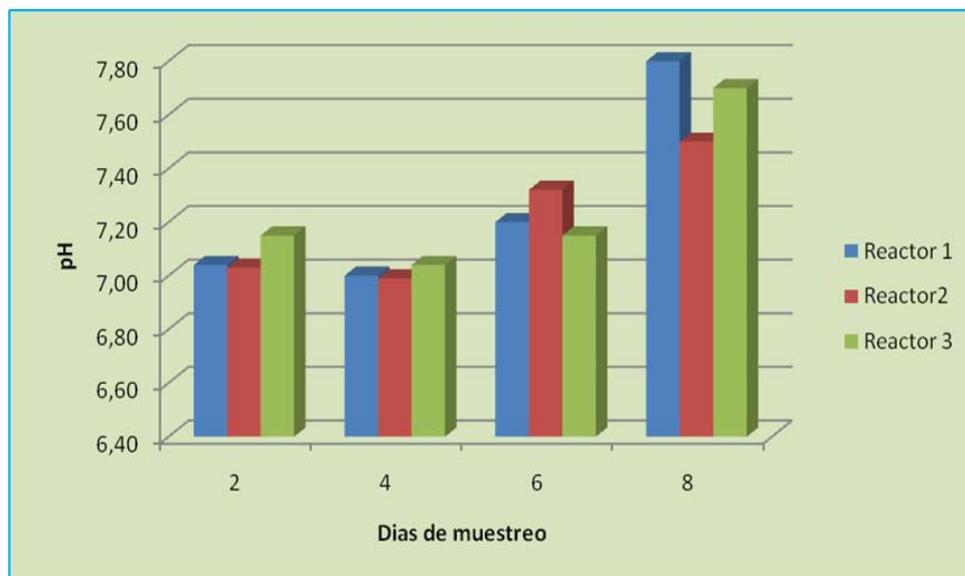




Figura 4.5 Comportamiento del pH con respecto al tiempo de operación usando una base comercial (NaOH)

#### 4.5.3 mediciones de DQO en la digestión anaeróbica empleándose NaOH (segundo arranque).

En la figura 4.6 se muestra el comportamiento mostrado por los reactores anaeróbicos en un tiempo de operación de 20 días. A los 10 días de operación del biodigestor, se observó una disminución comparado con los valores obtenidos a los 5 días de operación, mostrando el mejor comportamiento el reactor 2, seguido del 1 y el 3. El porcentaje de remoción para el reactor 2 fue de 65.70 %, para el reactor 1 de 50.83 % y para el reactor 3 de 35.11 %.

A los 5 y 20 días el porcentaje de remoción fue mayor. Observándose un mejor comportamiento en esta etapa debido a que hubo una mayor remoción de la DQO con un porcentaje total de 79,24% para el reactor 3, 74,46% para el reactor 3 y 71,06% para el reactor 1.

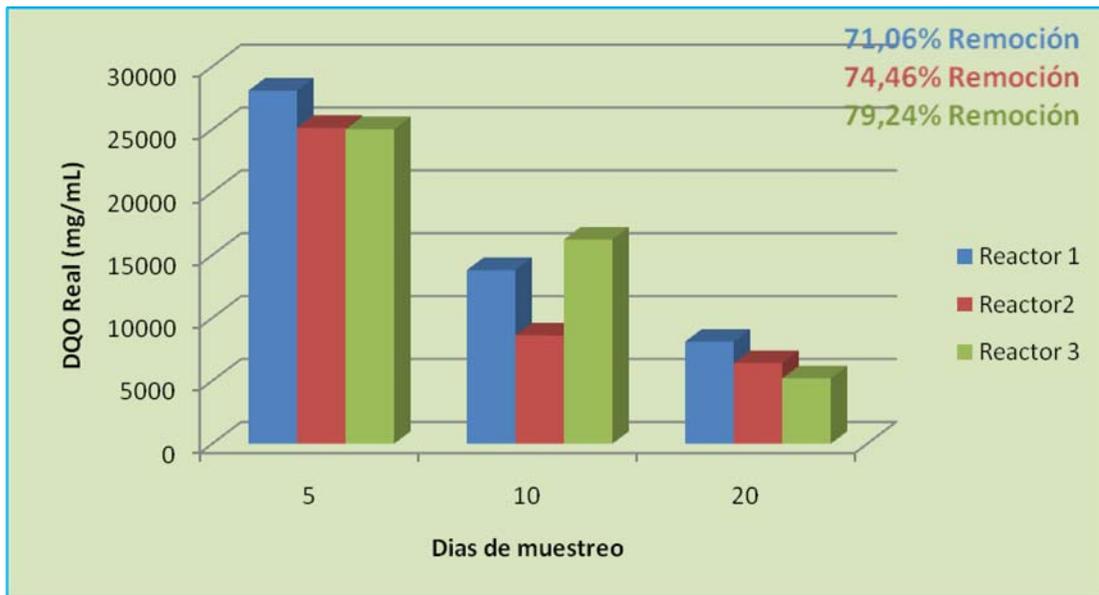


Figura 4.6 Comportamiento de la demanda química de oxígeno con respecto a un tiempo de 20 días de operación empleando una base comercial (NaOH)

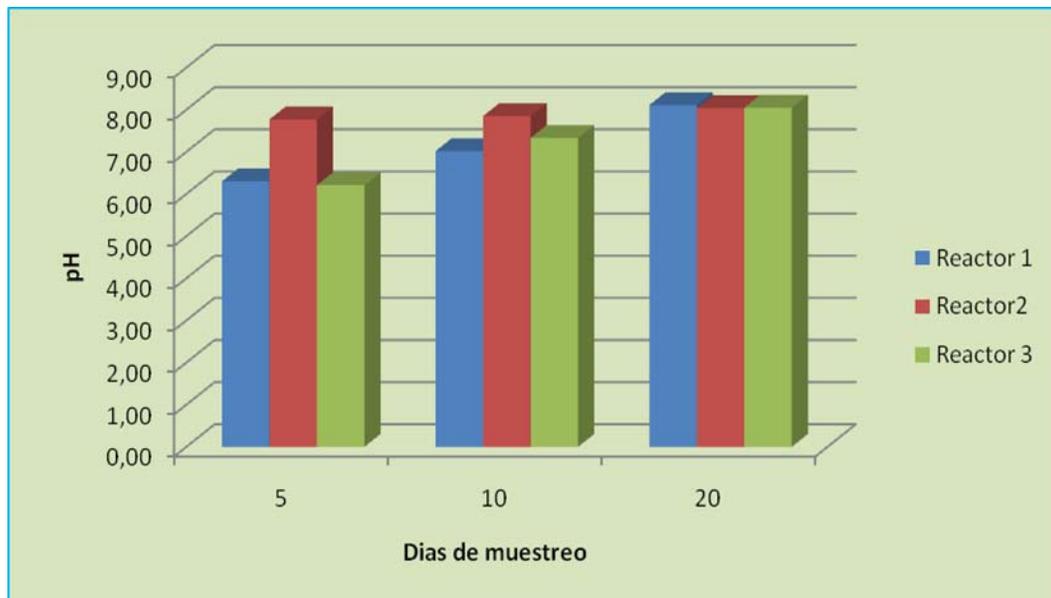
#### 4.5.3.1 mediciones de pH de la digestión anaeróbica empleándose NaOH segundo (arranque).



## Capítulo IV. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

En la figura 4.7 se muestra el cambio en los niveles de pH con respecto al tiempo, en el segundo arranque de los reactores anaeróbicos con la adición de una base comercial (NaOH). Como se observa, al cabo de 5 días el reactor 2 presentó un pH mayor a los de los reactores 1 y 3; con un tiempo de operación de 10 días pudo notarse que los reactores 2 y 3 mostraron un ligero crecimiento en cuanto al pH.

Finalmente, al cabo de 20 días de operación las diferencias en el comportamiento del pH fueron mínimas manteniéndose una misma tendencia creciente consideradas excelentes para el desarrollo de este tipo de proceso, es decir que con estos valores de pH, la disminución de la DQO y la apreciación de burbujeo en los reactores se puede decir que el proceso experimento la digestión anaeróbica en sus diferentes etapas: la fermentativa, la acidogénica y la metanogénica, como se esperaba.



**Figura 4.7 Comportamiento del pH con respecto al tiempo de operación de 20 días, empleando una base comercial (NaOH)**

### 4.6 Evaluación de la factibilidad del uso del reactor anaeróbico para la depuración de los extractos de yuca provenientes de la cazabera artesanal

En esta parte del proyecto se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos durante las pruebas para la caracterización del extracto de yuca (yare), específicamente las pruebas de pH y DQO previo al tratamiento biológico



## Capítulo IV. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

---

y posterior a él, en el cual se trataron los datos por medio de una desviación típica o estándar aplicado para datos simples, lo cual permitió verificar confiabilidad de la repetitividad de los resultados con respecto a cada reactor.

Para evaluar la factibilidad de instalación del proceso de biodigestión en la planta cazabera, se verificó la eficiencia del proceso biológico llevado a cabo en los reactores anaeróbicos utilizados en las pruebas, lo que permitió establecer bases teóricas y prácticas para sustentar su aplicación en la planta artesanal de producción de cazabe.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización de los extractos de la yuca amarga en cuanto a los sólidos sedimentables, es factible la recuperación de un contenido importante, de acuerdo con lo observado experimentalmente, porque se removería un contenido importante de DQO que contribuye el almidón presente en este tipo de agua.

De experiencia observada en el laboratorio cuando el extracto de yuca amarga era almacenada herméticamente por un tiempo determinado, cuando se disponía hacer usada se visualizó una generación importante de burbujeo de gas con ciertos olores fuertes, y con el conocimiento que se tiene de la fermentación, es posible considerar una pre fermentación y sedimentación de estas aguas, antes de entrar a los biodigestores anaeróbicos, de esta manera se removerá un contenido importante de DQO presente en estos extractos.

Se hace necesario un control de pH a las aguas de yare ya que el proceso anaeróbico lo requiere, y de acuerdo a los porcentajes de remoción de DQO en los diferentes reactores es posible utilizar biodigestión anaeróbica para tratar este tipo de aguas, pero como un tratamiento primario, queriendo decir que estas aguas requieren de un tratamiento completo para alcanzar los valores establecidos en el decreto 883.

### 4.7 Conclusiones

- En la caracterización del yare, los valores obtenidos resultaron propios de este tipo de efluente como son: bajo pH: 4,38, alto contenido de sólidos totales y sedimentables respectivamente: 42,82 g/L, 13,50 mL/100mL. Alta DQO:35.647,00 mgO<sub>2</sub>/L
- El contenido de cianuro en el yare resultó por encima de los valores recomendados por las normas ambientales a ser descargados a cuerpos de aguas, sin embargo en el sólo proceso de almacenamiento de la muestra bajo refrigeración se obtuvo un porcentaje de remoción de 92,93%, pero aún así el valor obtenido debe ser removido en el proceso anaeróbico.



## Capítulo IV. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

---

- La relación Yare, excreta de bovino en la preparación del inóculo, permitió aclimatar las bacterias presentes en el sustrato.
- En la caracterización del inóculo, los valores obtenidos en cuanto a pH, biomasa activa (SSV, DQO) permitió garantizar su utilización para el arranque de los biodigestores anaeróbicos.
- En el biodigestor alimentado en una relación yare/inoculo (50:100 mL) y control de pH con una base comercial se obtuvo un porcentaje de remoción de 82,83% para la DQO.
- Para depurar los extractos de yuca provenientes de una cazabera artesanal, la biodigestión anaeróbica puede utilizarse como un pre tratamiento de estos efluentes debido a las altas cargas orgánicas que presentan.

### 4.8 Recomendaciones

- Estos efluentes no deben diluirse, cuando su propósito sea aumentar el pH.
- Los sólidos sedimentables que en su mayoría es almidón deben separarse a través de un proceso de sedimentación primaria y buscar valor agregado a estos sólidos
- Se debe continuar el desarrollo de esta investigación, para la mejora de las técnicas empleadas, con el objetivo de mitigar el impacto negativo causado por el vertimiento de estos efluentes a los cuerpos receptores.
- Estos procesos anaeróbicos requieren de un tiempo de agitación continua con el fin de que la biomasa activa, mantenga el flog biológico requerido para tal fin.
- Mantener las muestras bien refrigeradas para evitar una fermentación excesiva de los extractos, ya que tienen una alta carga orgánica de agentes bacterianos.



## Capítulo IV. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

---

- Preparar el arranque con lodos floculentos y granulares con cargas orgánicas en el rango de funcionamiento obtenidos en el presente trabajo, y proveerlos de un sistema de agitación que permita que la calidad del lodo no disminuya.
- Tomar precauciones cuando se disponga del manejo de estos extractos de yuca amarga ya que pueden resultar nocivos para la salud, por su contenido de cianuro presente.
- Implementar un sistema toma muestras tanto del lodo de la digestión así como, la muestra de biogás producido con el fin de obtener resultados más concisos y así impedir la constante interrupción del sistema cada vez que se desee obtener una muestra para su análisis.



Amundaraín, M. (2002). *Factibilidad de undigestor anaeróbico para tratar aguas residuales domesticas en presencia de un biocidautilizado en los baños portátiles*. Puerto la Cruz Estado Anzoátegui: Universidad de Oriente.

Cooke, R. (1979). *Ensayo enzimático para determinar el contenido de cianuro en las raíces y en los productos derivados de la yuca*. (U. d. Rica, Ed.) San José , Costa Rica: Centro internacional de agricultura tropical (CIAT).1-14.

Cliff, J. Per Lundquist, Hans Roshing, Bo Sorbo and Leift Wide. (1986). *Tyroid function in a cassava – eating population affected by spastic paraparesis*. Endocrinológica (copenh).

Coursey, D.G (1973). In “*Chronic Cassava Toxicity*” (B.L. Nestel and R. Mac Intyre, eds.). International Development Research Centre, Ottawa, Canadá. 26-37.

Cermeño, J. (2000). *Diseño de experimentos estadísticos*. Barcelona, Estado Anzoátegui: Universidad de Oriente.

Dankhe. (s.f.). [www.investipos.htm.com](http://www.investipos.htm.com).

Doroznski, A. (1978). *Cassava may lead to mental retardation nature*. 272-121.

Franson; M. (1998). *Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*. Editorial BOARD; Edición 20.

Horta, L. (1986). *Biodigestao – A Alternativa Energética*. Librería Novel, S.A. São Paulo – Brasil.

Jones, W. O. *Manioc in Africa*. (1959).Stanford University press (1959). 319 p.

Lancaster, P. A; J. S. Ingram; M. Y. (1982). Lim and D.G. Coursey. *Traditional Cassava - Based Food: survey of Processing Techiques*. Economic Botany 36:12- 45.

Mc Carty, P. (1968). *Anaerobic Treatment of Soluble Wastes*. Advances in water Quality Improvement . University of Texas. Press. Austin (1968).



Melcaf & Eddy. (1995). *Ingeniería de las Aguas Residuales tratamiento, vertido y reutilización*. Editorial Mc Graw - Hill, volumen 1, Tercera Edición.

Mc Kinney, M. Bryant, M.y Pfenning, N. (1979). *Anaerobic bacterium that degrades fatty acids in syntrophic association with methanogens*.

Medina, H. *Dinámica de la producción de yuca amarga (M.E.C) en el área de influencia de las centrales yuqueras Agroinmoca y Cantaura en los Estados Monagas y Anzoátegui*. Tesis de Grado. U.D.O.

Muñoz, A. (1970). *Contenido de Acido Cianhídrico en hojas y raíces de clones "amargos" de yuca (Manihot esculenta)*. Trabajo de grado Ingeniería Agronómica. Jusepín, Venezuela. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica 20 P.

Moreno, A; Mendez, G. (2002). *Influencia del origen del inóculo en la prueba de biodegradabilidad anaeróbica*. XIII Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y ciencias ambientales. Guanajuato.

Moreno, G y Buitrón G. (1997). *Influence of So/Xo ratio and médium composition on anaerobic biodegradability test*. Proc. Of 52<sup>th</sup> Industrial Waste Conference, chap. Purdue University. 125-133.

Núñez, A (1988). *Estudio sobre el tratamiento Anaeróbico de los desechos del proceso de Obtención del cazabe*. Tesis de Grado – MSC en Ingeniería Química. Universidad de Oriente .Pto. La Cruz. Estado Anzoátegui. Venezuela.

Nyholm N. (1991). *The european system of standaizel legal test for assessing the biodegradability of chemicals*. Env. Tox. Chem. Vol. 10, pp.1237-1246.

Obidoa, O. and S.C. Obasi. (1991). *Coumarin Compounds in Cassava Diets: 2 Health implications of Scopoletin in Gari*. Plant Foods for Human Nutrition 41: 283:289.

Obregon, R. (1975). *Variación del ácido cianhídrico en 118 clones de yuca*. Manual práctico para la producción de yuca o mandioca. Orientación Agropecuaria 111. 57-61.



## Bibliografía

---

Pereira, J.F. (1977). *Fisiología de la yuca (M.E.C) trabajo de Ascenso* .U.D.O. Jusepín, Monagas. Venezuela. 1-118.

Pacheco, J; Magaña A. (2003). *Arranque de un reactor anaeróbico*. Tesis de maestría en ingeniería ambiental.

Quijada de Lugo, C. (1979). *Cambios en el contenido de glucósidos cianogénicos durante la fabricación del cazabe*. Trabajo de Grado. U.D.O. Jusepín. Venezuela.

Ramalho,R. (1977). *Introducción to wastewater treatment proceses*.Academic Press, INC,USA.

Rodríguez, H. (1993). *Producción de Biogás a partir de los Desechos Líquidos del proceso de Elaboración del Cazabe* .Tesis de grado-MSc en Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Pto. La Cruz. Estado Anzoátegui Venezuela.

Stafford,D.; Hawkes, D. And Horton, R. (1980). *Methane production from Waste organic Matter* CRC. Pres., Inc.

Speece, R., Parkin, G. y Bhattacharya, S. (1986). *Modelling Toxic Response of Anaerobic Treatment*. Seminario Internacional sobre tratamiento anaerobio en países tropicales, 25-29 de agosto San Paulo, Brasil.

Victor, C. (1984). *Evolucion histórica de la tecnología del cazabe*. Interciencia Volumen 9 ,N° 4.

Viñas, M.; Borzacconi, L. y Martínez, L. (1992). *Estudio del Tratamiento de los Efluentes de producción de Levaduras en Reactor UASB*. II Taller regional sobre Tratamiento Anaeróbico de Aguas Residuales en América Latina. Ciudad de la Habana- Cuba.

Zafar, I., Kenji, Y. y Masanori (1997). *Microbial diversity in UASB Reactors*. Pure &Appl.Chem,GranBretaña.2431-2438.

# **ANEXOS**

# **ANEXO A**

**Lista de tablas de los resultados de los análisis realizados a las muestras de inóculo y extractos de yuca**

**Tabla A.1 Variables medidas para el arranque 1 sin agregar el NaOH**

Reactor	Parámetros fisicoquímicos		Cálculos estadísticos			
			Media aritmética		Desviación estándar (S)	
	pH	DQO real (mgO <sub>2</sub> /L)	pH	DQO real (mgO <sub>2</sub> /L)	pH	DQO real (mgO <sub>2</sub> /L)
1	----	38.800,00	4,19	28.271,47	0,06	37.432,07
	----	6.662,40				
	4,23	----				
	4,15	39.352,00				
2	----	45.000,00	4,21	33.042,00	0,04	28.879,70
	----	17.000,00				
	4,24	----				
	4,18	37.126,00				
3	----	46.000,00	4,20	31.538,47	0,06	31.883,93
	----	9.351,90				
	4,18	----				
	4,15	39.352,00				
	4,26	31.450,00				

----- Parámetro no realizado

**Tabla A.2 Variables medidas para el arranque 2 con el NaOH en un tiempo de 8 días**

Reactor	Fecha	Muestreo (días)	Parámetros fisicoquímicos		
			pH	Absorbancia	DOO real (mgO <sub>2</sub> /L)
1	13/08/10	2	7,04	0,066	16.840,0
	17/08/10	4	7,00	0,063	16.120,0
	19/08/10	6	7,20	0,067	16.580,0
	21/08/10	8	7,80	0,066	16.710,0
2	13/08/10	2	7,03	0,057	14.680,0
	17/08/10	4	6,99	0,057	14.560,0
	19/08/10	6	7,32	0,069	15.680,0
	21/08/10	8	7,50	0,062	15.760,0
3	13/08/10	2	7,15	0,059	15.040,0
	17/08/10	4	7,04	0,055	14.200,0
	19/08/10	6	7,15	0,059	15.040,0
	21/08/10	8	7,7	0,061	15.520,0

**Tabla A.3 Producción de biogás producto de la digestión anaeróbica usando los extractos de yuca amarga y las excretas de bovino**

Fecha	Volumen de referencia (mL)	Volumen de biogás desplazado (mL)	Volumen de biogás producido (mL)	Agitación	Tiempo de agitación (h)
24/11/2009	197	191	6	si	4
25/11/2009	197	191	6	no	0
26/11/2009	197	190	7	no	0
27/11/2009	197	190	7	no	0
01/12/2009	197	189	8	si	4
02/12/2009	197	188	9	si	3
03/12/2009	197	180	17	si	4
07/12/2009	197	174	23	si	4
08/12/2009	197	168	29	si	4
11/12/2009	197	162	35	si	4
11/01/2010	197	106	91	no	0
12/01/2010	197	94	103	no	0
14/01/2010	197	92	105	no	0
15/01/2010	197	82	115	si	4
18/01/2010	197	76	121	no	0
21/01/2010	197	78	119	no	0
29/01/2010	197	44	153	no	0

**Tabla A.4 Variables medidas para el arranque 2 con el NaOH en un tiempo de 20 días**

Reactor	Fecha	Muestreo (días)	Parámetros fisicoquímicos		
			pH	Absorbancia	DOO real (mgO <sub>2</sub> /L)
1	12/09/10	5	6,30	0,112	28.096,0
	17/09/10	10	7,02	0,054	13.813,7
	22/10/10	15	8,08	0,098	24.520,0
	27/10/10	20	8,11	0,030	8.129,4
2	12/09/10	5	7,77	0,101	25.129,0
	17/09/10	10	7,85	0,032	8.618,4
	22/10/10	15	8,23	0,127	31.966,0
	27/10/10	20	8,04	0,023	6.417,9
3	12/09/10	5	6,21	0,100	25.027,0
	17/09/10	10	7,33	0,064	16.240,0
	22/10/10	15	8,11	0,154	38.731,0

**Tabla A.5 Valores de la media aritmética y desviación estándar de los parámetros de control en el primer arranque de los reactores anaeróbicos**

Reactor	Parámetros fisicoquímicos		Cálculos estadísticos			
			Media aritmética		Desviación estándar (S)	
	pH	DQO real (mgO <sub>2</sub> /L)	pH	DQO real (mgO <sub>2</sub> /L)	pH	DQO real (mgO <sub>2</sub> /L)
1	6,30	28.096,00	7,37	18.639,77	0,88	9.269,23
	7,02	13.813,70				
	8,08	24.520,00				
	8,11	8.129,40				
2	7,77	25.129,00	7,97	18.032,82	0,21	12.490,35
	7,85	8.618,40				
	8,23	31.966,00				
	8,04	6.417,90				
3	6,21	25.027,00	7,42	21.298,35	0,88	14.173,82
	7,33	16.240,00				
	8,11	38.731,00				
	8,05	5.195,40				

**Tabla A.6 Valores de la media aritmética y desviación estándar de los parámetros de control para el segundo arranque de los reactores anaeróbicos empleando una base comercial**

Reactor	Parámetros fisicoquímicos		Cálculos estadísticos			
			Media aritmética		Desviación estándar (S)	
	pH	DQO real (mgO <sub>2</sub> /L)	pH	DQO real (mgO <sub>2</sub> /L)	pH	DQO real (mgO <sub>2</sub> /L)
1	7,04	16.840,00	7,26	16.562,50	0,38	313,52
	7,00	16.120,00				
	7,20	16.580,00				
	7,80	16.710,00				
2	7,03	14.680,00	7,21	15.170,00	0,24	637,81
	6,99	14.560,00				
	7,32	15.680,00				
	7,50	15.760,00				
3	7,15	15.040,00	7,26	14.950,00	0,29	548,82
	7,04	14.200,00				
	7,15	15.040,00				
	7,70	15.520,00				

**Tabla A.7 Valores de la media aritmética y desviación estándar de los parámetros de control para el segundo arranque de los reactores anaeróbicos empleando una base comercial**

Reactor	Fecha	Relación inóculo/extracto (mL)	Muestreo (días)	Parámetros fisicoquímicos		
				pH	Absorbancia	DQO real (mgO <sub>2</sub> /L)
1	14/06/10	50/100	3	----	0,159	38.800,0
	17/06/10		6	----	0,024	6.662,4
	26/06/10		9	4,23	----	----
	29/06/10		12	4,15	0,156	39352
2	14/06/10	50/80	3	----	0,180	45.000,0
	17/06/10		6	----	0,068	17.000,0
	26/06/10		9	4,24	----	----
	29/06/10		12	4,18	0,147	37.126,0
3	14/06/10	50/75	3	----	0,188	46.000,0
	17/06/10		6	----	0,035	9.351,9
	26/06/10		9	4,18	----	----

----- Parámetro no realizado

# **ANEXO B**

**Lista de figuras de los equipos utilizados en el proceso artesanal de elaboración del cazabe y el montaje de los equipos utilizados durante los análisis de investigación**



**Figura B.1 Cultivos de Yuca Amarga de los altos de Sta. Fe, Edo .Sucre**



**Figura B.2 Equipos artesanales utilizados en el procesamiento de la yuca.**



**Figura B.3 Extractos de yuca amarga, provenientes del procesamiento del cazabe.**



**Figura B.4 presencia abundante de almidón en extracto de yuca amarga**



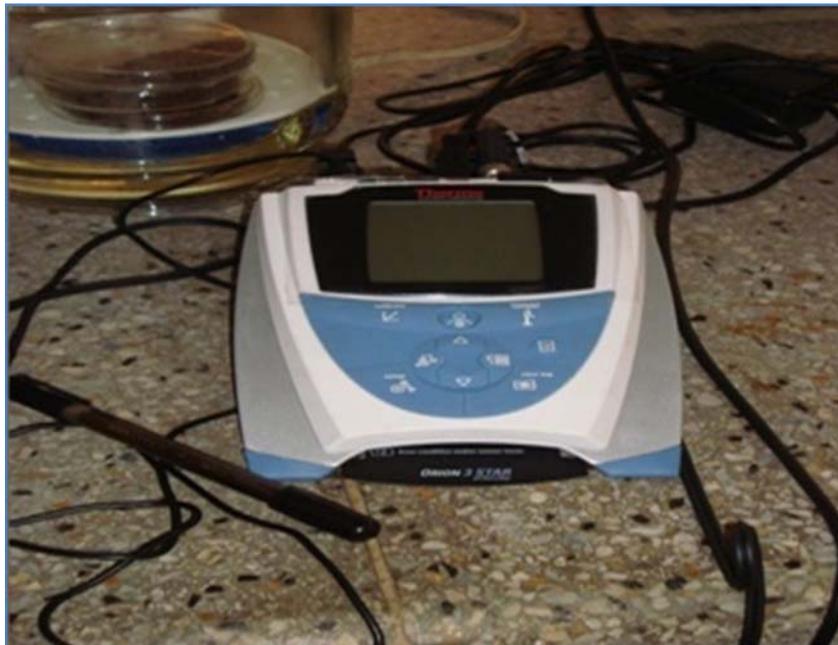
**Figura B.5 Reactores anaeróbicos utilizados para la evaluación de los parámetros de control en la biodegradabilidad de los extractos de yuca amarga**



**Figura B.6 Vista frontal del termo reactor para el tiempo de reacción de la DQO**



**Figura B.7 Vista frontal del Espectrofotómetro empleado para la medición de absorbancia.**



**Figura B.8 Vista frontal del equipo para la medición de pH**

# **Anexo C**

## **Muestra de cálculo**

### **C.1 Cálculo del porcentaje de remoción para el primer arranque de los reactores anaeróbicos**

A continuación se presenta la expresión matemática que permite determinar el porcentaje de remoción para los diferentes períodos de prueba:

$$\%DQO_{rem} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \times 100 \quad (\text{Ec C.1})$$

Donde:

$DQO_i$ : demanda química de oxígeno inicial

$DQO_f$ : demanda química de oxígeno final

- **Reactor 1**

**(Día 3 y 6)**

$$\%DQO_{rem} = \frac{38.800,00 - 6.662,4}{38.800,00} \times 100 = 82,83 \%$$

- **Reactor 2**

**(Día 3 y 6)**

$$\%DQO_{rem} = \frac{45.000,0 - 17.000,0}{45.000,0} \times 100 = 62,22 \%$$

**(Día 3 y 12)**

$$\%DQO_{rem} = \frac{45.000,0 - 37.126,0}{45.000,0} \times 100 = 17,50 \%$$

- **Reactor 3**

**(Día 3 y 12)**

$$\%DQO_{rem} = \frac{46.000,0 - 39.352,0}{46.000,0} \times 100 = 14,45 \%$$

(Día 3 y 6)

$$\%DQO_{rem} = \frac{46.000,0 - 9.351,9}{46.000,0} \times 100 = 79,67 \%$$

**C.2 Cálculo del porcentaje de remoción para el primer arranque considerando un periodo de 8 días de operación**

- Reactor 1

(Día 2 y 4)

$$\%DQO_{rem} = \frac{16.840,0 - 16.120,0}{16.840,0} \times 100 = 4,27 \%$$

(Día 2 y 6)

$$\%DQO_{rem} = \frac{16.840,0 - 16.580,0}{16.840,0} \times 100 = 1,54 \%$$

(Día 2 y 8)

$$\%DQO_{rem} = \frac{16.840,0 - 16.710,0}{16.840,0} \times 100 = 0,77 \%$$

- Reactor 2

(Día 2 y 4)

$$\%DQO_{rem} = \frac{14.680,0 - 14.560,0}{14.680,0} \times 100 = 0,82 \%$$

- Reactor 3

(Día 2 y 4)

$$\%DQO_{rem} = \frac{15.040,0 - 14.200,0}{15.040,0} \times 100 = 5,58 \%$$

### C.3 Cálculo del porcentaje de remoción para el segundo arranque considerando un período de 20 días de operación

- Reactor 1

(Día 5 y 10)

$$\%DQO_{rem} = \frac{28.096,0 - 13.813,7}{28.096,0} \times 100 = 50,83 \%$$

(Día 5 y 15)

$$\%DQO_{rem} = \frac{28.096,0 - 24.520,0}{28.096,0} \times 100 = 12,73 \%$$

(Día 15 y 20)

$$\%DQO_{rem} = \frac{24.520,0 - 8.129,0}{24.520,0} \times 100 = 66,85 \%$$

- Reactor 2

(Día 5 y 10)

$$\%DQO_{rem} = \frac{25.129,0 - 8.618,4}{25.129,0} \times 100 = 65,70 \%$$

(Día 10 y 20)

$$\%DQO_{rem} = \frac{8.618,0 - 6.417,9}{8.618,0} \times 100 = 25,53 \%$$

**(Día 15 y 20)**

$$\%DQO_{rem} = \frac{31.966,0 - 6.417,9}{31.966,0} \times 100 = 79,92 \%$$

- **Reactor**  
**(Día 5 y 10)**

$$\%DQO_{rem} = \frac{25.027,0 - 16.240,0}{25.027,0} \times 100 = 35,11\%$$

**(Día 10 y 20)**

$$\%DQO_{rem} = \frac{16.240,0 - 5.195,4}{16.240,0} \times 100 = 68,01\%$$

## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	“Estudio de la biodegradabilidad de los extractos de yuca amarga proveniente de una cazabera artesanal mediante una digestión anaeróbica ”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CVLAC / E MAIL
Carlos Alfredo Coa García	CVLAC: V-17.409.646 EMAIL: carloalf602@hotmail.com
José Leonardo Velásquez García	CVLAC: V-17.172.974 EMAIL: jleonardo27@yahoo.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

**Biodegradación**

**Extractos de yuca**

**Digestión anaeróbica**

**Inóculo**

**Digestor anaeróbico**

### **METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUB ÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

## **RESUMEN (ABSTRACT):**

En el presente trabajo de investigación se planteó el estudio de la biodegradabilidad a través de un proceso biológico anaeróbico, donde las muestras tratadas fueron los extractos de yuca amarga obtenidos del proceso de la elaboración artesanal del cazabe, donde se consideró como zona de estudio Zurita perteneciente al municipio Sucre del estado Sucre, en una hacienda sin ninguna denominación comercial, donde se observó una buena cosecha de esta gran materia prima como lo son los tubérculos de yuca empleados para tal fin. Se realizó un muestreo de los extractos de yuca que son considerados un contaminante debido a su alto contenido de cianuro, componente nocivo para la vida humana y animal, donde se almacenaron en recipientes identificados para luego ser trasladados al laboratorio de la Universidad de Oriente donde se le realizaron los análisis fisicoquímicos. Primeramente se caracterizaron los extractos evaluándose los niveles de sólidos, obteniendo los siguientes resultados: sólidos totales 42,82 g/L, sólidos disueltos 36,35g/L, sólidos suspendidos 6,36 g/L, sólidos volátiles 30,01g/L, sólidos sedimentables 13,5 g/L, pH 4,38, temperatura 26,00 °C, DQO (demanda química de oxígeno) 35.647,48 mgO<sub>2</sub>/L, acidez 32,5 mg CaCO<sub>3</sub>/L y cianuro (CN<sup>-</sup>) 28,45 ppm. Para el tratamiento de estos extractos se utilizó un reactor anaeróbico por carga considerando una relación 1:2 de extracto de yuca y excretas de bovino homogenizadas a través de una agitación magnética con un tiempo de operación de 66 días, y un volumen de biogás desplazado de 153 mL, donde se obtuvo un lodo floculento con un pH de 8,12 que sirvió de inóculo para la biodegradabilidad de los extractos de yuca. Finalmente se planteó como alternativa una medida de tratamiento a través de unos reactores anaeróbicos de menor capacidad en un recipiente de 250 mL donde se monitorearon variables de control en cuanto a pH y DQO en mgO<sub>2</sub>/L de manera natural, pero debido a que no fue exitoso porque se mantuvieron los niveles de pH se utilizó como base comercial NaOH para controlar el contenido de ácidos presentes hasta un pH de 8,11 y un porcentaje de remoción para los diferentes reactores de : 71,06%(reactor 1), 74,46% (reactor 2) y 79,24 % (reactor 3) entre los 5 y 20 días de operación, para una relación de inóculo/extracto 50/100 mL, la cual se plantea como la mejor relación estudiada. Mediante los resultados obtenidos en este trabajo se pudo observar, que esta técnica se puede implementar como un sistema de pre tratamiento (bajo este tipo de condiciones) para la mejora del sistema de tratamiento de efluentes de esta casabera artesanal, con el fin de disminuir el impacto negativo que esta provoca en medio ambiente que le rodea.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**CONTRIBUIDORES:**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E-MAIL</b>				
<b>Alemán, Rafael</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU(X)</b>
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>e-mail:</b>				
<b>Ciarfella, Ana</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU(X)</b>
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>e-mail:</b>	atciarfella@gmail.com			
<b>Amundarain, Milena</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS(X)</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>e-mail:</b>	Amundarain.milena@gmail.com			

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

<b>2011</b>	<b>01</b>	<b>25</b>
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
<b>Tesis.Estudio_biodegradación_extractosdeyuca.doc</b>	<b>Aplicación/msword</b>

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K L M N O P  
Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4 5 6 7  
8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** (OPCIONAL)

**TEMPORAL:** (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

**Ingeniero Químico**

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

**Pregrado**

ÁREA DE ESTUDIO:

**Departamento de Ingeniería Química**

INSTITUCIÓN:

**Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

**“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización”**

**Carlos Alfredo Coa García**

**José Leonardo Velásquez García**

**AUTORES**

**Ing. Milena Amundaraín**

**Licdo. Rafael Alemán**

**Dra. Ana Teresa Ciarfella**

**TUTOR**

**JURADO**

**JURADO**

**Prof. Yraima Salas**

**POR LA COMISION DE TESIS**