



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y

DESARROLLO TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA

*“Estudio de codigestión de residuos orgánicos
agroindustriales para la producción y uso de biogás”*

TESIS DE GRADO

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA CON LA
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

P R E S E N T A

I.B.Q. Cinthia Elena Plascencia Rosales

Pedro Escobedo, Santiago de Querétaro, junio 2014

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	III
LISTA DE CUADROS.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS Y/ O NOMENCLATURA.....	VII
RESUMEN.....	X
1. INTRODUCCION.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
3. HIPOTESIS.....	8
4. JUSTIFICACIÓN.....	9
5. OBJETIVOS.....	10
6. FUNDAMENTACION.....	11
6.1.1. Hidrólisis.....	11
6.1.2. Acidogénesis.....	13
6.1.3. Acetogénesis.....	14
6.1.4. Metanogénesis.....	14
6.2. Productos de la digestión anaerobia.....	16
6.2.1. Biogás.....	16
6.2.2. Efluente (fertilizante orgánico).....	18
6.3. Factores que influyen en la digestión anaerobia.....	18
6.3.1. pH.....	19
6.3.2. Nutrientes.....	19
6.3.3. Luz.....	20

6.3.4.	Sólidos.....	20
6.3.5.	Temperatura	22
6.3.6.	Agitación	23
6.3.7.	Toxicidad.....	24
6.3.7.1.	Concentración de amoniaco	25
6.3.7.2.	Antibióticos	26
6.3.7.3.	Tiempo de retención.....	27
6.3.7.4.	Carga orgánica (ORL).....	27
6.4.	Co- digestión.....	28
7.	METODOLOGIA	30
7.1.	Plan de trabajo	30
7.2.	Recolección de muestras	32
7.2.1.	Residuos orgánicos agroindustriales	32
7.2.2.	Codigestantes.	32
7.2.3.	Inóculo.	33
7.3.	Análisis fisicoquímicos.....	33
7.4.	Condiciones ambientales del estudio.	33
7.5.	Equipo experimentales.	34
7.5.1.	Equipo experimental No.1.....	34
7.5.2.	Equipo experimental No.2-Eudiometro.	35
7.5.3.	Equipo experimental No.3- Biodigestor piloto.....	36
7.5.	Primera etapa:.....	37
7.5.1.	Caracterización inicial de las materias primas a utilizar en la co-digestión. ...	37
7.5.2.	Pruebas preliminares para la selección del co-digestante.....	38

7.6.	Segunda etapa: selección de mezcla y proporciones	38
7.7.	Tercera etapa: Codigestión en biodigestores piloto de 30L con cinéticas de alimentación seleccionadas.....	39
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
8.1.	Primera etapa:.....	41
8.1.1.	Caracterización inicial de las materias primas a utilizar en la codigestión. ...	41
8.1.2.	Pruebas preliminares para seleccionar el co- digestante.....	43
8.1.3.	Conclusiones parciales de la etapa 1.....	48
8.2.	Segunda Etapa: Selección de mezclas y proporciones.....	50
8.2.1.	Conclusiones parciales para la etapa 2.	59
8.3.	Tercera Etapa: Co- digestión en biorreactores piloto con cinéticas de alimentación seleccionadas.....	61
8.3.1.	Montaje.	61
8.3.2.	Arranque.....	62
8.3.3.	Cinética 1 de alimentación (2: EV/ 1: SR / 1: LA).....	65
8.3.4.	Cinética 2 de alimentación (2: EV/ 1: FV / 1: LA).....	69
8.3.5.	Comportamiento general de los digestores.....	73
9.	CONCLUSIONES GENERALES	74
10.	RECOMENDACIONES	78
11.	BIBLIOGRAFIA	80
12.	ANEXOS	84

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), así como también a la Dra. Linda Victoria González y al Ing. Arnulfo Terán por brindarme todas las facilidades para la realización de la presente investigación, por su incomparable ayuda y orientación, fundamentales para llevar a exitoso término el presente trabajo. Mi gratitud a mis coasesores M.C. Jesús Cárdenas Mijangos y a M.C. Carlos Hernández Benítez y sinodales por sus valiosas correcciones y aportes.

Al Postgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología (PYCYT) por haber organizado exitosamente este programa de postgrado “Maestría en Ciencia y Tecnología en Ingeniería Ambiental”. A todos los profesores y compañeros con los que compartimos la aula por la gran cantidad de conocimientos, experiencias y amistad que intercambiamos.

Igualmente mi agradecimiento para Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por darme todas las facilidades para ejecutar esta investigación y su invaluable apoyo económico.

Agradezco a toda mi familia y amigos que siempre ha estado pendiente del desarrollo de esta investigación y por ser mi apoyo permanente en cada una de las actividades que realizo.

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado en especial al motor de mi vida, Marcial Suárez Cabrera ya que gracias a su amor, apoyo y ayuda me fue posible alcanzar esta meta, y en memoria de mi Cony por sus entrañables tardes de amor y compañía

LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIONES	Página
Ilustración 1. Fotografía del analizador portátil de biogás.	86
Ilustración 2. Panel de control de los biodigestores (pantalla de control de temperatura °C, encendido y apagado de temperatura y agitación.	87
Ilustración 3. Fotografías del equipo de mezcla completa de la parte externa y de la parte interna.	88
Ilustración 4. Fotografías del equipo de mezcla completa de la parte externa y de la parte interna.	89

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS	Página
Figura 1: Representación esquemática del paso de la materia orgánica por las 4 etapas de la digestión anaerobia.	15
Figura 2: Equivalencias de 1 m ³ de biogás con contenido de 70% de metano y 30% de dióxido de carbono con otras fuentes de energía. Fuente: (SEGOB 2012).....	17
Figura 3: Influencia de la temperatura en el tiempo de digestión.	23
Figura 4: Esquema de las etapas de trabajo. 1) Procedimiento para la selección del codigestante, 2) procedimiento para la selección de la mejor mezcla en estabilidad y producción de biogás, 3) Procedimiento de evaluación de las mezclas en biodigestores (FP y MC).....	31
Figura 5: Representación esquemática del sistema experimental No. 1: (1) Sistema de calefacción [30-35°C], (2) Baño de agua, (3) Sistema de digestión y captación de biogás, (4) Mezcla de codigestión en estudio, (5) Solución barrera NaOH y (6) Envase volumétrico graduado.....	35
Figura 6: Imagen del sistema experimental No. 2: (a1) Puerto de muestreo y purga de biogás, (a2) tanque de reserva de solución barrera con posición ajustable, (a3) tubo graduado para la transferencia del gas, (a4) Digestor de 500ml, (a5) válvula conectora entre el tanque de reserva y el tubo graduado, (b1) Sistema de calefacción y agitación, (b2) Baño de agua.....	36
Figura 7: Imagen del sistema experimental No. 3: (a1 y b1) Panel de control de agitación y temperatura, (a2y b2) puesto de muestreo y medición de biogás, (a3y b3) válvula de muestreo y purga, (a4 y b4) sistema de agitación, (a5 y b5) tanque de 30 L.....	37
Figura 8: a) fotografía del sistema de medición de metano por desplazamiento de agua y b) fotografía de la trampa de CO ₂ (solución barrera de NaOH) instalada en cada biodigestor.....	39

Figura 9: a) fotografía del equipo No.1 se muestra el biodigestor con mezcla con el sistema de captación de biogás instalado, dentro del baño de temperatura (30-35 °C), b) fotografía de la trampa de CO₂ (solución barrera NaOH) instalada..... 43

Figura 10: Plan de trabajo para evaluar las mezclas en los biodigestores..... 60

Figura 11: Fotografías del montaje del biodigestor piloto de flujo pistón..... 61

LISTA DE TABLAS

TABLAS	Página
Tabla 1. Estudios realizados por otros investigadores acerca de la codigestión anaerobia..	4
Tabla 2. Clasificación de tipos de biodigestores comúnmente usados para la codigestión anaerobia.....	7
Tabla 3. Exoenzimas y sustratos.....	12
Tabla 4. Composición común del biogás a partir de diferentes residuos orgánicos	17
Tabla 5. Opciones de recolección y manejo de residuos en función a los sólidos totales. .	21
Tabla 6. Rangos de temperatura y tiempo de digestión anaerobia	22
Tabla 7. Concentración de amoníaco y su efecto en el proceso de digestión anaerobia. ..	25
Tabla 8. Algunos residuos sólidos y semisólidos utilizados para la codigestión anaerobia y rendimientos reportados en literatura.	28
Tabla 9. Características relativas para la codigestión de algunos residuos de interés en este estudio, las flechas con sentidos hacia arriba indican buena concentración, las flechas con sentidos hacia abajo indican una carencia, las flechas con sentido diferentes indican un posible interés en la mezcla al compensarse la carencia relativa.....	29
Tabla 10. Condiciones ambientales del CIDETEQ.....	33
Tabla 11. Ensayos realizados para evaluación de codigestante (Excreta de vaca y Excreta de cerdo).....	38
Tabla 12. Ensayos realizados para la evaluación de mezclas con mejor comportamiento.	39
Tabla 13. Resultados de la caracterización de residuos de residuos agroindustriales y codigestantes.....	41
Tabla 14. Resumen de los resultados de la codigestión de las mezclas seleccionadas para la evaluación de Excreta de vaca (EV) y excreta de cerdo (EC) como codigestante.....	44
Tabla 15. Resultados de la evaluación en las mezclas control (sin inóculo).....	52
Tabla 16. Resultados de la evaluación en las mezclas con inóculo.....	52
Tabla 17. Rendimiento de producción de biogás de los sistemas evaluados.....	57

Tabla 18. Caracterización de la mezcla inoculadora final (3: EV/ 1: FV/ 1: SR/ 3: LA/ Agua).	62
Tabla 19. Parámetros de operación del biodigestor de mezcla completa (MC).....	63
Tabla 20. Parámetros de operación del biodigestor de flujo pistón (FP).	63
Tabla 21. Resumen del comportamiento de la cinética 1 en los biodigestores	66
Tabla 22. Resumen de resultados de la cinética 1 de producción de biogás.	68
Tabla 23 . Resumen del comportamiento de la cinética 2 en los biodigestores.	69
Tabla 24. Resumen de resultados de la cinética alimentación 1.	72
Tabla 25. Resumen de comportamiento de lo biodigestores a lo largo del estudio.	74
Tabla 26. Errores de medición del analizador.....	86

LISTA DE SÍMBOLOS Y/ O NOMENCLATURA

%	Por ciento
°C	Grados centígrados
L	Litros
mL	mililitros
Kg	Kilogramos
Atm	Atmosfera
Rpm	Revoluciones por minuto
m³	Metros cúbicos
STV	Sólidos volátiles totales
STV_r	Sólidos volátiles totales reducido
ST	Sólidos totales
DQO	Demanda química de oxígeno
DQO_r	Demanda química de oxígeno reducido
DQO_s	Demanda química de oxígeno soluble
DQO_t	Demanda química de oxígeno total
NH₃	Amonio
CH₄	Metano
FP	Flujo pistón
MC	Mezcla completa
Nm	Nanómetros

RESUMEN

La codigestión anaerobia es una alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos agroindustriales (ROA) pues combina diferentes sustratos orgánicos para mejorar el balance de nutrientes, recuperan energía renovable (biogás) y convierte los ROA en fertilizante. Los ROA seleccionados: frutas y verduras (FV), suero de leche (SR), Paja (PJ), como codigestantes se seleccionaron excreta de vaca (EV) y excreta de cerdo (EC), lodos anaerobios (LA) se usaron de inóculo, todos son caracterizados en parámetros de pH, %ST, %SVT. El estudio se dividió en 3 etapas con parámetros de operación de temperatura de $35 \pm 5^\circ\text{C}$, $\text{ST} < 15\%$, agitación y pH cercanos a la neutralidad; en la etapa 1 se seleccionó el codigestante evaluando la estabilidad y producción de biogás de EV y EC en varios ensayos, con un tiempo de retención de (THR) 28 días, seleccionando la excreta de vaca (EV), al tener mayor estabilidad y producción total de biogás ($0.86 \text{ m}^3/\text{Kg SVT}_r$) comparadas con las excretas de cerdo ($0.18 \text{ m}^3/\text{Kg SVT}_r$). En la etapa 2 se evaluaron 10 mezclas de ROA con el codigestante seleccionado con y sin adición de inóculo, y un blanco (EV/H₂O) en biodigestores con 440 gr y 220 gr de la mezcla a evaluar, con un THR de 30 días. Se seleccionó la mezcla b1 (2: EV/1: SR/1: LA) y la mezcla b3 (2: EV/1: FV/1: LA) las cuales presentaron buena estabilidad, y valores de producción de metano (232 y 222 L/Kg SVT respectivamente) mayores respecto al blanco EV/Agua ($128 \pm 9 \text{ L/Kg SVT}$). En la etapa 3 se evaluaron las 2 mezclas seleccionadas en 2 digestores de 30 L, uno de Mezcla completa (MC) y otro de Flujo pistón (FP) con ST de trabajo de $\text{MC} \leq 7\%$ y $\text{FC} \leq 7\%$, contenían 26 Kg de una mezcla inoculadora (3: Excreta de vaca/ 1: residuos vegetales/ 1: suero de leche/ 3: Lodos anaerobios/ Agua), con carga orgánica (ORL) de $0.84 \text{ Kg SVT}/\text{m}^3\cdot\text{d}$, y $\text{ST}=4\%$ para el biodigestor MC y carga orgánica (ORL) de $1.11 \text{ Kg SVT}/\text{m}^3\cdot\text{d}$, $\text{ST}=7\%$ para FP. Se obtuvieron rendimientos de metano de 190 L/Kg SVT para MC y 256 L/Kg SVT para FC. En el día 52 se dio inicio a la cinética 1 al adicionar 2: Excreta de Vaca/ 1: Suero de Leche / 1: inóculo, Agua necesaria para la dilución, con parámetros de operación: $\text{THR}= 40$ días, $\text{ORL}= 0.80 \text{ Kg SVT}/\text{m}^3\cdot\text{d}$, $\text{ST}=5\%$, para MC y $\text{ORL}= 1.00 \text{ Kg SVT}/\text{m}^3\cdot\text{d}$, $\text{ST}=7\%$, para FP. En esta etapa se obtuvieron rendimientos de metano de 23 y 45 L/kg SVT para

MC y FC respectivamente con una composición máxima de 32% de metano en ambos digestores. En el día 98 dio inicio a la cinética 2 al adicionar 2: Excreta de Vaca/ 1: Residuos de frutas y verduras / 1: inóculo, Agua necesaria para la dilución, con parámetros de operación: THR= 40 días, ORL= 0.40 Kg SVT/ m³*d, ST=2% para MC y, ORL= 0.87 Kg SVT/ m³*d, ST=7% para FP. Se obtuvieron rendimientos de metano de 27 y 36L /kg SVT y reducciones de DQO 17 y 32% para MC y FP respectivamente se obtuvo una composición máxima de 58% de metano en ambos digestores.

1. INTRODUCCION

Los altos costos de producción de los combustibles fósiles ha derivado en su alza de precio, los problemas ambientales asociados y la necesidad creciente del sector industrial de una producción limpia y amigable con el ambiente, ha contribuido a la implementación de tecnologías nuevas para obtener combustibles renovables que permiten obtener importantes beneficios económicos, ambientales y energéticos.

La biomasa es una valiosa energía alternativa a los combustibles fósiles, puede ser convertida en gran variedad de formas de energía. Contiene gran cantidad de material biodegradable y puede causar importantes daños ambientales, si se dispone en un relleno, como efecto invernadero, emisión de olores molestos producto de la acumulación de excretas y orina sin tratar, infiltración y escurrimiento de los lixiviados a los recursos de agua (Rowena T. y Ruihong Z., 2011).

Entre los métodos tecnológicos existentes para convertir biomasa en bioenergía, la conversión biológica (digestión anaerobia) provee una efectiva solución no solo para producción de energía en forma de gas metano (biogás), sino también como recurso de recuperar y tratar desperdicios (Converti y col., 2009). Lo que representa una solución a las problemáticas planteadas, generación de energía limpia de bajo costo y aprovechamiento de residuos. Por lo que el reto para el siglo 21 en términos de estrategia de manejo de residuos y energía es la transformación de los residuos en el recurso del futuro (Qamaruz 2010).

El uso de biocombustibles es ya una realidad, sin embargo, todavía existen factores a mejorar tanto para su obtención como para su aprovechamiento. En este proyecto se busca estudiar y proponer un sistema de codigestión anaerobia para la generación de biogás a partir de residuos orgánicos agroindustriales, para su uso directo como combustible.

2. ANTECEDENTES

2.1. Situación en México

Aplicaciones bioenergéticas son totalmente competitivas y constituyen complementos necesarios y estratégicos de los combustibles fósiles. En la actualidad la bioenergía constituye el 77% del consumo de los recursos energéticos renovables en el mundo. Según Masera (2011) en el año 2030, la bioenergía podría abastecer hasta un 16% del consumo de energía en México y permitir una reducción anual de emisiones de 110 Mt de CO₂ a la atmósfera.

En México, se generan alrededor de 41 millones toneladas de residuos de que constituyen unas 112 millones de toneladas al año, según datos de la SEMARNAT (2012). Hasta 2009 el porcentaje de residuos sólidos urbanos recuperados para su tratamiento de los sitios de confinamiento en el país fue de sólo 11%, según datos de la UNAM. Ello pese a que México, como miembro de la OCDE, suscribe el compromiso ambiental de reducir, reutilizar y reciclar (Universia México, 2011). Hacia 2012 la mayoría de los desechos en México (más del 52.4%, de acuerdo con la SEMARNAT) se componía por materia orgánica, como residuos de comida, hojas, cáscaras, etc. El 13.8% era papel o cartón, el 6% vidrio, el 10.9% plástico, el 3.4% metales y el 1.4% textiles.

La SENER considera que existe un potencial de 3,000 MW para generación de energía eléctrica con biogás proveniente de la recuperación y aprovechamiento del metano a partir de residuos animales, residuos sólidos urbanos (RSU) y tratamiento de aguas negras (SENER, 2010). Aunque aportan un potencial pequeño, su desarrollo es muy importante porque está inmediatamente disponible y su aprovechamiento ayuda a reducir la contaminación de las aguas y la atmósfera (Masera 2011).

En 2010 existían en México, 721 biodigestores, de los cuales 367 estaban en operación y 354 en construcción (FIRCO, 2011). El 8% de las granjas porcícolas cuentan con biodigestores, de los cuales el 20% dispone de motogeneradores con 70% en funcionamiento. La SAGARPA y FIRCO, diseñaron el Proyecto para apoyar la construcción de biodigestores hasta para quienes generen electricidad. Este apoyo es para el sector rural, con unidades productivas lecheras o porcinas cuyo estiércol pueda ser utilizado para la producción de biogás para la generación de energía térmica o eléctrica.

2.2. Residuos orgánicos.

Varios grupos de investigación han desarrollado procesos de codigestión utilizando diferentes sustratos y diferentes parámetros como se muestra en la Tabla 1. En este estudio, serán usados como biomasa excretas de vaca y cerdo, residuos de frutas y verduras, suero de leche y paja y rastrojos como materia prima para la producción de biogás, los cuales fueron seleccionados por ser residuos de fácil acceso para el área en estudio en la cual se centra este trabajo (Parque Industrial Oaxaca 2000, Oaxaca, México).

En lo referente a excretas de animales la degradación dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido. Lara e Hidalgo (2011) mencionan que los valores de producción de rendimiento biogás de excretas presentan grandes diferencias esto debido al sin número de factores que intervienen que hacen difícil la comparación de resultados. Una aplicación inadecuada de la excreta animal a la tierra puede dar lugar a producción de gas de efecto invernadero, la contaminación del suelo y aguas subterráneas. El potencial de metano de estos residuos proviene de la digestión de los componentes orgánicos en las heces y en la paja utilizada como material de cama, que son principalmente: hidratos de carbono, proteínas y lípidos, (Qamaruz 2010). El nitrógeno contenido en las excretas generalmente es en forma de amoníaco y en nitrógeno orgánico, lo que según Li y col. (2011), la hace una materia prima de partida

ideal para la codigestión con otros residuos debido a su alta capacidad de amortiguación, lo cual es crítico para que el digestor anaeróbico logre un rendimiento estable.

Tabla 1. Estudios realizados por otros investigadores acerca de la codigestión anaerobia.

Sustrato	Condiciones de digestión	Biodigestor	Producción de biogás m ³ / kg SVT	Referencia
Residuos orgánicos industriales (RO), excreta de cerdo (EC), residuos de matadero (R), Residuos de frutas y verdura (FV)	Mesofílica (30±5°C), THR: 40 días	Continuo V: 3L Agitación 200 rpm.	RO / EC 0.5 RO/EC/R 0.6 RO/EC/R/ FV 0.7	(Murto y col., 2004)
Lodos (LA), Frutas y verduras de la fracción orgánica (FV)	Mesofílica (30±5°C), THR: 40 días	Continuo V:3L Agitación 200 / 80 rpm	0.6-0.7	(Gómez y col., 2006)
Excreta de pollo (EP), vaca (EV) y cerdo (EC)	Mesofílica (30±5°C), THR: 30 días	Lote V:17L Agitación 40 / 1200 rpm	EP 0.12 EV 0.04 EP / EC 0.13	(Fanzonni 2009)
Excreta de pollo (EP), vaca (EV), cerdo (EC) y residuos de pasto (RP)	Mesofílica (30±5°C), THR: 62 días	Lote V:1 L	EC / RP 0.37 EV / RP 0.028 EP / RP 0.002	(Ahn y col., 2010)
Excreta de vaca(EV), residuos de comida (RC), lodos anaerobios (LA) como inóculo	Mesofílica (30±2°C), THR: 13 días	Semicontinuo, 2 fases, V:3.5L Agitación 200 / 80 rpm	0.051	(Li y col.,2011)
Frutas y verduras (FV) y residuos de comida (RC), y lodos anaerobia (LA) como inóculo	Mesofílica (30±2°C), THR: 178 días	Continuo V:4L Agitación 200 / 80 rpm	0.43	(Lin, y otros 2011)
Excreta de vaca (EV), residuos de jardín (RJ), Jugo de frutas (JF) y lodos anaerobios (LA) como inóculo	Temperatura ambiente	Lote V:70 mL	EV/LA/RJ 0.027 EV/LA/JF 0.026	(Venkates 2011)
Paja (P) y purina de cerdo (EC)	Mesofílica (35±5°C), THR: 189 días	Continuo V: 1 m ³	EC ↑ / P 0.23 EC ↓ / P 0.012	(Moussulini 2012)

Los residuos de frutas y vegetales son producidos en grandes cantidades en mercados, supermercados, restaurantes, industrias procesadoras etc. Constituyen una fuente viable para la codigestión anaerobia pues son altamente biodegradables (incluye azúcar, celulosa, hemicelulosa y lignina), sin embargo producen intermediarios que pueden inhibir la metanogénesis como consecuencia de que presentan un pH ácido, lo que al ser

digeridos individualmente se ve reflejado en una baja estabilidad y baja eficiencia de la operación (Veyna 2007).

La calidad y diversidad de microorganismos encontrados en los lodos anaerobios depende de la naturaleza y características de las aguas residuales. Los lodos son usados como fuente auxiliar de microorganismos, ya que son ricos en macro y micronutrientes. Aunque las enzimas hidrolíticas inherentes a los lodos pueden descomponer polímeros complejos, la degradación de forma individual es rara vez efectiva, debido a que las membranas de las células individuales no son significativamente degradadas en la digestión anaeróbica y a su baja relación de nutrientes C/N (6/1-16/1) se considera un problema serio para la digestión anaerobia (Achu 2012)

Las pajas de cultivos, especialmente las de cereales, se caracterizan por un reducido valor nutritivo y bajo nivel de consumo, debido al escaso nivel de proteína y alto contenido de fibra o pared celular. La pared celular de la paja y de los rastrojos está compuesta principalmente de celulosa y la hemicelulosa, dependiendo de la edad del material vegetal. La hidrólisis de estos componentes de la pared celular suelen producir azúcares que se convierten fácilmente en metano durante la digestión anaerobia (Ahn y col., 2010). Por otro lado otro uno de sus principales componentes es la lignina, la cual debido a su compleja estructura y varios factores puede combinarse con los carbohidratos y reducir la digestibilidad, si no se realiza un pretratamiento. La composición química del rastrojo de maíz contiene poca materia nitrogenada (4.5% de proteína bruta promedio). La pared celular presenta un mayor porcentaje de hemicelulosa que de celulosa. Su bajo porcentaje de lignina lo hace ser más digestible que las pajas de cereales, por lo tanto es más rico en azúcares solubles (Manterola y col., 1999).

Un subproducto de la industria láctea es el suero de leche, el cual es un líquido remanente luego de la precipitación de la caseína en la leche en el proceso de elaboración de quesos. Contiene altos contenidos de proteína, lactosa, minerales y es altamente biodegradable

(99%). Comúnmente el suero láctico es considerado un producto contaminante, generado por las industrias de lácteos, ya que es vertido en ríos u otros cuerpos de agua. Es considerado una nueva opción para las tecnológicas anaerobias, con las que se logran altos tiempos de retención de sólidos y bajos tiempos de retención hidráulico, lo que permite sistemas de digestión anaerobia más pequeños (Vísquez 2013).

2.3. Descripción de biodigestores utilizados para la digestión anaerobia.

Dentro de la variedad de procesos existentes en las tecnologías anaerobias la producción de biogás depende de la materia introducida al sistema, parámetros y tipo de biodigestor empleado. De ahí la importancia de seleccionar el biodigestor adecuado en el sistema de codigestión anaerobia. La clasificación de biodigestores en la literatura es muy amplia y suelen diferir según las fuentes. Por lo que se ha realizado un compendio mostrado en la Tabla 2 de la clasificación de varios autores de los digestores comúnmente usados.

Los biodigestores de mezcla completa o CSTR, constituyen el diseño más habitual cuando se tratan residuos de más de 3% de sólidos. Empleándose principalmente en el tratamiento de residuos líquidos de procedencia ganadera, industrial y urbana (Campos y col. 2012). La carga al reactor puede hacerse de forma continua o discontinua, como se muestra en la Tabla 2. Comparativamente a otros reactores, el tiempo de retención necesario es alto, debido a que la concentración de cualquier especie, que se mantiene en el reactor en régimen estacionario, y el efluente depurado se compone de sustancia digerida, sustancia fresca y una fracción de población bacteriana activa (IDEA 2007).

El reactor de flujo pistón es la más sencilla de todas las tecnologías anaerobias por lo que su coste es notablemente bajo. Su configuración alargada impide que la carga líquida inicial y el efluente se mezclen (IDEA 2007). La degradación de los residuos transcurre a medida que transitan a lo largo del digestor. Presentan mayor complejidad tecnológica o

de operación, por lo que únicamente resultan interesantes para pequeños volúmenes de reacción (Campos y col. 2012).

Tabla 2. Clasificación de tipos de biodigestores comúnmente usados para la codigestión anaerobia.

Biodigestor	Carga	Intensidad de mezcla	Manejo de sustrato	Manejo bioquímico	Características
Filtro Anaerobio	Fija	Continua / semicontinua	Lecho en película	Una etapa Dos etapas	Bacterias anaerobias fijadas a la superficie de un soporte inerte
UASB	Fija /recirculada	Continua / semicontinua	Lecho de lodos		Favorece la floculación de bacterias, formando gránulos por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, siempre que en la parte superior exista un buen separador sólido biomasa/liquido/gas.
Lecho fluidizado	Fija	Continua / semicontinua	Lecho fluidizado		Bacterias son fijadas en películas, son fluidizadas mediante el flujo ascendente adecuado del fluido. (Recirculación)
Mezcla completa (CSTR)	No fija	Continua-semicontinua discontinua	Lecho fluidizado / sin lecho fluidizado		Mantiene una distribución uniforme mediante un sistema de agitación.
Flujo pistón	No fija	Continua / semicontinua			Su configuración impide que la carga líquida inicial y el efluente se mezclen. La degradación transcurre a medida que transitan a lo largo del digestor.

Fuente: Elaboración del autor con información de (IDEA 2007), (Avendaño 2010), (Deublein y Steinhauser, 2008), (Gerardi 2003) .

3. HIPOTESIS

Los residuos orgánicos agroindustriales como residuos de frutas y verduras, suero de leche, pajas y rastrojos son factibles para su uso en un sistema de codigestión con excretas (vaca o cerdo), ya que pueden proveer de nutrientes necesarios para mejorar la digestión anaerobia y obtener una producción de biogás con volumen y calidad suficiente para usarse directamente como combustible y emplearse en diversas tareas del sector agrícola e industrial, mejorando el abastecimiento energético; y obteniendo subproductos que podrían ser utilizados como fertilizante orgánico, minimizando así una fuente de contaminación patógenos y malos olores.

4. JUSTIFICACIÓN.

México ocupa uno de los primeros lugares en la generación de residuos orgánicos de América Latina pues se producen 20 millones de toneladas anuales (de la agricultura, agroindustriales, crianza de animales y actividades forestales) que representan un problema sanitario.

Por otro lado el alza de los precios de los combustibles fósiles afecta el crecimiento y desarrollo del área industrial por los altos costos energéticos, aunado a la creciente necesidad de este sector por una producción limpia.

Por lo tanto el sector industrial busca la implementación de nuevas tecnologías como la codigestión anaerobia, que permite aprovechar los residuos orgánicos sólidos y semisólidos del sector agroindustrial, como materia prima en la producción de energía (biogás), evitando así su problemática ambiental, produciendo energía limpia y sub-productos con valor agregado (fertilizante orgánico). Obteniendo importantes beneficios económicos, sobre todo en aquellas industrias con los altos costos energéticos que ven en esta tecnología una fuente de energía auxiliar para sus procesos de producción.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general:

Estudiar y evaluar los parámetros y características de un sistema de codigestión a partir de residuos orgánicos agroindustriales y excretas de animales para la generación de biogás, y su factibilidad como combustible para ser empleado en diversas tareas del sector agrícola e industrial.

5.2. Objetivo particulares:

- Seleccionar el mejor codigestante (excretas vaca y cerdo) en estabilidad y producción de volumen biogás, para un sistema de codigestión a partir de residuos orgánicos agroindustriales.
- Evaluar mezclas para un sistema de codigestión anaerobia variando parámetros (% de mezcla de residuos orgánicos, codigestor, inóculo, %ST, pH y relación C/N), para seleccionar las mezclas con mejor estabilidad y producción de volumen de biogás.
- Evaluar las mezclas con la mejor proporción en residuos orgánicos agroindustriales, codigestante e inóculo en biodigestores a escala de 30 L, para analizar y proponer los parámetros para el comportamiento óptimo del proceso de producción y calidad de biogás.

6. FUNDAMENTACION

6.1. Digestión anaerobia

Es un proceso bioquímico, que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno de forma común en la naturaleza, este proceso se encuentra en el tracto digestivo de la mayoría de los animales incluidos los humanos, en pantanos, en la profundidad de océanos, en cuevas, y en capas profundas de la materia orgánica.

La digestión anaerobia consta de cuatro fases como lo muestra la Figura 1 las cuales son llevadas a cabo por un grupo específico de bacterias, estas bacterias llevan un proceso catabólico que rompe compuestos de gran tamaño (Carbohidratos, proteínas y grasas), en elementos más pequeños (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos), y como producto final se obtiene un sustrato inocuo más estable y una mezcla de gases (Metano y dióxido de carbono principalmente) conocido como biogás.

5.1. Etapas de la digestión anaerobia

5.1.1. Hidrólisis

De manera simple Qamaruz (2010), define la hidrólisis como la división (lisis) de un compuesto con agua (hidro), por tanto, la hidrólisis significa la solubilización de partículas de materia insoluble y la descomposición biológica de los polímeros orgánicos (carbohidratos, proteínas y grasas) a monómeros o dímeros que pueden pasar a través de la membrana celular (Ahning 2003). Las bacterias hidrolíticas (anaerobios y anaerobios facultativos) son microorganismos capaces de lograr la rotura de los enlaces únicos de los polímeros y asimilar la materia orgánica como fuente de nutrientes. Los anaerobios facultativos desempeñan un papel vital en este primer paso, ya que consumen la mayor parte del oxígeno introducido durante la alimentación del reactor o digester (Achu 2012).

Algunos ejemplos de bacterias hidrolíticas capaces de producir enzimas extracelulares (hidrolasas) capaces de romper enlaces complejos de los polímeros, se observan en la Tabla 3. La hidrolisis de carbohidratos tiene lugar en unas pocas horas; la de proteínas y lípidos tardan varios días (Avendaño 2010).

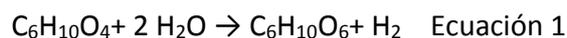
Tabla 3. Exoenzimas y sustratos.

Sustrato degradado	Exoenzima necesaria	Ejemplo	Bacteria	Producto
Polisacáridos	Sacarolítica	Celulasa	<i>Celulomonas</i>	Azúcares Simples
Proteínas	Proteolítica	Proteasa	<i>Bacillus</i>	Aminoácidos
Lípidos	Lipolítica	Lipasa	<i>Micobacterium</i>	Ácidos grasos

FUENTE: (Gerardi 2003)

La hidrólisis puede ser considerada una etapa limitante de la digestión anaerobia, por la velocidad de bioconversión de sustratos, pues al acumularse inhibidores como ácidos grasos volátiles, concentración de oxígeno y nitrato afectan a la población bacteriana, (Avendaño 2010).

Es muy difícil describir la cinética del proceso ya que la hidrólisis de un sustrato insoluble complejo, depende de muchos parámetros diferentes, tales como el tamaño de partícula, el pH, la producción de enzimas, difusión y adsorción de las enzimas a las partículas (Ahning 2003). La fórmula química aproximada para residuos sólidos orgánicos es $C_6H_{10}O_4$. La reacción de la hidrólisis según Veyna (2007), se analiza tomando como base un azúcar simple en este caso la glucosa se representa por la siguiente reacción:



5.1.2. Acidogénesis

Después de la hidrólisis continúa la acidogénesis, en este proceso, las bacterias acidogénicas transforman los productos de la hidrólisis en ácidos grasos volátiles (propionico, fórmico, láctico, butírico o succínico), de cadena corta, compuestos orgánicos simples, las cetonas (glicerol y acetona) y alcoholes (etanol y metanol). La acetogénesis junto con la hidrólisis limita el proceso global porque la velocidad de crecimiento de los microorganismos que intervienen es generalmente muy lenta. Las concentraciones específicas de los productos formados en esta etapa varían con el tipo de bacterias y las condiciones de los cultivos, tales como la temperatura y pH (Veyna 2007). Las bacterias que llevan a cabo este proceso son conocidas como bacterias sintróficas obligadas que se caracterizan por su imposibilidad de crecer en un cultivo puro. Necesitan asociarse estrechamente con microorganismos consumidores de H₂. Las bacterias pertenecen a diversos géneros como *Acetobacterium*, *Acetogenium* y *Clostridium* (H. Robalio 2011). Otro grupo a considerar son las bacterias desnitrificantes que obtienen energía de compuestos orgánicos, compuestos de azufre reducidos y H₂, con nitratos como aceptores finales de electrones, el género más común es *Pseudomonas*, que junto con las *Enterobacterias* se les atribuye el rol de la remoción de oxígeno del sistema (H. Robalio 2011). Las reacciones típicas propuestas por Veyna (2007), en las etapas generadoras de ácidos se muestran en la Ecuación 2 (glucosa se convierte a etanol) y en la ecuación 3, (la glucosa se transforma en propianato):

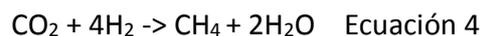


5.1.3. Acetogénesis

La acetogénesis se refiere a deshidrogenaciones acetogénicas, específicamente a la oxidación anaerobia de los ácidos grasos de cadena larga y corta (volátiles). Bacterias estrictamente anaerobias que reducen protones (productoras de hidrógeno) llevan a cabo la oxidación anaerobia de los ácidos grasos. Bajo condiciones normales, la presencia del hidrógeno en la solución inhibe la oxidación, por lo tanto el papel de hidrógeno como intermediario es de importancia crítica a las reacciones de DA, (Ahning 2003). La reacción procede solamente si la presión parcial de hidrógeno es bastante baja para permitir la conversión termodinámica. Esta baja presión es posible gracias a una relación simbiótica entre los acetógenos y los metanógenos hidrogenotróficos, (Achu 2012). La acumulación de los ácidos orgánicos en el sustrato en la etapa ácida causa que el pH disminuya. Esto es benéfico para las bacterias acidogénicas y acetogénicas que prefieren un ambiente levemente ácido, (pH de 4.5 a 5.5) y son menos sensibles a los cambios en la corriente entrante de la alimentación, pero es negativo para las bacterias implicadas en la etapa siguiente de metanogénesis (Veyna 2007) .

5.1.4. Metanogénesis

Las bacterias metanogénicas se clasifican según los sustratos que pueden degradar hidrogenotróficas: producen metano a partir de H₂ y CO₂ (Ecuación 4) y acetoclásticas; producen metano y CO₂ a partir de acetato, (Ecuación 5). El mayor número de especies de bacterias metanogénicas pertenecen al primer grupo, los más frecuentes son *Methanobacterium*, *Methanospirillum* y *Methanobrevibacter* (H. Robalio 2011).



Los Metanogénicos son extremadamente sensibles a la temperatura, la tasa de carga, las fluctuaciones de pH y se inhiben fácilmente por gran número de compuestos. Un número muy limitado de compuestos orgánicos se utilizan como fuentes de carbono y energía para apoyar el crecimiento de bacterias metanogénicas. Hasta el momento, CO₂, CO, ácido fórmico y acético, metanol, metilaminas y sulfuro de dimetilo se han identificado como sustratos para metanogénesis. Casi el 65-70% del metano producido en los digestores anaerobios proviene del acetato (Gerardi 2003).

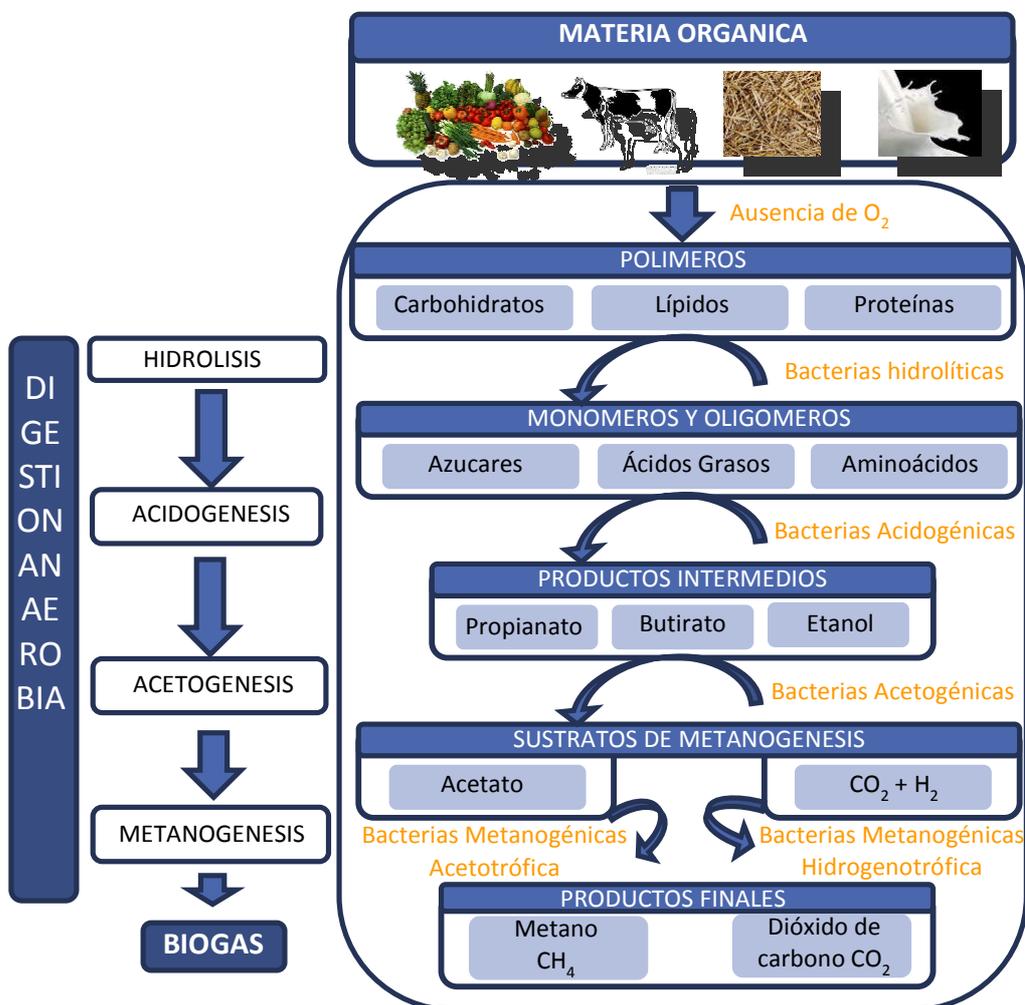
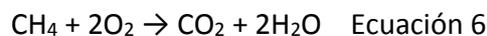


Figura 1. Representación esquemática del paso de la materia orgánica por las 4 etapas de la digestión anaerobia.

5.2. Productos de la digestión anaerobia

5.2.1. Biogás

Es una mezcla de gases flamables generados por un grupo de bacterias anaerobias específicas en la descomposición de compuestos orgánicos (digestión anaerobia). Según (IDEA 2007), la mezcla generalmente contiene de 50-70% de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), junto con estos algunas trazas de hidrógeno (H₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S). La composición real del biogás varía según las condiciones de producción y del tipo de sustrato, en la Tabla 4, se observa la composición común de biogás a partir de diferentes residuos orgánicos. El metano es el componente más deseable en el biogás, ya que enriquece el valor combustible del gas. El metano es un gas natural inflamable, inodoro y se quema limpiamente (Ecuación 6). Metano puro tiene un poder calorífico de 10 Kw·h/m³ (SEGOB 2012).



Cuando el metano se mezcla con dióxido de carbono que se produce en un digestor anaeróbico, su valor de calor disminuye significativamente. El valor de calor de biogás es aproximadamente 5-6 Kw·h/m³, (SEGOB 2012).

Aunado al bajo poder calorífico por el CO₂ la presencia de ácido sulfhídrico H₂S dificulta su aplicación directa (por su naturaleza corrosiva). Como resultado la limpieza del biogás juega un papel crucial, pues al someterse a un proceso de purificación y mejorar su contenido de metano puede ser usado como un combustible muy versátil, y por lo tanto podría generar energía eléctrica. La composición real del biogás varía según las condiciones de producción y del tipo de sustrato. En la Figura 2 se muestran diferentes equivalencias con otras fuentes de energía.

Tabla 4. Composición común del biogás a partir de diferentes residuos orgánicos

Gases	Desechos agrícolas	Lodos cloacales	Relleno sanitario	Propiedades
Metano	50-80%	50-80%	45-65%	Combustible
Dióxido de carbono	30-50%	20-50%	34-55%	Acido, asfixiante
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo, reduce valor calorífico
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-1%	Combustible
Sulfuro de hidrógeno	100-700 ppm	0-1%	0.5-100ppm	Corrosivo tóxico, oloroso
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Corrosivo
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%	Trazas	Tóxico
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-20%	Inerte
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-5%	Corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	5ppm	Corrosivo oloroso

Fuente: (Carrillo 2004)

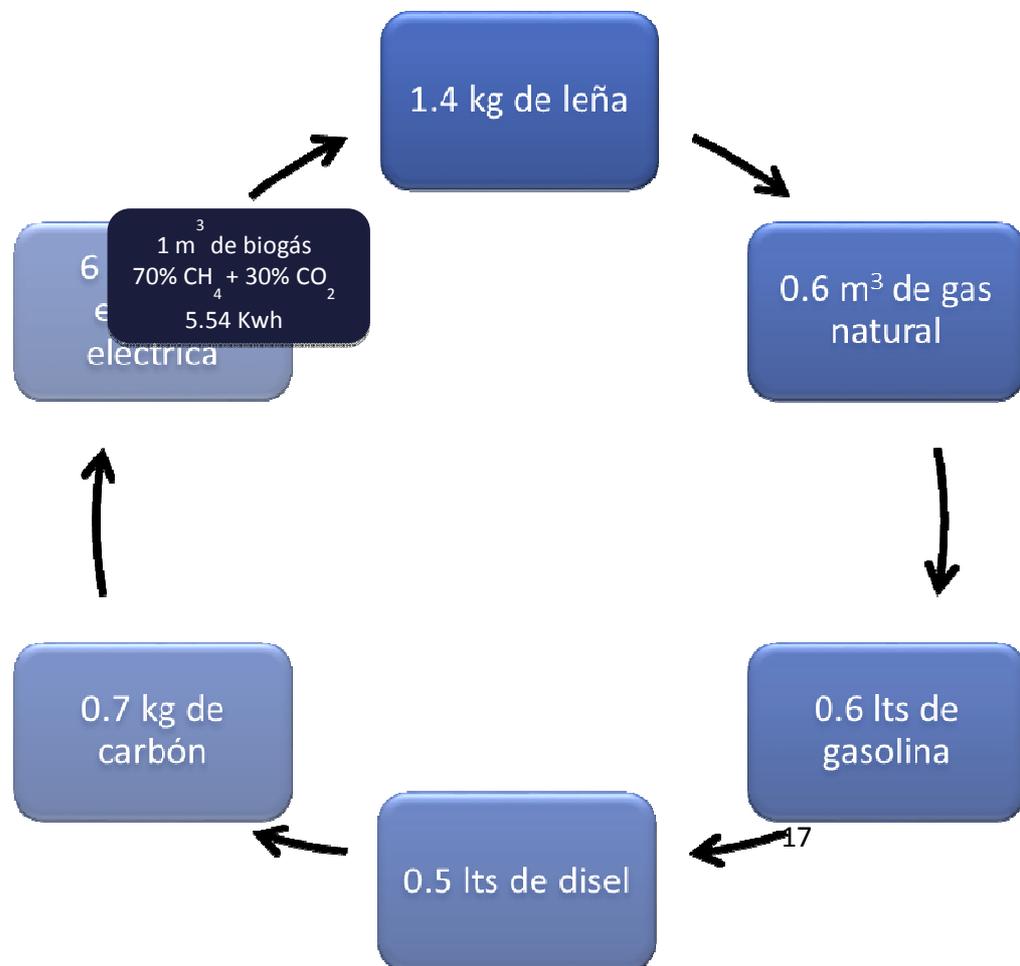


Figura 2:
Equivalencias de 1 m³ de

biogás con contenido de 70% de metano y 30% de dióxido de carbono con otras fuentes de energía. Fuente: (SEGOB 2012).

5.2.2. Efluente (fertilizante orgánico)

El fertilizante orgánico (FO) es el efluente del sistema, formado por una mezcla de influente estabilizado y biomasa microbiana producida durante el proceso de digestión anaerobia. Su composición depende del tipo de sistema utilizado y de la materia orgánica alimentada (Avendaño 2010). Este subproducto es similar en volumen al ocupado por los residuos de partida, aunque también cabe destacar que presenta ventajas significativas. Tiene una composición homogénea, tanto más cuanto mayor sea el tiempo de retención dentro del digester. Además, no presenta olor desagradable ni emite compuestos orgánicos volátiles (Ainia 2011). Puede emplearse como mejorador de suelos debido a su alto valor fertilizante. Ya que según Avendaño (2010), el FO producido tiene un contenido en nitrógeno de 2 a 3%, de fósforo de 1 a 2%, de potasio en torno al 1%, y un 85% de materia orgánica, con un pH de 7.5. En función de la calidad de estos materiales digeridos se puede establecer propuestas de uso, manejo y disposición adecuada, considerando especialmente su aplicación al suelo, de acuerdo con su valor agrícola (Varnero 2011).

5.3. Factores que influyen en la digestión anaerobia

La digestión anaerobia se considera un proceso complejo pues consta de 4 etapas limitantes por lo que será importante controlar parámetros que disminuyan los factores de inhibición de los microorganismos que llevan a cabo la digestión. Estos factores se puede dividir en dos categorías distintas: los parámetros de estabilidad y parámetros de diseño. Los parámetros de estabilidad son los que controlan la capacidad del digester anaeróbico para producir consistentemente biogás. Estos parámetros deben permanecer dentro de los límites dados para que el digester tienda a permanecer estable. Estos parámetros incluyen: pH, la concentración de amoníaco, nutrientes (C/N), luz, sólidos

totales (ST) y sólidos volátiles (VS). Los parámetros de diseño varían entre las instalaciones y consisten de tiempo, temperatura, agitación, tiempo de retención hidráulico y carga orgánica.

5.3.1. pH

Los microorganismos anaerobios necesitan un pH cercano a la neutralidad para tener un correcto desarrollo, presentando problemas si se desciende por debajo de un valor de 6 o si se sobrepasa el valor de 8.3. Sin embargo, esta inhibición puede llegar a ser reversible, dependiendo del tiempo que dure la alteración. El pH óptimo se sitúa entre 6.7 y 7.5 (Avenidaño 2010). El pH se utiliza normalmente como un indicador de la salud del digester. Las causas por las cuales se puede acidificar la fase líquida contenida dentro del biodigestor son: a) un cambio excesivo de la carga; b) el permanecer por largo tiempo sin recibir carga; c) la presencia de productos tóxicos en la carga; d) un cambio amplio y repentino de la temperatura interna. El pH del proceso incrementa por la acumulación de amonio durante la degradación de proteínas, mientras que la acumulación de ácidos grasos volátiles produce reducción del pH (Veyna 2007).

5.3.2. Nutrientes

Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para los grupos de Metanogénicos ya que se inhiben severamente por falta de nutrientes. El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Abbasi y col. (2012), menciona que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 20:1 a 30:1. Aunque (Deublein y Steinhauser 2008), reportan como rango óptimo de 16:1 a 25:1, ya que el nitrógeno también se encuentra entrelazado en estructuras de lignina. Si la relación C/N es muy alta, el nitrógeno es consumido rápidamente por las bacterias metanogénicas para cumplir sus requerimientos de proteína y por consecuencia no está disponible para reaccionar con el

carbono sobrante del material, por otro lado, si es muy baja, el nitrógeno es liberado y se acumula en forma de amoníaco. Desechos animales como excretas de vaca, tienen un rango medio, mientras que las materias vegetales presentan grandes cantidades de carbono, los que presentan valores altos de esta relación (Abbasi y col., 2012). La necesidad de nutrientes es pequeña por la baja producción de biomasa, para la formación de metano relaciones de C: N: P: S de 500-1000:15-20:5:3 es suficiente (Avendaño 2010). Algunos microelementos son necesarios para estimular el proceso de producción de biogás como el hierro, níquel, cobalto, selenio, molibdeno y tungsteno. La concentración de micronutrientes es baja los valores oscilan entre 0.05 y 0.06 mg/l. Solo el hierro es necesario en mayor concentración entre 1 y 10 mg/l (H. Robalio 2011).

5.3.3. Luz

La luz no es letal para la metanogénesis, pero la inhibe severamente. La formación de metano debe ser llevada a cabo en un lugar de obscuridad (Deublein y Steinhauser 2008)

5.3.4. Sólidos

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas (Varnero 2011).

El contenido en sólidos totales (ST) nos da una idea del agua disponible en la etapa de hidrólisis, uno de los factores limitantes del proceso. Los sólidos volátiles (SV) indican que una fracción de la materia orgánica es susceptible de ser transformada a biogás durante el proceso (Avendaño 2010). Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de 12 % de sólidos totales para asegurar el

buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60% de sólidos totales (Varnero 2011).

Carrillo (2004), menciona que se puede lograr una digestión satisfactoria con concentraciones mayores a 15% de sólidos, sin embargo en la práctica la gama es de 3-10% para la digestión anaerobia, a más altos sólidos son recomendadas otras técnicas, como se sugiere en la Tabla 5. Puesto que por razones económicas se vuelve poco viable si el contenido de sólidos excede de 30%, porque al tener bajos contenidos de agua, retarda el crecimiento de las bacterias, así como el sustrato no puede ser bombeada o mezclada correctamente. Por otro lado con baja carga orgánica en el digestor, se logra llevar a cabo la digestión, pero se requiere un digestor con mayor volumen y debe ser alimentado con mucha frecuencia.

El porcentaje de sólidos volátiles respecto al de sólidos totales (% de sólidos volátiles o SV) suele variar entre el 70-95%. Los residuos que tienen un porcentaje inferior al 60% no suelen considerarse buenos sustratos para la digestión anaerobia (Ainia 2011). La destrucción de ST y SV es una indicación de la eficacia del proceso de digestión anaerobia.

Tabla 5. Opciones de recolección y manejo de residuos en función a los sólidos totales.

% ST	0	5	10	15	20	25	30
Tipo	Líquido		Semisólido			Sólido	
Manejo	Bombeado		Paleado			En pila	
Uso	Sin adicción de agua			Adicionar agua			
Técnica	Digestión anaerobia				Compostaje al aire		
Sistema	Laguna cubierta	Digestor agitado	Digestor con flujo pistón				

Fuente: (Carrillo 2004)

5.3.5. Temperatura

Según Varnero (2011), existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos como se muestra en la Tabla 6. La mayoría de microorganismos metanogénicos son mesofílicos; solo una pequeña cantidad son termófilos, siendo estos últimos más sensibles a los cambios de temperatura. La temperatura óptima de crecimiento depende de cada especie. En general, el mejor balance de microorganismos se logra en el rango mesofílicos. Por otro lado, en el rango de las temperaturas termofílicas, los gérmenes patógenos se desactivan (si el tiempo de retención de la biomasa es superior a 23 horas), lo cual puede ser de gran importancia en función de a donde se destine el efluente (Avendaño 2010).

Tabla 6 . Rangos de temperatura y tiempo de digestión anaerobia

Temperatura de digestión	Mínimo (°C)	Optimo (°C)	Máximo (°C)	Tiempo de Digestión
Psicrofílica	4-10	15-18	20-25	Sobre 100 días
Mesofílica	15-20	25- 35	35-45	30-60 días
Termofílica	25- 45	50-60	75-80	10-15 días

Fuente: (Varnero 2011)

Ahning (2003), menciona que la temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica, como se observa en la Figura 3.

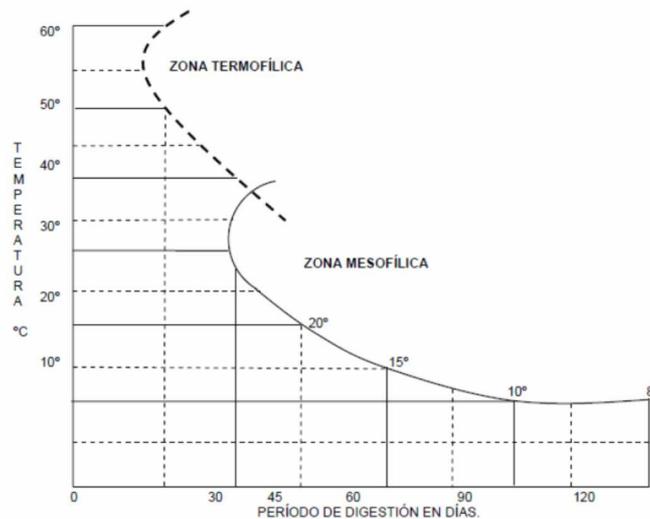


Figura 3. Influencia de la temperatura en el tiempo de digestión.

Además la temperatura no influye solamente en el crecimiento de las bacterias sino también en las propiedades fisicoquímicas del medio, como viscosidad, tensión superficial y la transferencias de masas (Ahning 2003). El mantenimiento de la temperatura es un parámetro fundamental: variaciones de 2°C pueden producir una disminución en la producción de biogás que puede llegar al 30%, (Avendaño 2010).

5.3.6. Agitación

La forma de realizarla y la energía requerida depende de la forma y tamaño del reactor, el sistema de mezclado y la concentración de sólidos. Según Avendaño (2010), realmente no existe un consenso sobre cuál es la mejor forma de aplicarla. La agitación es un parámetro de optimización en la digestión anaerobia, esta debe ser llevada a cabo de manera eficiente y cuidadosa debido a los siguientes factores mencionados por (Deublein y Steinhauser 2008).

- Cada microorganismo debe ser suministrado de manera uniforme con los nutrientes y los productos del metabolismo tienen que ser eliminados de manera uniforme, lo cual puede lograrse mediante agitación suave.
- Sustrato fresco debe ser mezclado con el sustrato degradado con el fin de inocular el sustrato fresco con bacterias activas.
- El biogás se debe ser removido con eficacia del reactor.
- La simbiosis del microorganismo de los acetogénicos y metanogénicos no debe ser molestada. Los microorganismos son sensibles al estrés y pueden ser destruidos por agitación demasiado fuerte.
- La formación de espuma se puede prevenir mediante agitación alternada.
- Los gradientes de temperatura entre capas estratificadas en el biodigestor resultan en la baja eficiencia de reacción.
- Flotación y hundimiento entre capas tienen que ser destruidos.
- El consumo de energía debe ser minimizada.

El grado de mezclado se mide por dos parámetros, uno el tiempo (de volteo) que toma recircular todo el volumen del digestor y otro, el tiempo (de dispersión) necesario para que un marcador agregado alcance una concentración de equilibrio dentro del digestor. Se puede hacer de forma mecánica, hidráulica o neumática. No es siempre necesaria, especialmente en digestores que trabajan con sustratos con gran contenido en sólidos (Carrillo 2004).

5.3.7. Toxicidad

Un gran número de compuestos son tóxicos para los microorganismos anaeróbicos. Los Metanogénicos son los que comúnmente se consideran como los más sensibles a la toxicidad. El proceso puede aclimatarse y los microorganismos anaerobios pueden llegar a soportar altas concentraciones de tóxicos después de su periodo de adaptación. Iones minerales, especialmente los metales pesados, y detergentes son un grupo de materiales que inhiben el crecimiento normal de la bacteria en el biodigestor. La recuperación de

digestores consecuencia de la inhibición por sustancias tóxicas se puede lograr por el cese de la alimentación, el lavado de los contenidos o la dilución la concentración de sustancias inhibitoras por debajo del nivel tóxico (Abbasi y col., 2012).

5.3.7.1. Concentración de amoniaco

El amoniaco puede estar presente en las materias primas que entran al digestor o ser producido durante la degradación anaeróbica de compuestos orgánicos nitrogenados tales como proteínas o aminoácidos. El nitrógeno amoniacal es la suma del ión amonio (NH_4^+) y del amoniaco (NH_3). Ambas especies se encuentran en equilibrio químico, y la concentración relativa de cada una depende del pH, tal indica la ecuación de equilibrio, (Varnero 2011):



La mayoría del nitrógeno en la digestión anaerobia se convierte en amoniaco, el nivel de toxicidad depende además del pH de la concentración del sustrato, de la relación C/N, de la capacidad buffer del medio y de la temperatura de digestión. A medida que la temperatura aumenta, la toxicidad del amoniaco se vuelve mayor. A medida que el pH aumenta, más amonio es convertido a amoniaco, un aumento en la concentración del amoniaco puede también resultar en un aumento de pH que puede compensar las altas concentraciones de ácidos grasos volátiles (Hilborn 2011). En la Tabla 7 se muestran los efectos que podría producir el amoniaco en la digestión anaerobia cuando presenta pH altos.

Tabla 7. Concentración de amoniaco y su efecto en el proceso de digestión anaerobia.

Amoniaco –N (mg/L)	EFFECTOS
50-100	Benéficos
200-1000	Sin efectos adversos
1500-3000	Efectos inhibitorios a pH altos
Sobre 3000	Tóxico

Fuente: (Varnero 2011)

5.3.7.2. Antibióticos

Algunos antibióticos son tóxicos para los microorganismos anaerobios, estos son añadidos de forma común a la dieta de los animales en las granjas. De entre los analizados solo dos se han encontrado que inhiban el proceso anaerobio: el *momensin* y el *lasalocid*, si bien el ultimo precisa de altas concentraciones. Los restos de desinfectantes provenientes de la limpieza y desinfección de las granjas pueden resultar tóxicos. La toxicidad dependerá de la biodegradabilidad y del tiempo que transcurra entre su empleo y el momento que este entre al sistema (Avendaño 2010).

5.3.8. Tiempo de retención.

Es el cociente entre el volumen del reactor y el caudal de tratamiento, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos, está en función de la temperatura como lo muestra Figura 3. Es un factor importante en el dimensionamiento de los bioreactores que las bacterias tengan un tiempo suficiente para reproducirse y metabolizar los sólidos volátiles (SV). Hay dos tipos de tiempo de retención, el tiempo de retención de sólidos (TRS), que es el tiempo promedio en que las bacterias están en el digestor, y el tiempo de retención hidráulico (TRH), que es el tiempo promedio en que el lodo líquido se mantiene en el digestor. Estos tiempos son iguales si no hay recirculación. Ahning (2003), menciona que recientes estudios han demostrado que el tiempo de retención en condiciones mesofílica no debe ser menor de 10-15 días, y generalmente se mantiene mayor a este tiempo para garantizar un proceso más estable, pues según Gerardi (2003), el tiempo de generación de metanogénicos puede ser de 3 a 30 días.

5.3.9. Carga orgánica (ORL)

La carga orgánica se define como la relación entre la cantidad de materia orgánica (expresada en DQO o sólidos volátiles) por unidad de reactor y unidad de tiempo, siendo dependiente del tiempo de retención y la concentración de sustrato. Altas cargas orgánicas, siempre que no existan inhibidores, producen grandes cantidades de biogás. (Avenidaño 2010). Este parámetro afecta el diseño del digestor anaeróbico como el volumen y la eficiencia final. La tasa de carga depende de los tipos de residuos alimentados en el digestor, como lo menciona (Hilkiah y col., 2008) debido a que los tipos de residuos determinan el nivel de actividad bioquímica que se producirá en el digestor. En sustratos fácilmente degradables, las reacciones acidogénicas suelen ser mucho más rápidas en altas cargas y aumentan los ácidos grasos volátiles del reactor (AGVs), disminuyendo las concentraciones de hidrógeno y por consecuencia el valor de pH. El

incrementó en la OLR implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida, debiendo encontrar un valor óptimo técnico/económico para cada instalación y residuo a tratar.

5.4. Codigestión

Los residuos de alimentos son ricos en carbohidratos, proteínas y grasas, suelen tener una alta proporción de materia orgánica biodegradable y una alta relación C/N, lo que representa un problema al ser digeridos anaeróbicamente al presentar ausencia de los micronutrientes necesarios para el desarrollo de las bacterias, como consecuencia podrían presentar problemas de acidificación e inhibición. El proceso de mezclar selectivamente residuos con características complementarias que permitan cubrir los parámetros necesarios para la digestión anaerobia es conocido como codigestión, el cual da lugar a procesos más estables y a un incremento considerable de la producción de biogás (Ainia 2011). La codigestión es considerada una técnica de optimización de la DA que ha sido usada por varios autores como una prometedora y práctica alternativa para el tratamiento simultáneo de diferentes tipos de residuos orgánicos sólidos y semisólidos, como se ilustran en la Tabla 8, donde se muestran algunos sustratos usados y las eficiencias de biogás obtenidas de algunos autores.

Tabla 8. Algunos residuos sólidos y semisólidos utilizados para la codigestión anaerobia y rendimientos reportados en literatura.

Sustrato	Biogás m3/kg SVT	Autores
Residuos orgánicos industriales (RO), excreta de cerdo (EC), residuos de matadero (R), Residuos de frutas y verdura (FV)	RO / EC 0.5 RO/EC/R 0.6 RO/EC/R/ FV 0.7	(Murto y col. 2004)
Lodos (LA), Frutas y verduras de la fracción orgánica (FV)	FV /LA 0.6-0.7	(Gómez, y col., 2006)
Excreta de pollo (EP), vaca (EV) y cerdo (EC)	EP / EC 0.13	(Fanzonni 2009)
Excreta de pollo (EP), vaca (EV), cerdo (EC) y residuos de pasto (RP)	EC /RP 0.37 EV / RP 0.028 EP / RP 0.002	(Ahn, y col., 2010)
Excreta de vaca(EV), residuos de comida (RC), lodos anaerobios (LA) como inóculo	EV /RC/LA 0.051	(Li y col., 2011)
Excreta de vaca (EV), residuos de jardín (RJ), Jugo de frutas (JF) y lodos anaerobios (LA) como inóculo	EV/LA/RJ 0.027 EV/LA/JF 0.026	(Venkates 2011)
Paja (P) y purina de cerdo (EC)	EC ↑/ P 0.23	(Moussulini 2012)

Se ha corroborado que el uso de esta técnica mejora la estabilidad de la DA de residuos con problemas de acumulación de ácidos grasos como son los de frutas y verduras, que al ser codigeridos con sustratos con altas cantidades de amonio (lodos anaerobios o residuos de pescado), trae como resultado una alta capacidad buffer atribuida a los altos contenidos de nitrógenos como lo reporta Bouallagui, y col., (2009) por otro lado esta técnica puede mejora la reducción de materia orgánica pues pueden obtenerse eficiencias de remoción hasta del 97.4% como lo menciona Lin y col., (2011), además optimiza la relación C/N como lo sugiere (Achu 2012) al codigerir maíz con residuos industriales logrando alcanzar el óptimo (20-30) recomendado por Abbasi y col. (2012) y como resultado de estas ventajas se obtienen importantes mejoras en la producción de biogás. La codigestión nos permitirá entonces integrar la valorización de los residuos orgánicos de una zona geográfica determinada, proveyendo una solución para su gestión. En la Tabla 9 se indican las características relativas para la codigestión de los residuos de interés para este estudio, las flechas indican un posible interés y su posible carencia relativa para llevar acabo la digestión anaerobia.

Tabla 9. Características relativas para la codigestión de algunos residuos de interés en este estudio, las flechas con sentidos hacia arriba indican buena concentración, las flechas con sentidos hacia abajo indican una carencia, las flechas con sentido diferentes indican un posible interés en la mezcla al compensarse la carencia relativa.

	Residuos ganaderos	Lodos de depuración	Fracción orgánica de residuos municipales	Residuos de la industria alimentaria
Micro y macro nutrientes				
Relación C/N	 			
Capacidad buffer (alcalinidad)				
Materia orgánica biodegradable	 			

Fuente: (IDEA 2007)

6. METODOLOGIA

7.1. Plan de trabajo

El trabajo de investigación se planeó en tres etapas experimentales:

1º - Caracterización analítica inicial de las materias primas que posteriormente se utilizarán en la codigestión (excreta de vaca y cerdo, residuos agroindustriales e inóculo). Pruebas preliminares con diferentes sistemas para seleccionar el codigestante (excreta de vaca y cerdo) para los residuos agroindustriales. En la figura 4, en el punto 1 se observa el procedimiento más detallado de esta etapa.

2º - Ensayos con diferentes porcentajes de mezclas de sustrato (residuos agroindustriales), codigestores (excretas), e inóculo (lodos anaerobios) en condiciones de operación batch, con agitación y en rango de temperatura mesofílica, para seleccionar la mejor opción productora de volumen y calidad de biogás. En la figura 4, en el punto 2 se observa el procedimiento más detallado de esta etapa.

3º - Una vez evaluadas las etapas anteriores, y tomando como base el comportamiento óptimo del proceso de generación de volumen y calidad de biogás, se dio seguimiento al proceso de codigestión en reactores semicontinuos de 30 L con agitación mecánica, y operando en rango de temperatura mesofílica. En la figura 4, en el punto 3 se observa el procedimiento más detallado de esta etapa.

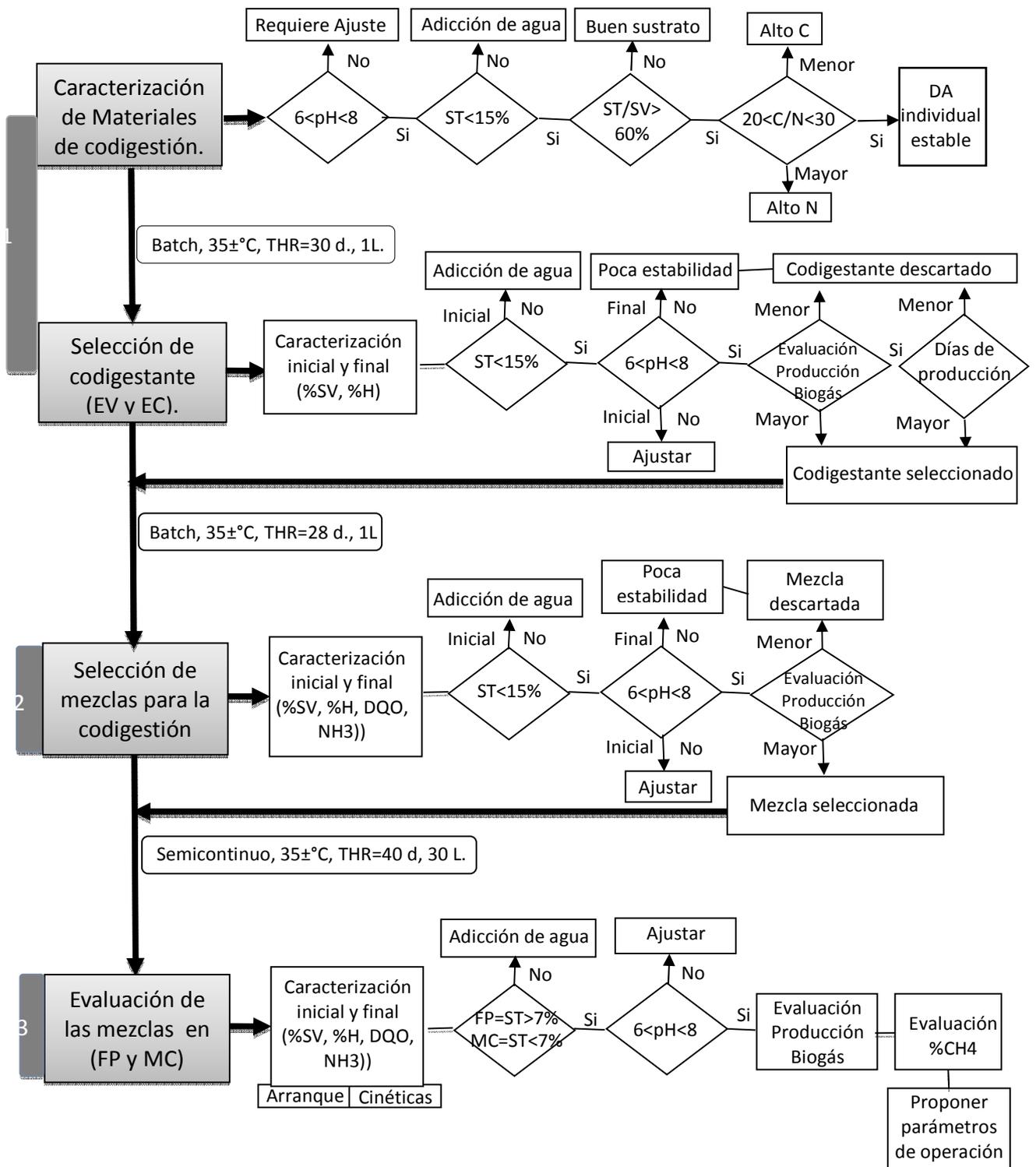


Figura 4: Esquema de las etapas de trabajo. 1) Procedimiento para la selección del codigestante, 2) procedimiento para la selección de la mejor mezcla en estabilidad y producción de biogás, 3) Procedimiento de evaluación de las mezclas en biodigestores (FP y MC).

7.2. Recolección de muestras

Se realizó una visita al área de estudio que se encuentra en un área industrial en el estado de Oaxaca y se verificó la disponibilidad de los residuos seleccionados.

7.2.1. Residuos orgánicos agroindustriales

Los residuos orgánicos agroindustriales (ROA) tomados en cuenta para este estudio se seleccionaron con base a la abundancia y facilidad de obtención en el área geográfica en estudio a través de la visita de campo: Residuos de frutas y vegetales (FV): Se obtuvieron en mercados locales y se seleccionaron con base a la similitud con los encontrados al relleno sanitario del área de estudio. Se trituraron, homogenizaron y se almacenaron a 4°C hasta su uso. Paja y rastrojo (PR): Se obtuvieron triturados y homogenizados en una granja local, se almacenaron a 4°C hasta su uso. Suero de Leche (SL): Se obtuvieron de una empresa láctea del parque industrial de Oaxaca, se almacenó a 4°C hasta su uso.

7.2.2. Codigestantes.

Se seleccionaron dos diferentes tipos de codigestantes para su evaluación:

- Excretas de vaca (EV): Se colectaron en una granja lechera local, de animales adultos y se conservaron a 4°C hasta el día de su uso.
- Excretas de cerdo (EC): Las excretas de cerdo fueron colectadas en una granja local, de animales adultos fueron ligeramente hidratadas y conservadas a 4°C hasta el día de su uso.

7.2.3. Inóculo.

Lodos anaerobios activos (LA) se usaron como inóculo o fuente de microorganismos. Se obtuvieron de una laguna anaerobia activa de un proceso de tratamiento de agua residual de la industria avícola, se conservaron a temperatura ambiente (aproximadamente 25-28 °C) hasta el día de su uso.

7.3. Análisis fisicoquímicos.

Los residuos agroindustriales, los codigestantes, el inóculo y sus mezclas son evaluados en los siguientes parámetros, pH, sólidos totales, sólidos totales volátiles, amoníaco, demanda química de oxígeno. La mayoría de las técnicas analíticas utilizadas en las diversas etapas experimentales del trabajo corresponden a las descritas en los Métodos Estándar para el Análisis de Aguas Potables y Residuales (APHA; AWWA; WPCF; 1989), y las normas mexicanas aplicables las cuales son descritas a detalle en el anexo A.

7.4. Condiciones ambientales del estudio.

Las mediciones de producción de biogás por líquido desplazado se tomaron en el centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica (CIDETEQ), ubicado en Sanfandila Pedro Escobedo, en la ciudad de Querétaro, bajo las condiciones ambientales mostradas en la Tabla 10.

Tabla 10. Condiciones ambientales del CIDETEQ.

Altura	Temperatura promedio	Temperatura mínima promedio	Temperatura máxima promedio	Humedad relativa promedio	Presión barométrica
1920 msnm	18 °C	6 °C	28 °C	56%	0.8 atm

Fuente: (INEGI 2004)

7.5. Equipos experimentales.

7.5.1. Equipo experimental No.1

Para el ensayo de biodegradabilidad se diseñó y construyó un equipo experimental basado en una versión modificada del método volumétrico de Actividad Metanogénicas Específica (AME) Torres y Pérez (2010), el cual se basa en la cuantificación del volumen de metano producido mediante el uso de una sustancia barrera, como el NaOH o el KOH (15 - 20 g/L), por su propiedad de reaccionar con el CO₂ presente en el biogás, permitiendo una medición aproximada del volumen de metano producido.

La Figura 5 esquematiza la configuración del equipo experimental, el cual consta de un reactor de 1 litro, sellado herméticamente (para de mantener las condiciones anaerobias), con un dispositivo captador de biogás, el cual en su extremo está conectado a una manguera en forma de "U" ubicada entre el digestor y la solución, esto con el objetivo de que actuara como un sifón y dificultara el paso de la solución barrera hacia el digestor, finalmente el biogás es burbujeado en la solución barrera (NaOH 20 g/l) y es dirigido a una recipiente de agua, hacia el interior de un envase volumétrico graduado en forma invertida, que fue llenado de agua y purgando de cualquier burbuja de aire.

Los digestores con las mezclas fueron incubados en el baño de agua a 35 ± 5 °C, bajo condiciones mesofílicas. Los digestores son mezclados diariamente de forma manual y la cantidad de gas es monitoreada y medida de acuerdo a los principios de agua desplazada.

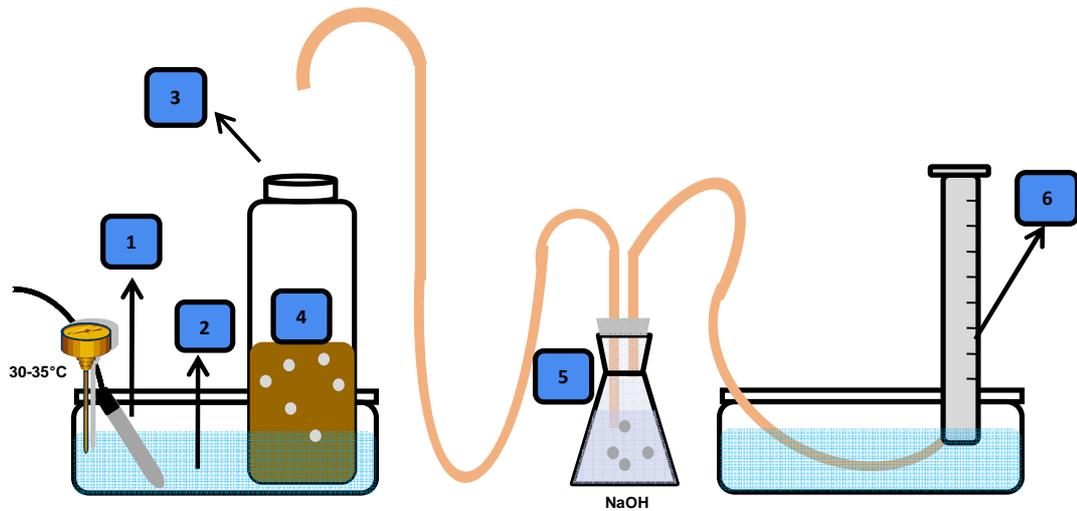


Figura 5: Representación esquemática del sistema experimental No. 1: (1) Sistema de calefacción [30-35°C], (2) Baño de agua, (3) Sistema de digestión y captación de biogás, (4) Mezcla de codigestión en estudio, (5) Solución barrera NaOH y (6) Envase volumétrico graduado.

7.5.2. Equipo experimental No.2-Eudiómetro.

El Eudiómetro es un manómetro de presión constante que mide el cambio de volumen en el gas a una presión y temperatura constante por desplazamiento de una solución barrera por el biogás. El equipo cuenta con un baño de temperatura y un agitador magnético programable (con lo que se obtendrán condiciones constantes para el estudio). La solución barrera de este usada en este equipo fue NaCl / ácido cítrico propuesta en (Muller y col., 2004).

En la Figura 6 se observa un Eudiómetro, la lectura se obtiene del tubo graduado colector de gases, después de que la solución de barrera es desplazada por el biogás generado hacia el tanque de almacenamiento, el tanque de almacenamiento se eleva de modo que el biogás vuelve a la presión atmosférica.

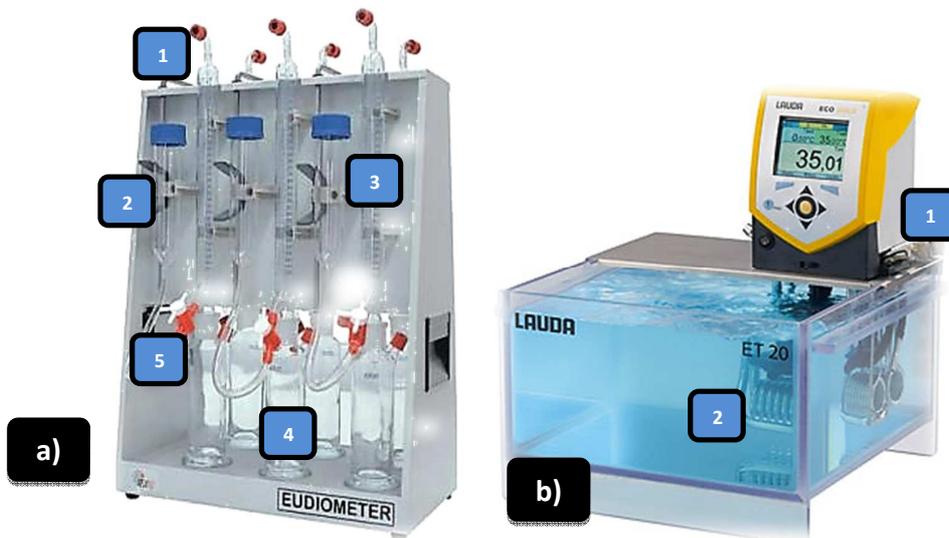


Figura 6: Imagen del sistema experimental No. 2: (a1) Puerto de muestreo y purga de biogás, (a2) tanque de reserva de solución barrera con posición ajustable, (a3) tubo graduado para la transferencia del gas, (a4) Digestor de 500ml, (a5) válvula conectora entre el tanque de reserva y el tubo graduado, (b1) Sistema de calefacción y agitación, (b2) Baño de agua.

7.5.3. Equipo experimental No.3- Biodigestor piloto.

En tercera etapa se utilizaron dos biodigestores pilotos de 30 L, uno de mezcla completa (MC) y otro de flujo pistón (FP) que se muestra en la Figura 7, los cuales cuentan con control de temperatura programable y con agitación mecánica. Los detalles cada uno de los biodigestores piloto se encuentra en el anexo B.

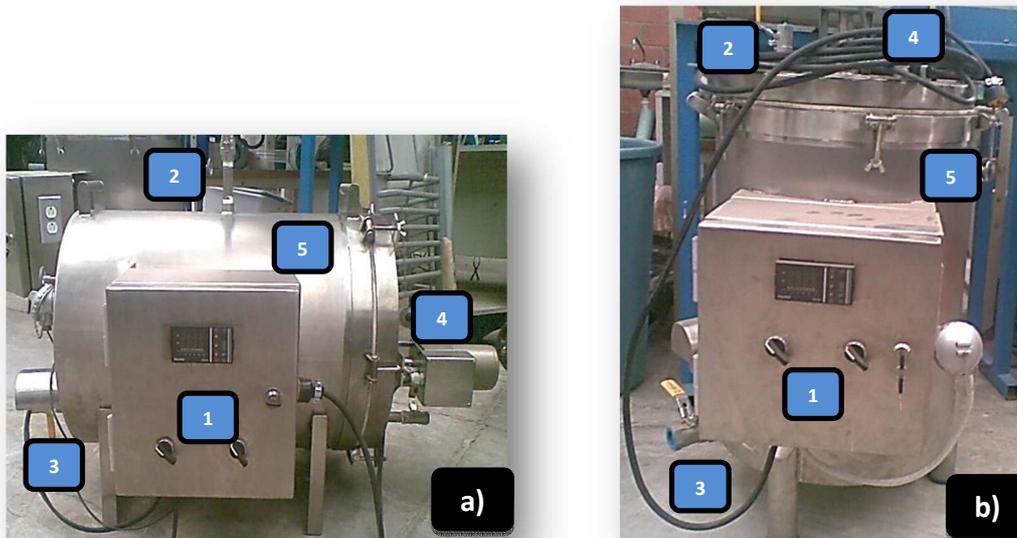


Figura 7: Imagen del sistema experimental No. 3: (a1 y b1) Panel de control de agitación y temperatura, (a2y b2) puesto de muestreo y medición de biogás, (a3y b3) válvula de muestreo y purga, (a4 y b4) sistema de agitación, (a5 y b5) tanque de 30 L.

7.6. Primera etapa:

7.6.1. Caracterización inicial de las materias primas a utilizar en la codigestión.

Como punto de partida para este trabajo se caracterizaron cada uno de los residuos por separado realizando para ello los siguientes análisis físico-químicos: pH, Humedad, Sólidos Totales (ST) y Totales Volátiles (STV). Los resultados relativos a esta etapa experimental se exponen en el apartado 8.1.1 de *Resultados y Discusión*.

7.6.2. Pruebas preliminares para la selección del codigestante.

Se realizaron algunas pruebas preliminares para evaluar la capacidad de producción de biogás y estabilización para seleccionar el codigestante (Excreta de cerdo/ Excreta de vaca), se seleccionaron algunas mezclas mostradas en la Tabla 11 (todas expresadas en Peso/Peso), un sistema inoculado, un sistema con residuos de frutas y vegetales, y por ultimo un sistema inoculado con residuos de frutas y verduras. El ensayo se llevó a cabo en el equipo experimental No.1.

Tabla 11. Ensayos realizados para evaluación de codigestante (Excreta de vaca y Excreta de cerdo).

Mezcla	Composición
1	50% Excreta – 50% Lodos anaerobios
2	50% Excreta – 50% Frutas y verduras.
3	33% Excreta - 33% Frutas y verduras -33% Lodos anaerobios.

Fuente: El autor, (2013).

Las mezclas fueron caracterizadas físico-químicamente antes y después de la digestión, los parámetros analizados fueron: pH, Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles (ST y STV). Los resultados relativos a esta etapa experimental se exponen en el *apartado 8.1.2 de Resultados y Discusión.*

7.7. Segunda etapa: selección de mezcla y proporciones.

En esta etapa se evaluaron los residuos orgánicos con el codigestante seleccionado en la etapa anterior. Se probaron algunos porcentajes de mezclas descritos en la Tabla 12, éstos fueron seleccionados basados en trabajos reportados en la literatura y son mostrados en la Tabla 1. Se caracterizaron antes y después de la digestión, los parámetros analizados fueron: pH, Sólidos Totales (ST) y Sólidos Totales Volátiles (STV), Demanda química de oxígeno (DQO), y Amoniac (NH₃). Los resultados relativos a esta etapa experimental se exponen en el *apartado 8.2 de Resultados y Discusión.*

Tabla 12. Ensayos realizados para la evaluación de mezclas con mejor comportamiento.

Mezcla	Composición
Blanco	1: Excreta / 1: Agua
A	1:Excreta/1: Residuos orgánicos
a	1: Excreta/1: Residuos orgánicos/ 1: Lodos anaerobios
B	2: Excreta/1:Residuos orgánicos
b	2: Excreta/1: Residuos orgánicos/ 1: Lodos anaerobio

Fuente: El Autor, (2013).

7.8. Tercera etapa: Codigestión en biodigestores piloto.

Los biodigestores se cargaron con una mezcla inoculadora con las siguientes proporciones, 3: Excreta de vaca/ 1: residuos vegetales/ 1: suero de leche/ 1: Lodos anaerobios/ Agua. El pH fue ajustado con carbonato de calcio (CaCO_3) hasta lograr un valor cercano a la neutralidad, y se le instaló un sistema de medición por desplazamiento de agua y la trampa de CO_2 (solución barrera de NaOH) como se muestra en la Figura 8.

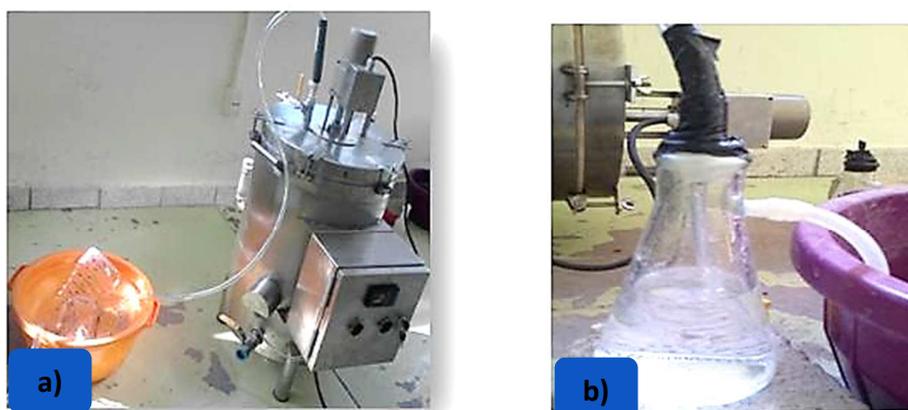


Figura 8. a) fotografía del sistema de medición de metano por desplazamiento de agua y b) fotografía de la trampa de CO_2 (solución barrera de NaOH) instalada en cada biodigestor.

Los biodigestores son monitoreados por lo menos dos veces a la semana, en parámetros de pH, sólidos totales, sólidos totales volátiles, DQO_{total}, DQO_{soluble}, y producción de metano por desplazamiento de agua y caracterizado con un analizador de gas GEM 2000, que se describe en forma detallada esta descrito en el anexo A. Se agitaron por media hora dos veces al día y se programaron a una temperatura de 35°C. La cantidad total agregada en peso por cada cinética fue de 1.3 kg correspondiente al 0.5% del volumen total y un volumen de agua necesaria para alcanzar los sólidos de trabajo, dichas condiciones corresponden al volumen de lodos extraídos entre cada alimentación.

Las cinéticas se detuvieron y/o se alimentaron cuando se rebasó el 80% de consumo de materia orgánica alimentada, cuando se detuvo la producción de biogás o cuando pasaron más de 40 días tiempo de retención establecido para cada alimentación. El biodigestor de mezcla completa (MC) trabajo con sólidos totales menores al 7%, mientras en biodigestor de flujo pistón (FP) trabajo con sólidos mayores al 7%. Los resultados relativos a esta etapa experimental se exponen en el *apartado 8.3 de Resultados y Discusión*.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Primera etapa:

8.1.1. Caracterización inicial de las materias primas a utilizar en la codigestión.

Los resultados de la caracterización fisicoquímicos de los residuos son reportados en la Tabla 13. Analizando los valores de pH obtenidos se observa que los residuos de frutas y verduras (FV), suero de leche (SR) y excreta de cerdo (EC) tienen valores bajos (3.8, 5 y 5.5 respectivamente) y se encuentran fuera del rango óptimo para la estabilidad de la digestión anaerobia (DA) (6.5-7.5) sugerido por Deublein y Steinhauser (2008), estos valores representan un problema en la DA pues al ser digeridos de forma individual, propiciarían el crecimiento de bacterias acidogénicas y acetogénicas que prefieren un ambiente levemente ácido y como consecuencia impedirían el crecimiento de bacterias metanogénicas como lo asegura Veyna (2007). Por otro lado los lodos anaerobios (LA) y las excretas de vaca (EV) presentan valores dentro del rango del rango óptimo para una digestión estable, por lo que se espera que propicien un correcto desarrollo de los microorganismos de las 4 etapas de la digestión anaerobia.

Tabla 13. Resultados de la caracterización de residuos de residuos agroindustriales y codigestantes.

	pH	Humedad (%)	ST (%)	SV (%) de ST	C/N*
Mezcla de frutas y verduras (FV)	3.8	90	10	90	34 ^[2]
Suero de leche (SR)	5	92	8	76	0.85 ^[1]
Paja y rastrojos (PR)	7.5	77	47	51	45 ^[3]
Excretas de vaca (EV)	7.0	85	15	87	25 ^[3]
Excretas de cerdo (EC)	5.5	74	26	53	13 ^[3]
Lodos anaerobios (LA)	7.1	96	4	25	10 ^[2]

* Datos obtenidos en bibliografía [1] Robalio Robalino, (2011), [2]:Li, Chen, & Li, (2011), [3] Varnero Moreno, (2011). **FUENTE:** El autor, 2013.

También se observa en la Tabla 13 que los residuos FV, SR y LA tienen alta humedad (90, 92 y 96 % respectivamente), por consecuencia baja cantidad de sólidos totales (10, 8 y 4 % respectivamente), esto indica que existe gran cantidad de agua disponible en la hidrólisis, como resultado podría ser un factor limitante del proceso, al aumentar la velocidad del rompimiento de polímeros y acumulando ácidos grasos. Por el contrario PR, EC y EV, muestran porcentajes menores humedad (77, 74 y 85 % respectivamente) y altos contenidos de sólidos totales (47, 26 y 15% respectivamente), en comparación con FV, SR y LA, por lo que al ser digeridos sin dilución hará lenta la digestión, pues afectaría la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato, por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas, como lo sugiere Varnero (2011).

En relación al parámetro del porcentaje de sólidos volátiles respecto al de sólidos totales (% SVT de ST) que indica la capacidad de la mezcla para producir biogás, se obtuvieron rangos entre 50-90%, el rango más bajo lo presentó los LA con un valor de 25%, por lo que no puede considerarse buen sustrato, ya que Ainia (2011) asegura que los residuos con un porcentaje inferior al 65% no suelen considerarse buenos sustratos para la digestión anaerobia, basados en esto los residuos como PJ y EC al igual que LA por si solos no podrían considerarse como buenos sustratos.

La relación carbono / nitrógeno (C/N) son tomados de los reportados en la bibliografía [(H. Robalio 2011), (Lin, y otros 2011), y (Varnero 2011)], en la Tabla 13 se muestra que EC, LA y SR se encuentran en rangos muy bajos 9, 10 y 0.85 respectivamente, lo que indica que tienen gran cantidad de nitrógeno, en forma de proteínas para el caso del SR, amoniaco para EC y LA. En contraste FV y PJ supera el rango óptimo con valores de 34 y 45 respectivamente, debido a las grandes cantidad de carbono principalmente en forma de celulosa, por consecuencia al ser digeridos en forma individual propiciaría que el nitrógeno sea consumido rápidamente por los Metanogénicos para cumplir sus requerimientos de proteína y no estará disponible para reaccionar con el carbono sobrante del material (Abbasi y col., 2012), en ambos casos dificultando la DA. El óptimo

lo presentó EV, con un valor de 25 el cual se encuentra dentro del óptimo (20-30), lo que explica su éxito en su digestión individual.

8.1.2. Pruebas preliminares para seleccionar el codigestante.

Para las pruebas preliminares los reactores son cargados en el equipo No.1 con las proporciones de las mezclas descritas anteriormente en la Tabla 11, con un volumen efectivo de 440 mL, como se muestra en la Figura 9, ajustado hasta pH cercano a la neutralidad en condiciones mesofílicas durante 28 días, tiempo de retención establecido para la digestión.

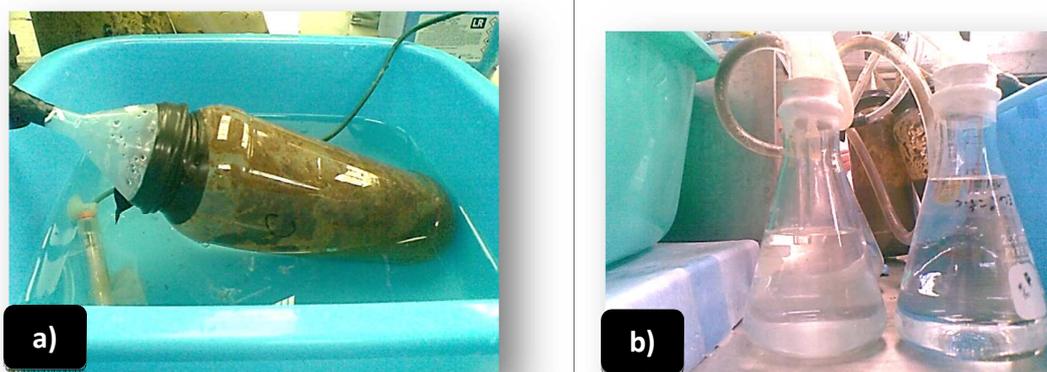


Figura 9. a) fotografía del equipo No.1 se muestra el biodigestor con mezcla con el sistema de captación de biogás instalado, dentro del baño de temperatura (30-35 °C), b) fotografía de la trampa de CO₂ (solución barrera NaOH) instalada.

Las mezclas son caracterizadas antes y después de la digestión, la Tabla 14 muestra el resumen de los resultados de las pruebas realizadas. Las relaciones carbono/nitrógeno (C/N) son calculadas con la metodología descrita en el *anexo A*, los valores que presentaron los sistemas inoculados [V1 (Excreta de Vaca) y C1 (Excreta de Cerdo)] son de 20 y 11 respectivamente, siendo V1 quien se encuentra dentro del óptimo marcado por la literatura con la cantidad balanceada de nutrientes, por el contrario C1, obtuvo un valor bajo a consecuencia de las altas concentraciones de nitrógeno presente en la excreta

de cerdo (que tiene valores de relaciones C/N de 13). Para los sistemas que contienen residuos de frutas y vegetales (FV), en donde se esperara que la alta relación de C/N de las FV enriquezca y mejore la proporción de carbono en las mezclas, V2 (Excreta de Vaca) presenta un valor de 31, el cual sobrepasa ligeramente la proporción de carbono requerida para una buena digestión, para el caso de su homologo C2 (excreta de cerdo) su valor fue de 17, a pesar de que las FV enriquecen con carbono, no lo hacen de manera suficiente para llevar a cabo una relación balanceada. Finalmente los resultados obtenidos por los sistemas que contienen inóculo con residuos de frutas y verduras (V3 y C3), no muestran gran variación entre ambas excretas (EV y EC), pues presentaran valores de 18 y 17 respectivamente, fuera del óptimo por la elevada cantidad de N₂, presente en el inóculo (C/N=10).

Tabla 14. Resumen de los resultados de la codigestión de las mezclas seleccionadas para la evaluación de Excreta de vaca (EV) y excreta de cerdo (EC) como codigestante.

		C/N	ST (%)	pH inicial	pH final	STV reducción (%)	*Rendimiento de biogás (L/Kg STVr)	THR
V1	50% EV / 50% LA	20	15	7.2	7.5	13	720	28
V2	50% EV / 50% FV	31	10	6.8	5.5	23	80	28
V3	33% EV / 33% FV / 33% LA	18	10	6.9	6.7	28	60	28
C1	50% EC / 50% LA	11	11	6.9 ^a	7.6	77	120	28
C2	50% EC / 50% FV	17	13	6.9 ^a	5.5	87	20	24
C3	33% EC / 33% FV / 33% LA	17	11	7.0 ^a	5.5	60	40	24

* Datos de biogás en condiciones normales (0°C, 1 atm). (a): muestras que fueron ajustadas a pH neutro (7±0.2). THR, tiempo de retención hidráulico. **FUENTE:** El autor, 2013.

Como se observa en la Tabla 14, las mezclas evaluadas presentan valores de ST entre 10 y 15%, los cuales se encuentran dentro de los sólidos de trabajo establecidos para este estudio (5<15%) sin necesidad de adición de agua. Por otro lado, las muestras de excretas de cerdo (EC) fueron ligeramente humectadas al ser recolectadas para ser homogenizadas, aun así los valores oscilan entre 11 y 13 % lo que indica que durante el

uso de EC es necesaria una humectación previa para alcanzar los sólidos reportados en este trabajo, por el contrario las excretas de vaca (EV) obtuvo valores entre 10 y 15% sin necesidad de adición de agua.

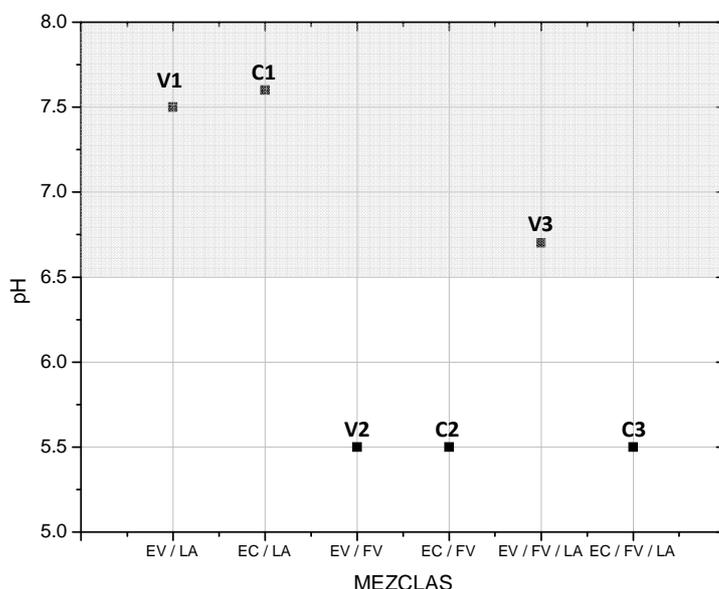
Las mayores reducciones de sólidos volátiles las presentó la EC (77, 87 y 60%) comparada con la EV (13, 23 y 28%), esto se atribuye a la acidificación de las mezclas con EC como codigestante, pues debido a los bajos pH (C2 y C3) el ambiente no fue propicio el crecimiento y supervivencia de las bacterias metanogénicas. Cabe resaltar que C1 no presentó acidificación y obtuvo el mayor porcentaje de reducción, comparado con su similar V1 que tiene la reducción más baja, esto podría indicar que independientemente de la acidificación la EC requiere menos tiempo de digestión comparado con V1 que cuenta con la disminución menor de STV, por lo que puede seguir la digestión por más de 28 días.

Uno de los principales criterios de selección del codigestante es el pH, Veyna (2007) lo considera y utiliza como un indicador de la salud del digestor y estabilidad de las mezclas que se pretenden evaluar. Respecto a los pH iniciales, las mezclas que contenían EC como codigestante (C1, C2 y C3) se ajustaron con carbonato de calcio (CaCO_3), hasta alcanzar valores cercanos a la neutralidad los que son reportados en la Tabla 14, estos sistemas sin ajuste presentaron valores de pH muy por debajo del óptimo (6.1, 4.8 y 4.6 respectivamente). En contraste los valores reportados de las mezclas con EV son los iniciales pues no fue necesario su ajuste.

Los valores de pH al final de los 28 días de digestión de los ensayos con los diferentes codigestantes son ilustrados en la Gráfica 1, en donde se ilustra que las mezclas V2, C2 y C3 están fuera del óptimo marcado en este trabajo (recuadro gris), presentando valores de 5.5 para las 3 mezclas, lo que muestra que la acidificación es consecuencia de su contenido de FV. Con la adición de FV se pretendía probar la capacidad buffer de las excretas, mostrando que para las mezclas V2 y C2, que contienen proporciones 1:1 de

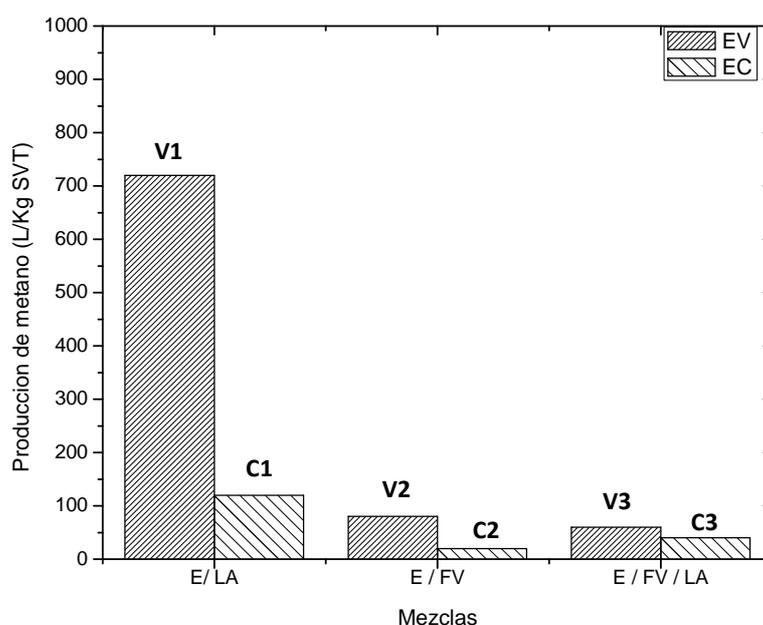
Excreta / FV, la capacidad buffer de las excretas no es suficiente para evitar la acidificación, esto puede atribuirse a las características propias de los FV, pues contienen gran cantidad de carbohidratos fácilmente biodegradables, los cuales según Avendaño (2010), son hidrolizados en pocas horas propiciando la concentración total de ácidos grasos volátiles, y la concentración de oxígeno y nitrato. Por el contrario V3 que también contenían FV, el pH quedó dentro del óptimo (6.7), mostrando así estabilidad al ser mezclado con el inóculo, aumentando su capacidad buffer. No fue así para su homólogo C3 a pesar de que contiene una parte de inóculo obtuvo un valor de 5.5, esto se atribuye a la naturaleza ácida de la excreta de cerdo (5.5) como se reporta anteriormente en la Tabla 13.

Por otro lado el tiempo en el que la generación de biogás se detuvo, fue tomado como otro indicador de estabilidad, las mezclas de excretas de cerdo C2 y C3 se detuvieron en el día 24 días, mientras que C1, V1, V2 y V3 presentaron producción de biogás hasta el día 28 como se muestran en la Tabla 14.



Gráfica 1: Estabilidad (pH final) de los sistemas de codigestión para evaluar las excretas de vaca y cerdo como codigestante, en gris marcado el óptimo establecido en este trabajo (6.5 – 8).

Los resultados de la generación de biogás son reportados en la Tabla 14 y en la Gráfica 2 se ilustra en forma comparativa los resultados de ambos codigestantes, en donde se observa que entre los sistemas inoculados, la mezcla V1 obtuvo 8 veces más de producción de metano con respecto a C1, para los sistemas que contienen residuos de frutas y vegetales, la mezcla V2 obtuvo 4 veces más de producción de metano con respecto a C2 y finalmente los resultados obtenidos por los sistemas inoculados que contienen residuos de frutas y verduras, la mezcla V3 obtuvo un 1.5 veces más de producción de metano con respecto a C3.



Gráfica 2: Biogás acumulado en condiciones normales (1 atm, 0°C) por los 28 días de digestión.

En los estudios reportados Ahn y col., (2010) se realizaron evaluaciones de producción de biogás de diferentes excretas entre ellas excretas de vaca (EV) y cerdo (EC) en codigestión con pasto, en este estudio se concluyó que las excretas de cerdo tienen más potencial de producción comparado con las excretas de vaca, siempre y cuando se realice un monitoreo constante en parámetros como pH, pues es el factor limitante en estos

residuos. Basados en el análisis de los resultados previamente reportados, éstos no concuerda con los resultados obtenidos, sin embargo es coherente con que el factor limitante de la EC se encontro en la falta de estabilidad como resultado de su naturaleza ácida.

8.1.3. Conclusiones parciales de la etapa 1.

Con las pruebas preliminares se llegaron a las siguientes conclusiones:

- **ST:** Las mezclas presentan porcentajes menores a $TS < 15\%$, sin la adición de agua para el caso de las excretas de vaca (EV) y por el contrario de excretas de cerdo (EC) se requiere la adición de agua para lograr su homogenización. Por lo que se concluye que EV permitirá mantener los valores óptimos seleccionados de ST para mantener una digestión semisólida, sin necesidad de adicionar grandes cantidades de agua.
- **Estabilidad o pH:** Al realizar la comparación de excretas de vaca (EV) y excretas de cerdo (EC), se observó que aunque los valores de pH obtenidos en algunas muestras (V2 y C2) son similares, se determina que las presentan mayor estabilidad en la digestión por su alta capacidad buffer son las EV consecuencia de su pH alcalino (7.5) a diferencia de las EC que tienen una naturaleza ácida (5.5), manteniendo el pH óptimo en la mezcla y no ser necesario un ajuste inicial de pH y manteniendo por más tiempo la producción de biogás. Tambien de las pruebas preliminares se concluye que en la codigestión de ROA con pH bajos, su proporción no debe ser mayor al 50%, pues interfiere en la digestión disminuyendo la producción de biogás notablemente e inhibiéndola en pocos días en la gran mayoría de los casos.
- **Producción de Biogás:** Al ser evaluadas en esta primera parte las mezclas de excreta de vaca (V1, V2 y V3) obtuvieron mayor producción total de biogás $0.86 \text{ m}^3/\text{Kg SVT}_{\text{reducido}}$ comparadas con la excretas de cerdo $0.18 \text{ m}^3/\text{Kg SVT}_{\text{reducido}}$, (C1, C2 y C3) esto en consecuencia a la estabilidad que presentaron a lo largo del tiempo de retención. Por lo

tanto se seleccionan las excretas de vaca (EV) como codigestante por presentar ventajas como humedad, estabilidad y producción de biogás.

8.2. Segunda Etapa: Selección de mezclas y proporciones.

Los resultados obtenidos en la etapa anterior permitieron establecer como codigestante las excretas de vaca (EV). En esta etapa se seleccionaron las mezclas con mejores productoras de volumen de biogás para ser estudiadas en la tercera etapa de este proyecto.

Los reactores en el equipo No.1 se cargaron con 440 mL y del equipo No.2 los reactores con de 220 mL y fueron instalados, con las mezclas descritas anteriormente en la Tabla 12, por 30 días. Cada mezcla fue probada por duplicado se y ajustada a pH cercano a la neutralidad (7.0 ± 0.2) con carbonato de calcio (CaCO_3) de ser necesario.

Los resultados de la caracterización físico-química de la codigestión de excretas de vaca (EV) con los residuos orgánicos agroindustriales (ROA) se detallan en la Tabla 15 para las mezclas control (sin inóculo) y la Tabla 16 para las mezclas que contienen inóculo.

A partir de la caracterización de las mezclas control de la Tabla 15 se puede observar que en general que la relación C/N de las mezclas sin inóculo se encuentran dentro del óptimo mencionado por Abbasi y col. (2012), de 20:1 a 30:1, marcado en la Gráfica 3 en color gris, la mezcla con menor relación de C/N es A1 con 19, lo que indica la gran cantidad de N_2 que presenta el suero de leche (SR), las mezclas con valores mayores son A3 con 31, A5 con 33 y B5 con 31 por la gran cantidad de carbono en los materiales vegetales usados en esta mezcla.

Para las mezclas con inóculo reportadas en la Tabla 16, se muestra que los valores calculados de relación C/N decrecen en comparación con los que no contienen inóculo, por la gran cantidad de N_2 contenido en el inóculo ($\text{C/N}=10$), con un rango de valores comprendidos entre a1 con 12 y b5 con 20. Sin embargo al ser valores teóricos no fueron factor decisivo para la selección de las mezclas.

Tabla 15. Resultados de la evaluación en las mezclas control (sin inóculo).

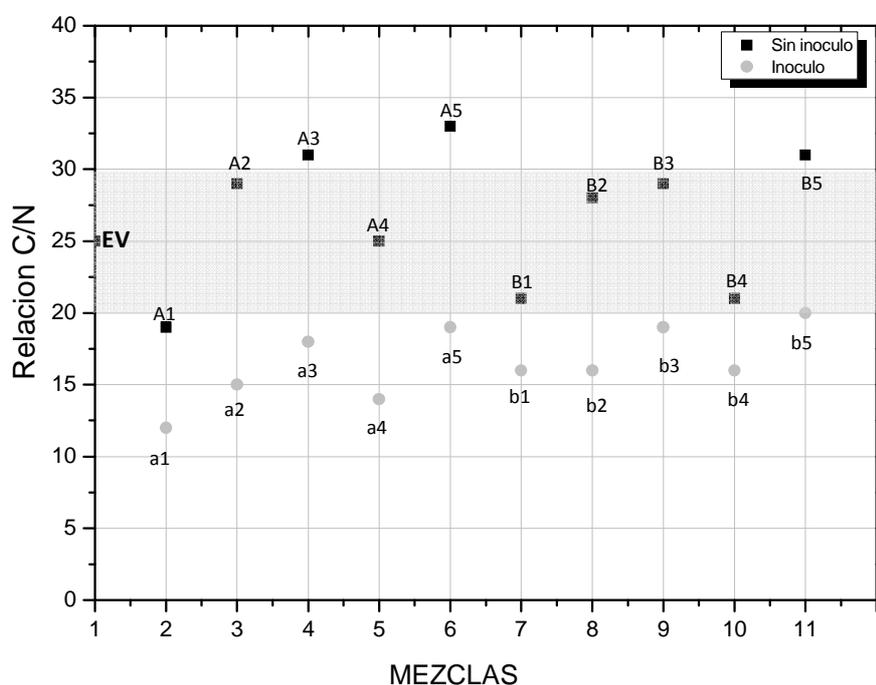
		*C/N	pH		ST (%)	SVT de ST (%)	NH ₃ (g/ L ROA)
			INICIAL	FINAL	INICIAL	INICIAL	FINAL
EV	1:EV/1:AGUA	25	7.0	7.1	7	65	4.3
A1	1: EV/ 1: SR	19	7.0	5.8	10	75	1.7
A2	1: EV/ 0.5: PJ	29	7.8	7.7	14	61	3.9
A3	1: EV/ 1: FV	31	7.0	5.5	10	77	1.5
A4	1: EV/ 0.5: PJ/1: SR	25	7.0	6.9	13	72	1.0
A5	1: EV/ 0.5: PJ/1: FV	33	7.0	6.6	14	81	1.9
B1	2: EV/ 1: SR	21	6.9	6.9	10	78	1.3
B2	2: EV/ 0.5: PJ	28	7.3	7.7	14	65	1.9
B3	2: EV/ 1: FV	29	6.9	7.0	11	77	1.5
B4	2: EV/ 0.5: PJ/1: SR	21	6.9	7.5	13	71	1.8
B5	2: EV/ 0.5: PJ/1: FV	31	6.8	7.1	14	78	6.5

Datos promedios de C/N: Relación carbono y nitrógeno teórico, datos promedio al inicio y final de la digestión de ST: Sólidos Totales, STV: Sólidos Totales Volátiles, DQO: Demanda Química de Oxígeno y NH₃: Amoniacó. **FUENTE:** El autor, 2013.

Tabla 16. Resultados de la evaluación en las mezclas con inóculo.

		*C/N	pH		ST (%)	SVT de ST (%)	NH ₃ (g/ L ROA)
			INICIAL	FINAL	INICIAL	INICIAL	FINAL
a1	1: EV/ 1: SR / 1:LA	12	7.0	7.1	10	71	1.8
a2	1: EV/ 0.5: PJ/ 1:LA	15	7.6	8.5	17	63	0.9
a3	1: EV/ 1: FV/ 1:LA	18	7.0	6.9	10	72	3.5
a4	1: EV/ 0.5: PJ/1: SR/ 1:LA	14	6.8	7.7	13	72	1.6
a5	1: EV/ 0.5: PJ/1: FV/ 1:LA	19	6.8	7.2	12	83	4.4
b1	2: EV/ 1: SR / 1:LA	16	7.5	6.5	9	78	3.5
b2	2: EV/ 0.5: PJ/ 1:LA	16	7.0	6.9	13	69	7.0
b3	2: EV/ 1: FV/ 1:LA	19	7.0	6.9	9	77	5.5
b4	2: EV/ 0.5: PJ/1: SR/ 1:LA	16	7.0	7.5	14	72	2.5
b5	2: EV/ 0.5: PJ/1: FV/ 1:LA	20	7.0	6.5	14	74	3.3

Datos promedios de C/N: Relación carbono y nitrógeno teórico, datos promedio al inicio y final de la digestión de ST: Sólidos Totales, STV: Sólidos Totales Volátiles, DQO: Demanda Química de Oxígeno y NH₃: Amoniacó. **FUENTE:** El autor, 2013.

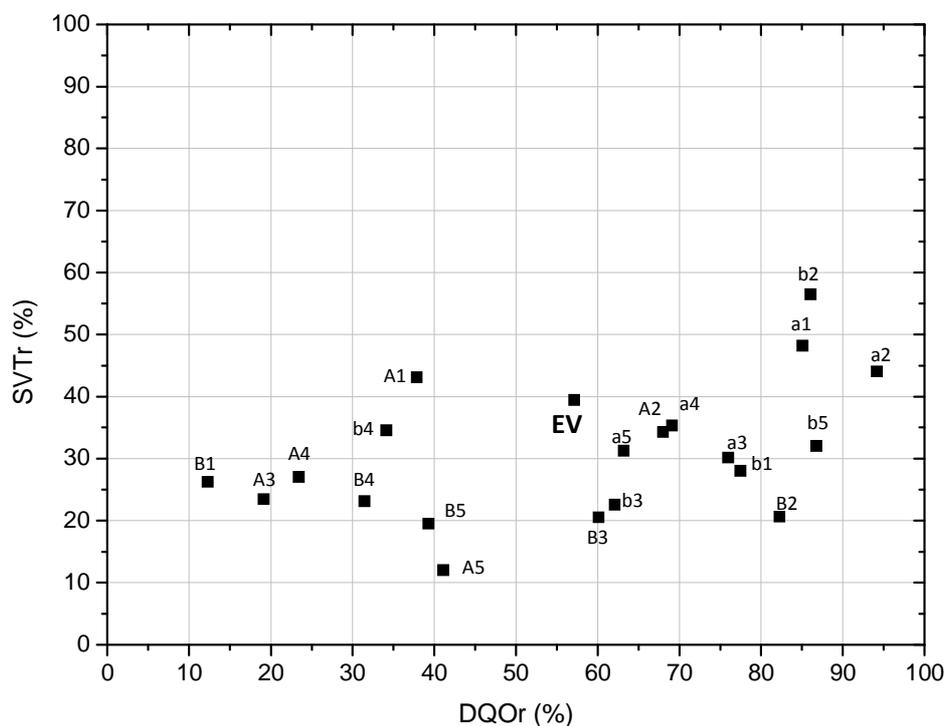


Gráfica 3. Relación C/N de las mezclas evaluadas. En el recuadro gris se observa el óptimo mencionado en la literatura (20-30).

En cuestión de ST, este parámetro da una idea del agua disponible en la etapa de hidrólisis (Avendaño 2010), los resultados en la Tabla 15 y Tabla 16 muestran que las mezclas se encuentran en los dentro del rangos establecidos $ST < 15\%$, para iniciar la digestión anaerobia en condiciones óptimas de humedad (Carrillo 2004). El blanco EV tiene un valor de 7%, mientras que las mezclas presentan valores entre (b1 y b3) 9% y (A2, A5, B2, B5, b4 y b5) 14%. El resultado de la mezcla a2 es de $ST = 17\%$ debido a las características físicas de la paja y rastrojos (volumen), hizo difícil la dilución y por tanto el ajuste de los $ST \geq 15\%$, por lo que se decidió probar a esta concentración de sólidos la factibilidad de la mezcla. En relación al parámetro del porcentaje de sólidos volátiles respecto al de sólidos totales (% SVT de ST), se obtuvieron rangos entre A2 con 61% y A5 con 81%, en general las mezclas se encontraron en un rango superior al 65% lo que indica que son buenos sustratos para la digestión anaerobia (Ainia 2011).

El amoníaco fue monitoreado antes y después de la digestión, pues al trabajar con excretas de vaca (EV) son propensas a la generación de amonio, como resultado de la degradación de proteínas, aminoácidos y urea, los cuales son transformados en parte a nitrógeno total (Lara y Hidalgo 2011). Cuando un sustrato de la digestión anaerobia presenta valores entre 1.5 y 3 g/L tiene efecto inhibitorios a pH altos, asegura Varnero (2011), la mezcla a3 presentó un pH final de 8.5 el cual se considera alto y un valor de amonio final de 3.2 g/ L ROA, como resultado la mezcla es propensa a la inhibición por amonio, sin embargo los 30 días de digestión no se presentó este fenómeno. Basados en el análisis de resultado el inóculo aumentó la concentración de NH_3 , por la cantidad de N_2 que contiene (relación C/N). Otro fenómeno observado es la capacidad del suero de leche (SR) para mantener la generación de NH_3 en concentraciones bajas al final de la digestión comparado con otros residuos, resultando en valores menores a 2 g/L ROA para las mezclas A1, A4, B1, B4, a1 y a4 observando que el SR es capaz de mantener y regular las concentraciones de NH_3 cuando se encuentra en concentraciones mayores de $\frac{1}{4}$ en la mezcla, pues mezclas como b1 y b4 que contienen proporciones de SR menores a $\frac{1}{4}$ obtuvieron valores de 3.5 y 2.5 g/L ROA respectivamente .

Para evaluar la eficiencia de la digestión y tener una idea aproximada de la calidad del fertilizante orgánico a obtener al final de los 30 días de digestión, se calculó la reducción de microorganismos (%SVT reducido) con la cantidad de sustrato consumido (%DQO reducido). Los cuales son ilustrados en la Gráfica 4, en donde se evidencia que la adición de inóculo incrementó entre un 3% (b3) y hasta un 84% (b1) en el consumo de sustrato (DQO) comparado con el sistema sin inóculo (B3 y B1). En general los sistemas de codigestión presentaron degradaciones tan bajas como 12% (B1) hasta un máximo de 83% (B2), mientras que sistemas inoculados como se muestra en la gráfica obtuvieron porcentaje de consumos mayores, alcanzando un máximo de 94%(a2).



Gráfica 4: Porcentajes de reducción de sólidos volátiles (% SVTr) vs el porcentaje de reducción de DQO (%DQOr), de las mezclas evaluadas, durante los 30 días de digestión.

En la reducción de microorganismos (SVT), con la adicción de inóculo se presentó un incremento en la mayoría de las mezclas entre un 9% (b3) y hasta un 62% (a5) comparado con el sistema control (B3 y A5), la mezcla a1 presentó una reducción menor al control (34%) y una reducción mayor (56%) de materia orgánica (DQO) lo que podría indicarnos que los microorganismos tienen alto rendimiento consumiendo la materia orgánica. Esto debido a que al aumentar la concentración de microorganismos se incrementó los requerimientos de materia orgánica. Sin embargo, estos factores son fácilmente maleables con el tiempo de digestión y la forma de alimentación de los reactores de tal manera que no son factores de selección de mezclas.

Un parámetro considerado como un indicador de la salud del digestor y estabilidad de la mezcla durante el desarrollo de la digestión anaerobia es el pH. Debido a la naturaleza ácida y la alta biodegradabilidad de los residuos del estudio, se considera un factor

determinante para selección de las mezclas para su evaluación en la tercera etapa del proyecto. En función a los análisis de la Tabla 15, las mezclas A1 y A3 presentaron los valores más bajos de pH fuera del óptimo establecido en el presente trabajo (6.5-8) con valores 5.8 y 5.5 respectivamente, estas mezclas contenían SL y FV en proporciones 1:1, con lo que se corroboró una vez más lo presentado en la etapa 1 debido a su naturaleza ácida de estos residuos la capacidad buffer de las EV no es suficiente para evitar la acidificación. Por otro lado se evidenció que la adición de inóculo favoreció a la estabilidad de las mezclas pues a1 y a3 que contenían inóculo obtuvieron valores de pH dentro del óptimo. La mezcla a2 presentó un pH de 8.5, como se reporta en la Tabla 16, pero al no tener valores tóxicos de NH_3 (0.9 g/L ROA) no tuvo problemas de inhibición, se evidencia con el crecimiento de microorganismos (SVT) anteriormente mencionado y por tanto en su producción de biogás. Se observó una cierta correlación del pH con la producción de biogás, ya que al encontrarse dentro de los parámetros de pH establecidos la DA se lleva a cabo de manera óptima ya que permite que la población metanogénica se desarrolle y como consecuencia pueda generar biogás con éxito (Veyna 2007).

En cuanto a la producción de biogás, el rendimiento promedio de metano de los sistemas probados y con su réplica se resumen en la Tabla 17, los rendimientos fueron calculados en $\text{L/Kg DQO}_{\text{reducido}}$ y $\text{L/Kg SVT}_{\text{reducido}}$ para fines de comparación con sus respectivas desviaciones estándar, (Se tomaron como base los rendimientos calculados en $\text{L/Kg SVT}_{\text{reducido}}$, pues presentaron valores con menor desviación estándar).

El blanco (EV/Agua) obtuvo un rendimiento promedio de 128 ± 9 L/Kg SVT , y un valor de producción diaria de 4.3 ± 0.2 L/Kg SVT , estos valores serán tomados como punto de partida para la selección de las mezclas pues se busca encontrar mejora en la generación de metano con los sistemas de codigestión. No se encontraron en literatura mezclas con los mismos residuos y proporciones aquí reportadas, pero en general valores obtenidos son más bajos que los obtenidos por otros investigadores con pruebas similares [(Ahn, y

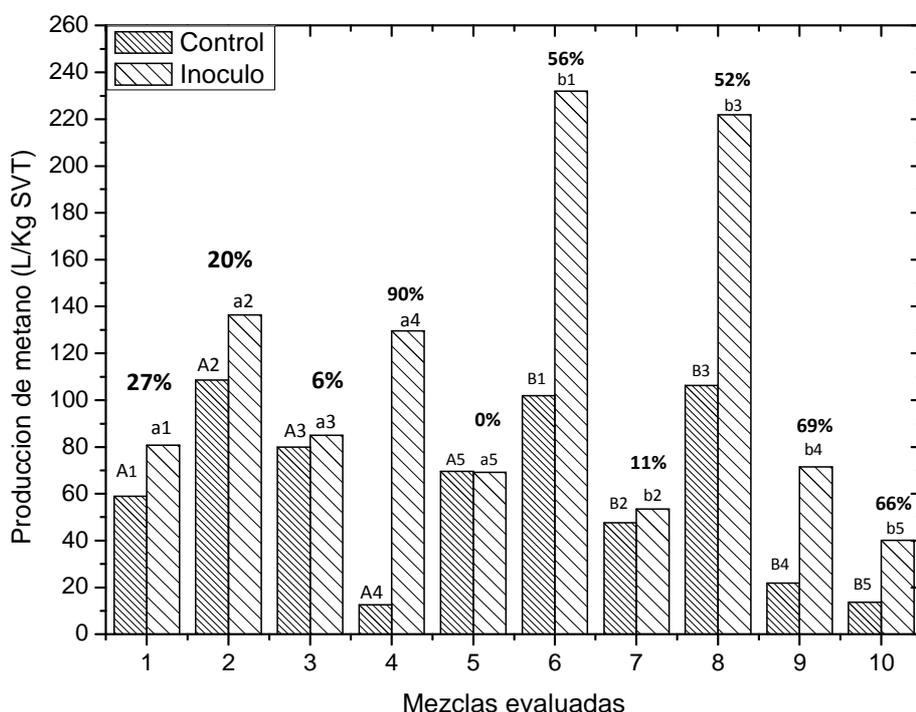
otros 2010) (Lahdhed, y otros 2009), (Lin, y otros 2011)], los cuales reportan rangos de (0.28 a 0.3 m³/Kg SVT), para residuos similares.

Tabla 17. Rendimiento de producción de biogás de los sistemas evaluados.

		Rendimiento de CH ₄				Producción diaria de CH ₄ (L/Kg SVT*d)	
		L/Kg DQO r		L/Kg SVT _r		4.3	±0.2
		CONDICIONES NORMALES (0°C, 1 atm)					
EV	1:EV/1:AGUA	61.0	±1.0	128	±9.0	4.3	±0.2
A1	1: EV/ 1: SR	45.0	±8.6	59.0	±10	2.0	±0.3
A2	1: EV/ 0.5: PJ	26.0	±7.5	109	±12	3.6	±0.4
A3	1: EV/ 1: FV	174	±24	80.0	±10	2.7	±0.3
A4	1: EV/ 0.5: PJ/1: SR	14.0	±3.1	13.0	±7.6	0.4	±0.3
A5	1: EV/ 0.5: PJ/1: FV	19.0	±1.6	69.0	±11	2.3	±0.4
B1	2: EV/ 1: SR	171	±37	102	±3.7	3.4	±0.1
B2	2: EV/ 0.5: PJ	11.0	±0.3	48.0	±1.4	1.6	±0.0
B3	2: EV/ 1: FV	20.0	±6.6	106	±5.7	3.5	±0.2
B4	2: EV/ 0.5: PJ/1: SR	43.0	±25	22.0	±6.7	0.7	±0.2
B5	2: EV/ 0.5: PJ/1: FV	7.0	±2.7	14.0	±3.2	0.5	±0.1
a1	1: EV/ 1: SR / 1:LA	26.0	±4.1	81.0	±6.0	2.7	±0.2
a2	1: EV/ 0.5: PJ/ 1:LA	62.0	±40	136	±42	4.5	±1.4
a3	1: EV/ 1: FV/ 1:LA	30.0	±14	85.0	±10	2.8	±0.3
a4	1: EV/ 0.5: PJ/1: SR/ 1:LA	107	±48	130	±17	4.3	±0.6
a5	1: EV/ 0.5: PJ/1: FV/ 1:LA	64.0	±14	69.0	±4.0	2.3	±0.1
b1	2: EV/ 1: SR / 1:LA	100	±20	232	±45	7.7	±1.5
b2	2: EV/ 0.5: PJ/ 1:LA	73.0	±22	53.0	±9.0	1.8	±0.3
b3	2: EV/ 1: FV/ 1:LA	129	±78	222	±17	7.4	±0.6
b4	2: EV/ 0.5: PJ/1: SR/ 1:LA	120	±9.6	72.0	±2.0	2.4	±0.1
b5	2: EV/ 0.5: PJ/1: FV/ 1:LA	30.0	±19	40.0	±4.0	1.3	±0.1

Datos promedios de producción de metano (CH₄) expresados en L/Kg DQO consumida y en L/Kg Sólidos Volátiles Totales, producción diaria de metano (CH₄) expresados en L/Kg Sólidos Volátiles Totales * día. Desviación estándar (±). **FUENTE:** El autor, 2013.

La adición de inóculo favoreció la producción de metano comparados con el control, como se observa en la Gráfica 5, el incrementó es entre 6% (mezcla A3 con respecto a a3) y 90% (A4 con respecto a a4). Esto sugiere que tuvo un efecto en la aceleración de la hidrólisis y acidogénesis, haciendo eficiente el consumo del sustrato y por tanto produciendo más metano (Veyna 2007).



Gráfica 5. Producción de metano de los sistemas control (sin inóculo) y los sistemas inoculados, y sobre las barras de inóculo el porcentaje de mejora que presentó con respecto a su control.

Los menores rendimientos se presentó en los sistemas A4, B5, y B4 con valores de 13 ± 8 , 14 ± 3 y 22 ± 7 L/Kg SVT, los cuales en su composición contienen pajas y rastrojos, contienen ST mayores al 13% dificultando la movilidad de las bacterias, por otra parte su composición química (alto contenido de lignina), disminuyo la digestibilidad de cada uno de los sistemas control en donde fue evaluado este residuo. El mayor rendimiento respecto al blanco (128 ± 9 L/Kg SVT) se presentó en el sistema b1 con un valor de 232 ± 45 L/Kg SVT, coincidió con su alto consumo de sustrato ($DQO_{reducido} = 78\%$), seguido por el sistema b3 con un valor de 222 ± 17 L/Kg SVT, con consumo de $DQO_{reducido}$ de 62%, en tercer lugar se encontró el sistema a2 con un valor de 136 ± 42 L/Kg SVT, con consumo de $DQO_{reducido}$ de 94%, y por último el cuarto lugar lo presentó a4 con un valor de 130 ± 17 L/Kg SVT, presentó una reducción de DQO de 69%, lo que representa 1.8, 1.7, 1.07 y 1.01 veces más que el blanco (EV/Agua).

8.2.1. Conclusiones parciales para la etapa 2.

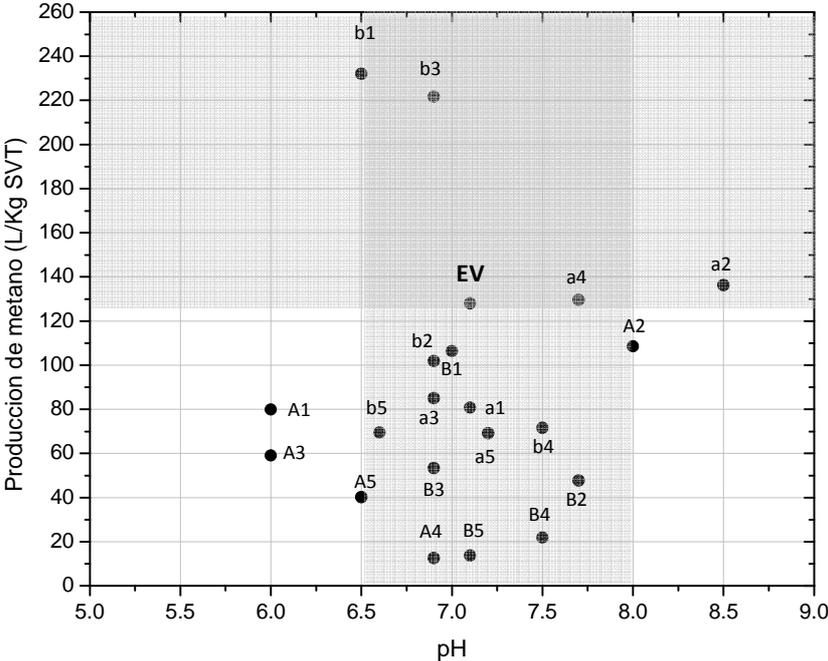
En esta etapa se llegaron a las siguientes conclusiones:

- **C/N:** La relación carbono / nitrógeno calculada basada en los datos obtenidos de la literatura, se obtuvieron valores que se encuentran en rangos de $10 < C/N < 20$ para los inoculados y los controles de $19 < C/N < 33$. Sin embargo no es un criterio de selección como resultado de que están basados en literatura y los valores reportados oscilan en rangos muy amplios en %C, %N y C/N de las materias primas utilizadas en este estudio.

- **Estabilidad o pH:** En el pH es el primer filtro establecido en la selección de las mezclas, se concluye con base a los resultados que la mayoría de los ensayos exceptuando por A1, A3 y a2, se encuentran en pH óptimo mostrado en el recuadro e gris en la Gráfica 6, comportamiento esperado atribuido a la estabilidad de la excreta de vaca ya probada en la etapa anterior.

- **Producción de Biogás y metano:** En consecuencia el segundo y principal criterio de selección es la producción de biogás purificado de las mezclas en L /Kg SVT en condiciones normales, las mezclas fueron evaluadas según la acumulación de biogás en los 30 días de digestión, en la Gráfica 6 son mostradas en el recuadro gris las mezclas que obtuvieron una producción mayor de metano con respecto al blanco (b1, b3, a2, a4).

Se concluye que las mezclas que presentaron estabilidad y una mayor producción de metano con respecto al blanco son **b1**= 2: EV/ 1: SR / 1: LA, y **b3**= 2: EV/ 1: FV / 1: LA, en la Gráfica 6 se ilustra como la intersección entre ambos recuadros. Con base a estas conclusiones se elabora un plan de trabajo para evaluarse en los biodigestores que se muestra en Figura 10.



Gráfica 6. Resumen de los resultados de los principales criterios de selección de mezclas estabilidad o pH marcado el óptimo en el recuadro gris (6.5-8) y producción de metano marcado en el recuadro gris los valores de producción de metano superiores al blanco (128± 9 L/kg SVT).

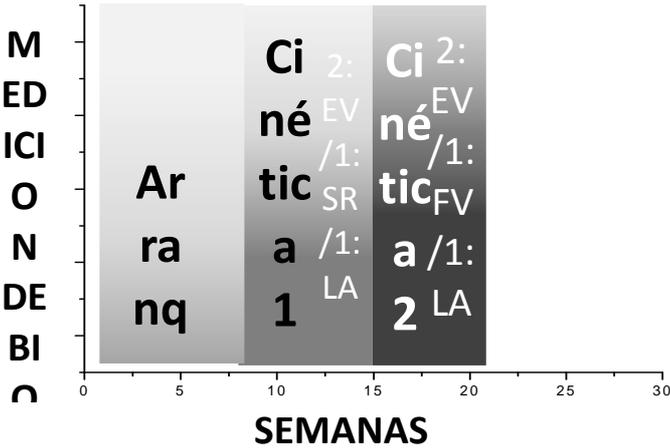


Figura 10. Plan de trabajo para evaluar las mezclas en los biodigestores.

8.3. Tercera Etapa: Codigestión en biodigestores piloto.

Basados en los resultados obtenidos en la etapa anterior tres mezclas (**b1**= 2: EV/ 1: SR / 1: LA, **b3**= 2: EV/ 1: FV / 1: LA) son seleccionadas como mejores productoras de volumen de metano, las cuales son probadas en los biodigestores seleccionados.

8.3.1. Montaje.

Se realizó el montaje de los biodigestores como se muestra en la Figura 11, se inocularon con 26 kg de una mezcla con las siguientes proporciones, 3: Excreta de vaca/ 1: residuos vegetales/ 1: suero de leche/ 1: Lodos anaerobios/ Agua necesaria para alcanzar los ST de trabajo de cada biodigestores ($MC \leq 7\%$ y $FC \leq 7\%$), con el fin de adecuar el sistema con bacterias capaces de digerir los principales componentes de las alimentaciones a evaluar. Se dejó aproximadamente un 30% de espacio de cabeza en cada digestor.



Figura 11. Fotografías del montaje del biodigestor piloto de flujo pistón.

8.3.2. Arranque.

El día 5 de iniciada la digestión se presentó una baja de pH (6.5) en ambos biodigestores, son ajustados (CaCO₃), pero no sé lograr su estabilización por tal motivo en el día 11 son enriquecidos con 2 partes más de inóculo (LA), obteniendo finalmente una mezcla inoculadora con las siguientes proporciones 3: Excreta de vaca/ 1: residuos vegetales/ 1: suero de leche/ 3: Lodos anaerobios/ Agua la cual es descrita en la Tabla 18.

Al enriquecer la mezcla con LA, alcanza la misma proporción que (EV) y le proveyó a la mezcla humedad, microorganismos activos y nitrógeno para poder contrarrestar los ácidos grasos y poder estabilizar el pH para llevar acabo la digestión anaerobia.

Tabla 18. Caracterización de la mezcla inoculadora final (3: EV/ 1: FV/ 1: SR/ 3: LA/ Agua).

Parámetro	pH	ST (%)	SVT de ST (%)	DQO (g/Kg ROA)	NH ₃ (g/Kg ROA)
Mezcla continua (MC)	7.0	4.0	64	60	0.7
Flujo pistón (FP)	7.6	7.4	65	59	0.7

Sólidos Volátiles Totales (ST), Sólidos Volátiles Totales (SVT), Amoniaco (NH₃), Demanda Química de Oxígeno (DQO). **FUENTE:** El autor, 2013.

Se establecen a partir de esta nueva mezcla los parámetros de operación de los digestores los que se resumen en la Tabla 19 y Tabla 20. A partir del día 11 en que la mezcla inoculadora fue modificada se monitorearon los digestores con el fin de lograr su estabilidad para dar inicio a las cinéticas de producción de biogás de las alimentaciones seleccionadas, se muestra en un círculo azul en la Gráfica 7 y Gráfica 8.

La agitación fue establecida en 30 minutos dos veces al día, tratando de sea eficiente y cuidadosa para evitar que la simbiosis de los acetogénicos y metanogénicos sea

molestada, que los microorganismos no sean destruidos por la agitación demasiado fuerte pues son sensibles al estrés como lo que reporta Deublein y Steinhauser 2008.

Tabla 19. Parámetros de operación del biodigestor de mezcla completa (MC).

Digestor semicontinuo mezcla completa (MC)				
	Mezcla inicial	EV:3/LA:3/ SR:1/FV:1	Carga orgánica	0.84 Kg SVT /m ³ *d
	Cantidad	26 kg /28 L	Tiempo de retención	40 días
	ST	4%	pH	7.0
	Temperatura	35± 5°C	Agitación	1550 r/min 30min x 2

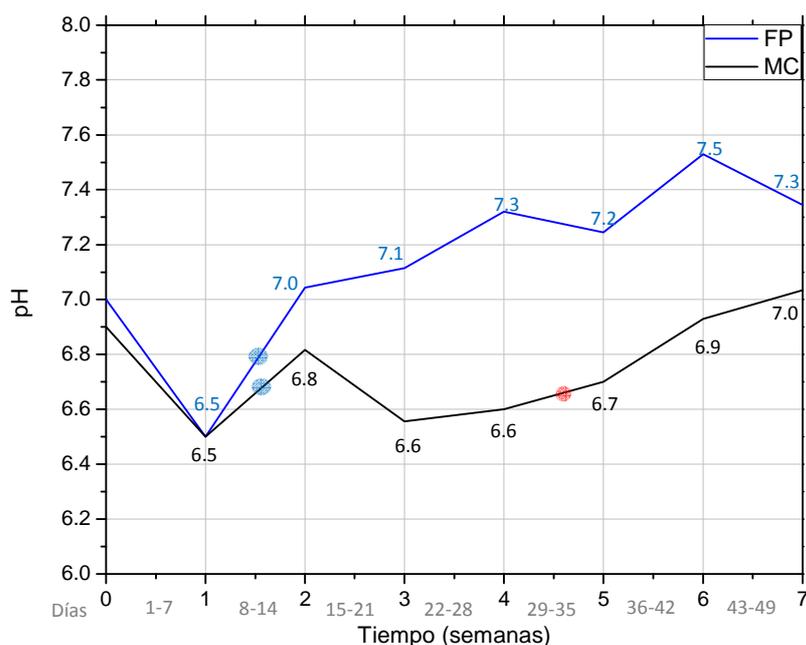
Tabla 20. Parámetros de operación del biodigestor de flujo pistón (FP).

Digestor semicontinuo mezcla completa (MC)				
	Mezcla inicial	EV:3/LA:3/ SR:1/FV:1	Carga orgánica	1.11 Kg SVT /m ³ *d
	Cantidad	26 kg /28 L	Tiempo de retención	40 días
	ST	7.4%	pH	7.0
	Temperatura	35± 5°C	Agitación	1550 r/min 30min x 2

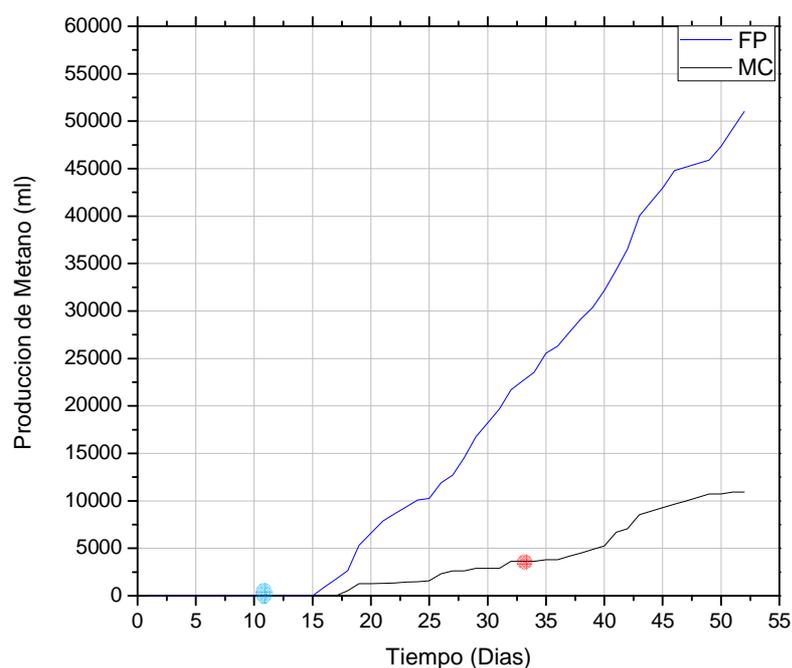
Los valores de pH presentados en el arranque son reportados Gráfica 8 en donde se muestra el comportamiento de descenso de pH en ambos digestores, en un círculo azul se muestra el día en que fue modificada la mezcla. En la semana 3, el pH del biodigestor de mezcla completa (MC) llegó a descender a 6.6 donde se mantuvo por 2 semanas, lo que indica el inicio de la hidrólisis y se evidencia con el inicio de producción de biogás el día 17 mostrado en la Gráfica 8, en la semana 5 (día 31) se detuvo la producción de biogás por lo que fue alimentado el día 33 (semana 5), marcado con un círculo rojo en las Gráfica 7 y Gráfica 8 logrando la neutralidad entre la semana 6 y 7, continuando con la producción de

biogás, y así logrando finalmente una producción final de 10,921 mL y un rendimiento de 190 L/Kg SVT.

Caso contrario el biodigestor de flujo pistón (FP) en negro en la Gráfica 7, el cual a partir de la modificación de la mezcla inicial presentó tendencia a pHs arriba de la neutralidad dándole así más estabilidad comparado con MC, el inicio de la producción de biogás se dio el día 15 como se observa en la Gráfica 8, logrando una producción de biogás de 51,006 mL y un rendimiento de 256 L/Kg SVT, lo que representa 1.4 veces más que MC, lo que se atribuye a una mayor estabilidad con valores de pH mayores a 7. Una vez que es evidenciada la presencia de metanogénicos se dio inicio a las 2 cinéticas de producción de biogás con las mezclas seleccionadas.



Gráfica 7 . Comportamiento de pH final (estabilidad) en los biodigestores en la etapa de arranque, marcado en punto azul la modificación de la mezcla y el punto rojo la alimentación realizada.



Gráfica 8. Producción de biogás acumulado en condiciones normales (1atm, 0°C) en los biodigestores en la etapa de arranque, marcado en punto azul la modificación de la mezcla y el punto rojo la alimentación realizada.

8.3.3. Cinética 1 de producción de biogás (2: EV/ 1: SR / 1: LA).

A los 52 días de proceso se adicionó 1.3 kg de una mezcla de codigestión (2: Excreta de Vaca/ 1: Suero de Leche / 1: inóculo, Agua necesaria para la dilución) a la mezcla inoculadora, extrayendo el volumen de efluente correspondiente para mantener los digestores a 26 kg, el comportamiento semanal de esta cinética de producción de biogás esta resumido en las Tabla 21 para MC y FP. El ORL promedio en esta etapa de MC y FP es 0.8 y 1.0 Kg SVT/m³*d respectivamente, menor a las pruebas preliminares en donde era de 1.6 Kg SVT/m³*d y aproximadamente 0.1 menos que en la etapa de arranque.

Los sólidos totales promedios de trabajo son de 5±1% para MC y 7±1% para FP. La producción de biogás se detuvo los días 13 y 32 en el digestor MC mientras que FP se

detuvo el día 32, por lo que fueron alimentados, el día 16 para MC reflejando un ligero aumento en SVT y DQO en la semana 4 y el día 34 en ambos digestores reflejando un ligero aumento en SVT y DQO en la semana 6 para MC y solo de DQO para FP.

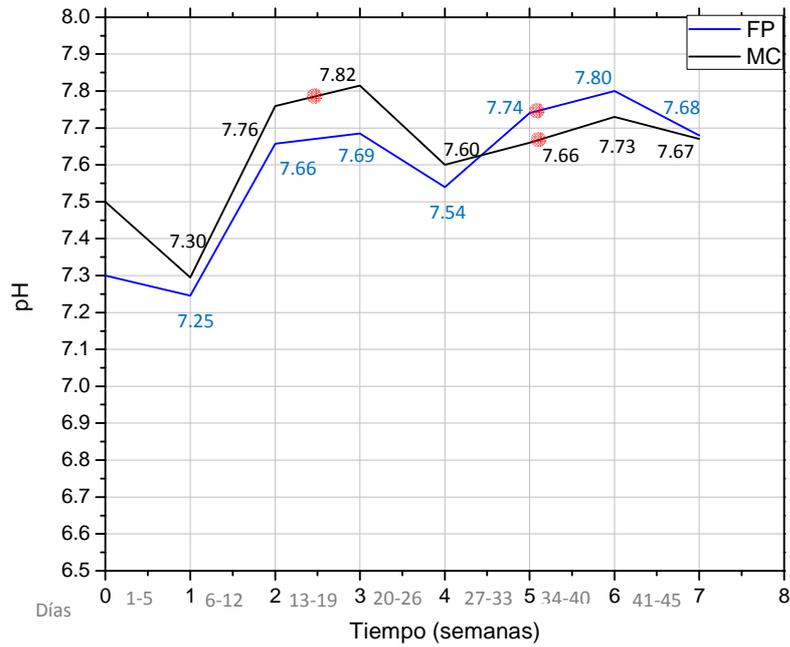
Los biodigestores fueron monitoreados en NH₃ para evitar la inhibición, balanceando el pH con la adición de residuos ácidos (FV y SR), ya que las excretas de vaca (EV) son grandes productoras de amoníaco, con los resultados obtenidos se confirma el fenómeno presentado y descrito en la etapa anterior sobre el suero de leche (SR) pues a pesar de tener una composición rica en proteínas es capaz de minimizar los efectos del amoníaco pues fue reducido de 3 a 1 g/Kg ROA como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Resumen del comportamiento de la cinética 1 en los biodigestores

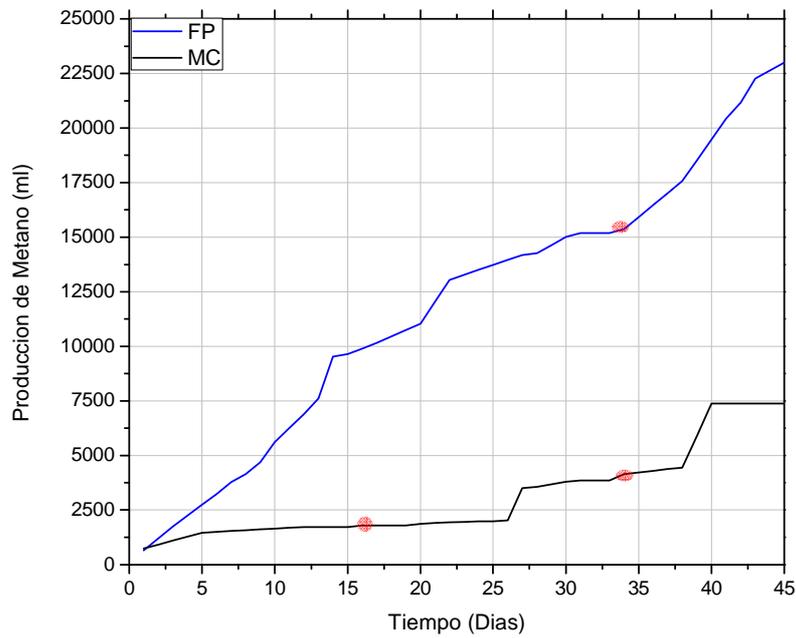
Semana	Días	SVT (g/Kg ROA)		DQO t (g/Kg ROA)		DQO s (g/Kg ROA)		NH ₃ (g/Kg ROA)	
		MC	FP	MC	FP	MC	FP	MC	FP
1	1-5	66	52	69	82	29	36	3	3
2	6-12	24	42	62	82	30	36	-	-
3	13-19	21	21	53	67	33	37	-	-
4	20-26	38	45	60	56	25	33	2	2
5	27-33	22	43	53	60	25	34	-	-
6	34-40	35	42	54	61	25	32	-	-
7	41-45	23	30	52	64	24	30	1	1

Sólidos Volátiles Totales (SVT), Demanda Química de Oxígeno total (DQOt), Demanda Química de Oxígeno soluble (DQOs), Amoníaco (NH₃). FUENTE: El autor, 2013.

En esta etapa el pH se incrementó, pero se mantuvo dentro de lo establecido como óptimo (6.5-8) como se muestra a detalle en la Gráfica 9 y el valor máximo obtenido fue de 7.8 de MC en la semana 3 producto de la alimentación pero se estabilizó como resultado de la hidrólisis y acidogénesis evidenciándose al reducir el pH después de cada alimentación como se muestra en la Gráfica 9, y también se ve reflejado en la producción de metano después de algunos días como se muestra en la Gráfica 10.



Gráfica 9. Comportamiento de pH en los biodigestores en la cinética 1, en círculos rojo se muestran las alimentaciones realizadas.



Gráfica 10. Producción de metano acumulado en condiciones normales (1atm, 0°C) en los biodigestores en la cinética 1, en círculos rojo se muestran las alimentaciones realizadas.

En esta etapa la reducción de SVT en las 7 semanas es de 65% para MC y 42% para FP, ambos digestores presentaron valores de remoción de la materia orgánica bajas comparado con comparados con estudios de codigestión con residuos similares reportan reducciones entre 73 y 85% (Bouallagui y col.,2009), respecto a la reducción del sustrato se obtuvieron comportamientos muy similares en ambos digestores, FP obtuvo valores de remoción de DQO_{total} de 26%, DQO_{soluble} de 15% y para MC de DQO_{total} de 21%, DQO_{soluble} de 17%, se muestra el comportamiento a detalle en la Tabla 22.

Estas reducciones son concordantes con el bajo volumen de producción de metano acumulado en esta etapa, (MC= 7,377 L y FP= 22,995 L), los rendimientos de metano de los biodigestores son de 23 L /kg SVT para MC y 45 L /kg SVT para FP, comparados ambos digestores FP tuvo un rendimiento 1.9 veces más alto que MC. Comparados los rendimientos con las pruebas preliminares (232 ± 45 L/Kg SVT), y consumo de materia orgánica (DQO_{reducido}=78%), ambos digestores se encuentran por debajo de lo presentado por la mezcla en la etapa anterior (FP 76% y MC 88%), esto se atribuye al cambio de escala, al cambio en el control de la temperatura, y el cambio de batch a semicontinuo que será explicado más adelante. Durante las 7 semanas de estudio se obtuvo una proporción máxima de 32% de metano en ambos digestores los cuales se presentó en la semana 1, 6 y 7.

Tabla 22. Resumen de resultados de la cinética 1 de producción de biogás.

Biodigestor	Carga orgánica (ORL)	Remoción (%)		Producción neta	Rendimiento Metano acumulado	Productividad Metano acumulado	CH ₄ MAX
	Kg SVT/m ³ *d	DQOt	SVT	mL CH ₄	L/Kg SVTr	L/ Kg SVT*día	%
Mezcla continua	0.7 ±0.3	24	65	7, 377	23	0.60	32
Flujo pistón	1.0±0.3	26	42	22,995	45	1.11	32

Datos promedios semanales de Carga orgánica (ORL) expresados en Kg Sólidos Volátiles Totales alimentados /m³ de digestor *día, desviación estándar (±), Sólidos Volátiles Totales (SVT), Demanda Química de Oxígeno total (DQOt), datos de producción de metano (CH₄) en condiciones estándar (1 atm, 0°C) expresados en L/Kg Sólidos Volátiles Totales consumidos, producción diaria de metano (CH₄) expresados en L/Kg Sólidos Volátiles Totales * día. **FUENTE:** El autor, 2013.

8.3.4. Cinética 2 de producción de biogás (2: EV/ 1: FV / 1: LA).

Una vez transcurridos los 40 días de la primera cinética de producción de biogás y a los 98 días del proceso completo se adicionó 1.3 kg de la segunda mezcla de residuos seleccionada (2: Excreta de Vaca/ 1: Residuos de frutas y verduras / 1: inóculo, Agua necesaria para la dilución) y se extrajeron la misma cantidad de lodos, el comportamiento semanal de esta cinética esta resumido en la Tabla 23. El ORL promedio en esta etapa de MC y FP es 0.4 y 0.87 Kg SVT/m³*d respectivamente, menores a las pruebas preliminares en donde era de 1.8 Kg SVT/m³*d y aproximadamente 0.2 menos que en la etapa de arranque. Los sólidos totales promedios de esta etapa son de 3±0.6% para MC y 6±1% para FP. Los digestores fueron alimentados el día 13, 20 y 34, (semana 2, 3 y 5) al detenerse la generación de biogás, el digestor MC fue enriquecido con 1 kg de LA el día 20 y el día 25 fue alimentado.

Los resultados obtenidos del monitoreo de NH₃ en esta mezcla concuerdan con los resultados de la etapa anterior, pues hubo un aumento de 0.95 a 1.85 para MC y de 1.69 a 3.50 g/Kg ROA lo que representa aproximadamente el doble como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23 . Resumen del comportamiento de la cinética 2 en los biodigestores.

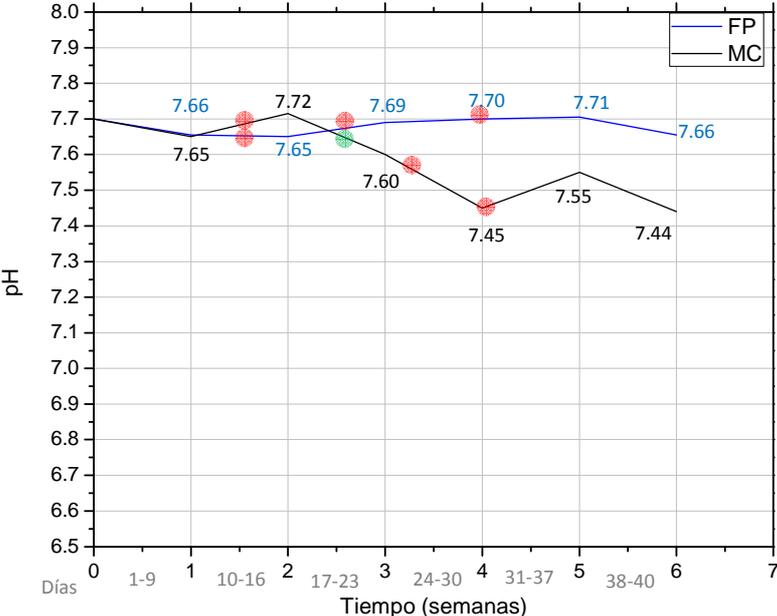
Semana	Días	SVT (g/Kg ROA)		DQO t (g/Kg ROA)		DQO s (g/Kg ROA)		NH ₃ (g/Kg ROA)	
		MC	FP	MC	FP	MC	FP	MC	FP
1	1-9	13	36	55	72	25	30	0.95	1.69
2	10-16	15	45	42	57	25	33	-	-
3	17-23	14	47	47	54	23	19	-	-
4	24-30	16	44	50	56	23	30	-	-
5	31-37	18	33	41	59	25	31	-	-
6	38-40	19	26	50	50	24	29	1.85	3.50

Sólidos Volátiles Totales (SVT), Demanda Química de Oxígeno total (DQOt), Demanda Química de Oxígeno total (DQOs). FUENTE: El autor, 2013.

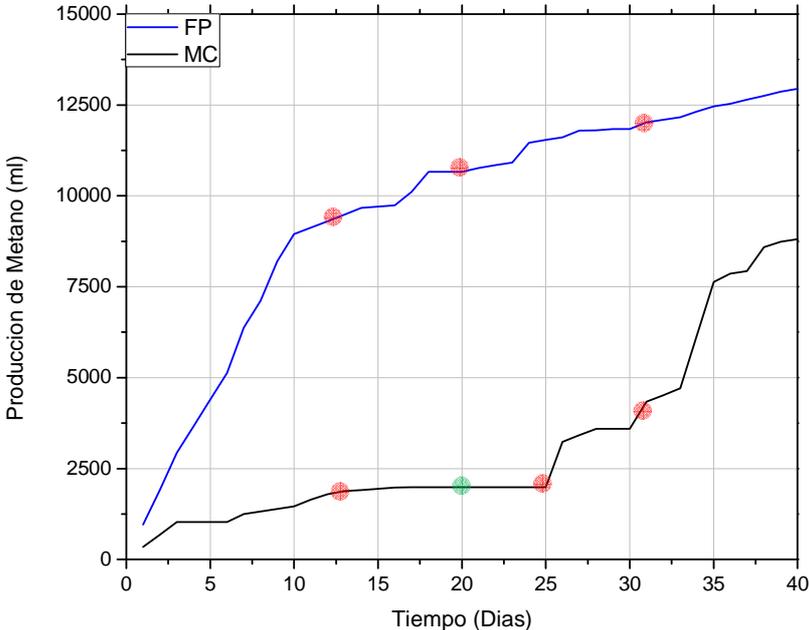
El pH en esta etapa presento valores entre 7.4 y 7.7 pero dentro de lo establecido como óptimo (6.5-8) el comportamiento a detalle de pH se muestra en la Gráfica 11, en rojo se muestran las alimentaciones y su afectación en el pH, en la semana 5 la alimentación fue modificada pues debido a que se pretendía acercar lo más posibles los pH a la neutralidad, disminuyendo la cantidad de excreta de vaca y no adicionando inóculo los principales productores de amoniaco de la mezcla (1: EV/ 1: FV), como resultado MC presentó valores más cercanos a la neutralidad lo que propicio el crecimiento de microorganismos y por tanto aumentó de la producción de biogás como se observa en la Gráfica 12.

La reducción total de SVT en las 6 semanas es de 28% para FP y para MC presentó un 46% de aumento de SVT lo que se traduce en un crecimiento de microorganismos por la adición de LA, por consecuencia afecto el resultado de remoción de la materia orgánica, las cuales permanecieron muy bajas comparados con la etapa anterior y con los estudios de codigestión de residuos similares realizados por Bouallagui y col.,2009 reportando reducciones entre 73 y 85%.

Respecto a la reducción de materia orgánica en el sustrato (DQO) se obtuvieron valores de remoción bajos pues estudios de codigestión similares como (Lin, y otros 2011) que reportan reducciones de 73 y 97 %, FP obtuvo valores de remoción de DQO_{total} de 32%, DQO_{soluble} de 1.8% y MC presentó remociones de DQO_{total} de 17%, DQO_{soluble} de 6%, lo que se puede mejorar alargando el tiempo de digestión.



Gráfica 11. Comportamiento de pH en los biodigestores en la cinética 2, en círculos rojo se muestran las alimentaciones realizadas y en azul el enriquecimiento con inóculo.



Gráfica 12. Producción de biogás acumulado en condiciones normales (1atm, 0°C) en los biodigestores en la en la cinética 2, en círculos rojo se muestran las alimentaciones realizadas y en azul el enriquecimiento con inóculo.

El volumen de producción acumulada obtenida en esta etapa, es de 8,809 L para MC un aumento de un 16% comparado con la alimentación anterior, por el contrario FP obtuvo 12,936 L una disminución del 56% con respecto a la alimentación anterior el comportamiento a detalle de cada uno de los biodigestores se puede observar en la Tabla 24. Se obtuvieron rendimientos de 27 L /kg SVT para MC y 36 L /kg SVT para FP, comparados ambos digestores, FP tuvo un rendimiento 1.3 veces más alto que MC. Se obtuvo una proporción máxima de 58% y 52% de metano en ambos digestores se presentó en la semana 5 y 6 respectivamente.

Comparados los rendimientos con las pruebas preliminares (222 ± 45 L/Kg SVT), y consumo de materia orgánica de ($DQO_{reducido} = 62\%$), ambos digestores se encuentran por debajo de lo presentado por la mezcla en la etapa anterior (FP 84% y MC 88%), esto se atribuye al cambio de escala, al cambio en el control de la temperatura, y el cambio de batch a semicontinuo que será explicado más adelante.

Tabla 24. Resumen de resultados de la cinética alimentación 1.

Biodigestor	Carga orgánica (ORL)	Remoción (%)		Producción neta	Rendimiento Metano acumulado	Productividad Metano acumulado	CH ₄ MAX
	Kg SVT/m ³ *d	DQOt	SVT	mL CH ₄	L/Kg SVTr	L/ Kg SVT*día	%
Mezcla continua	0.40 ±0.3	17	---	8, 809	27	0.70	58
Flujo pistón	0.87±0.3	33	28	12,936	36	1.11	58

(---) No hubo reducción. Carga orgánica (ORL) expresados en Kg Sólidos Volátiles Totales alimentados /m³ de digestor *día, desviación estándar (\pm), Sólidos Volátiles Totales (SVT), Demanda Química de Oxígeno total (DQOt), datos de producción de metano (CH₄) en condiciones estándar (1 atm, 0°C) expresados en L/Kg Sólidos Volátiles Totales consumidos, producción diaria de metano (CH₄) expresados en L/Kg Sólidos Volátiles Totales * día. **FUENTE:** El autor, 2013.

8.3.5. Comportamiento general de los digestores.

Los biodigestores semicontinuos a escala (MC y FP) se mantuvieron en operación por 138 días consecutivos y se probaron diferentes cinéticas de alimentación, con control de pH y temperatura, los resultados generales del comportamiento de cada equipo se encuentran resumidos en la Tabla 25.

Comparando ambos biodigestores, en el biodigestor flujo pistón (FP), la mezcla 2: Excreta de Vaca/ 1: Suero de Leche / 1: inóculo tuvo mejor producción y rendimiento de metano (22,995 mL, 45 L/Kg SVT) comparado con la mezcla 2: Excreta de Vaca/ 1: Frutas y verduras / 1: inóculo en donde (FP=12,936 mL 36 L/Kg SVT), caso contrario sucedió en el biodigestor de mezcla completa (MC) donde la mezcla 2: Excreta de Vaca/ 1: Suero de Leche / 1: inóculo obtuvo menor producción y rendimiento de metano (7,377 L, 23 L/Kg SVT) comparado con la mezcla 2: Excreta de Vaca/ 1: Frutas y verduras / 1: inóculo en donde obtuvo mejores resultados (8,809 L, 27 L/Kg).

Los resultados sugieren que para el caso del biodigestor de MC tuvo un proceso más deficiente respecto a la reducción de SVT, DQO y producción de biogás (31%, 20%, 27 L) que el de FP (47%, 24%, 87 L), atribuido principalmente a los sólidos totales <7% y por consecuencia la ORL más baja con la que fue alimentado en las diferentes etapas del proceso (0.76, 0.70 y 0.40) comparado con FP (0.93, 1.00 y 0.87), esto concuerda con lo mencionado por Kheradmand y col., (2010), el aumento de ORLs resulta en el incremento de la producción de biogás, pues a mayor materia orgánica disponible para los microorganismos mayor conversión de biogás.

Tabla 25. Resumen de comportamiento de lo biodigestores a lo largo del estudio.

ETAPA	Semana	Días	Remoción (%)				ORL		Producción neta		Rendimiento Metano acumulado	
			SVT		DQO t		Kg SVT/m ³ *d		L CH ₄		L/Kg SVTr	
			MC	FP	MC	FP	MC	FP	MC	FP	MC	FP
1	1-7	1-51	50	15	11	0	0.76	0.93	11	51	190	256
2	8-14	52-97	65	42	24	26	0.70	1.00	7	23	23	45
3	15-21	98-138	--	28	17	33	0.40	0.87	9	13	27	36
TOTAL	1-21	1-138	31	47	20	24	0.70	0.93	27	87	65	123

(--) No fue posible la medición de reducción.

Otro de los principales parámetros atribuido a las bajas eficiencias, es por las características propias de diseño de los digestores, como se mencionó en el punto 8.3.2 la velocidad de agitación es de 50 r/min y la calefacción tipo resistencia, la cual es para una agitación continua para obtener una distribución eficiente de la temperatura, como resultado al no tener la agitación continua, la temperatura en los biodigestores no es constante, a pesar de que los microorganismos operados en rangos mesofílicos son más resistentes y pueden tolerar grandes cambios en los parámetros del ambiente, la temperatura influye de manera significativa en los metanogénicos y en su grado de degradación, Kheradmand y col., (2010), por consecuencia la eficiencia se vio reducida significativamente. Reflejándose en el rendimiento total de metano en los 138 días se obtuvieron el rendimiento total de 65 y 123 L/Kg SVTr, para MC y FP respectivamente. Estos bajos rendimientos son atribuidos al cambio realizado en la escala de los digestores (de 1 y 0.5 L a 30 L) y a la adición de la mezcla inoculadora la cual modifico el contenido de las mezclas evaluadas (2:EV/1:SR/1:LA y 2:EV/1:FV/1:LA) con respecto a la etapa 2, y la limitación existente de por sustrato fresco, particularmente de excreta de vaca la cual fue refrigerada (4°C), lo que pudo haber variado la respuesta de la generación de metano y la composición del sustrato y finalmente se cambió el sistema de batch a semicontinuo lo que disminuyo las condiciones de anaerobiosis obtenidas en la etapa anterior por tanto esta variación influyo en el rendimiento final del digestor.

El digestor de flujo pistón presentó varias ventajas: al ser cargado con ST altos ($ST < 7\%$) las mezclas de residuos no requirieron dilución pues naturalmente cumplen ese requisito, esta propiedad de ST también influyó a que el biodigestor presentara buena estabilidad durante todo el proceso, como resultado de estos ST fueron necesarios altos tiempos de retención medido por las frecuencias de alimentación del biodigestor. Las desventajas fueron operacionales ya que al ser un digestor horizontal al ser arrancado y añadir los residuos su puerta lateral represento un problema, y al contener altos sólidos presento un pequeños problema de sedimentación lo que indica que requerirá mantenimiento por la sedimentación.

Para el caso del digestor de Mezcla completa sus ventajas es una tecnología muy sencilla de ser arrancado, requirió menos tiempos de retención comparada con el de flujo pistón lo que se reflejó las cantidades de alimentación añadidas, requiere menos mantenimiento al propiciar un mezclado más homogéneo. Las desventajas es que requiere mayor monitoreo de estabilidad, requiere adición de agua al trabajar con sólidos menores de $ST < 7\%$.

8. CONCLUSIONES GENERALES

Se realizó con éxito la codigestión anaeróbica de residuos orgánicos agroindustriales (ROA), [Frutas y verduras (FV), suero de leche (SR) y pajas y rastrojos (PJ)] con los residuos ganaderos (excretas vaca (EV) y excreta de cerdo (EC) como codigestante, y con lodos anaerobios (LA) como inóculo se concluyen los siguientes puntos:

- En la caracterización físico-química de los ROA y codigestantes se concluye que por sus características podrían presentar algunas deficiencias al ser digeridos en forma individual; FV, SR y LA presentaron alta humedad que permite la acumulación de ácidos grasos, caso contrario PR, EC y EV contiene baja humedad que dificulta la movilidad de las bacterias. Respecto al pH los residuos como FV, SR y EC tienen pH bajo que afecta gravemente la estabilidad de la digestión. Las relaciones C/N con muy alto contenido de nitrógeno lo tienen los residuos como EC, LA y SR caso contrario el porcentaje alto de carbono lo presentaron los residuos vegetales como FV y PJ, en ambos casos se dificultaría la digestión anaerobia por el requerimiento de nutrientes. Por el contrario la excreta de vaca presentó valores de pH y relaciones C/N óptimas para la digestión anaerobia lo que explica su éxito en su digestión individual. Con lo que se concluye que los residuos seleccionados (FV, SR, PJ, EV, EC y LA) al mezclarse pueden contener las características complementarias para cubrir los parámetros necesarios para la digestión anaerobia en humedad, sólidos, C/N y estabilidad.
- En la etapa 1 se establece el porcentaje de ST de trabajo de <15%, esto para mantener la digestión con la mínima de adición de agua, así como se establece que las mezclas no contendrán proporciones mayores de 1:1 de EV/ROA, pues carecerán de estabilidad. Se concluye que la excreta de vaca (EV) es mejor codigestante en comparación con la excreta de cerdo (EC), al mantener los valores óptimos de ST sin necesidad de adición de agua, además presentó mayor estabilidad en la codigestión al no ser necesario un ajuste inicial de pH en las

mezclas, por consecuencia manteniendo por más tiempo la producción de biogás. Así mismo las mezclas que contenían EV como codigestante (V1, V2 y V3) obtuvieron mayor producción total de biogás $0.86 \text{ m}^3/\text{Kg SVT}_{\text{reducido}}$ comparadas con las que contenían EC $0.18 \text{ m}^3/\text{Kg SVT}_{\text{reducido}}$, (C1, C2 y C3). Por lo que el uso de la excreta de vaca como codigestante puede ser una prometedora y practica alternativa para el reciclaje de diversos tipos de residuos proporcionándoles alta estabilidad y por tanto producción de biogás.

- En la etapa 2 se concluye que al utilizar EV como codigestante y una relación menor de 1:1 de EV/ROA se obtienen valores de C/N dentro de los requerimientos necesarios en la digestión anaerobia lo que indica que los sistemas seleccionados se complementan y cubren con los requerimientos de nutrientes. Todas las mezclas presentaron valores de solidos totales (ST) dentro de lo establecido ($ST < 15\%$), con excepción de la mezcla a2 (1: EV/ 0.5: PJ/1: LA) con $ST=17\%$ debido a las características físicas (volumen) de la pajas y rastrojos (PR) no fue posible llegar a los sólidos establecidos con la adición de agua, por lo que por condiciones de operación se debe usar PR en menor proporción (1 codigestante : < 0.5 PR) y el tamaño más pequeño posible. Respecto al NH_3 , las excretas de vaca (EV) y los lodos anaerobios (LA) son grandes productores de NH_3 y propensas a la inhibición por amoniacado, por lo en las mezclas contenían suero de leche (SR) se mantuvieron con valores menores a $2 \text{ g NH}_3/\text{Kg ROA}$, concluyendo que el SR es capaz de mantener y regular las concentraciones de NH_3 cuando se encuentra en concentraciones mayores de $\frac{1}{4}$ en la mezcla. Las mezclas seleccionadas por su estabilidad (establecida por el pH final después de los 30 días de digestión), y por la producción de metano con respecto al blanco EV/Agua ($128 \pm 9 \text{ L/Kg SVT}$), son 2: Excreta de Vaca /1: Suero de leche/1: inóculo ($232 \pm 45 \text{ L/Kg SVT}$), y 2: Excreta de Vaca /1: Frutas y verduras/1: inóculo ($222 \pm 17 \text{ L/Kg SVT}$), mejoras en producción de volumen del biogás de 1.8 y 1.7 veces más respecto al blanco.

- En la etapa 3 se concluyó que es necesario usar una mezcla inoculadora (3: Excreta de vaca/ 1: residuos vegetales/ 1: suero de leche/ 3: Lodos anaerobios/ Agua) para arrancar los biodigestores pues adecua el sistema con bacterias capaces de digerir los principales componentes de las cinéticas a evaluar. La producción de biogás inicio el día 15 para el biodigestor flujo pistón (FP) y el día 17 para el biodigestor mezcla completa (MC) esto por la mayor estabilidad de pH que presentó FP al contener una mayor carga orgánica y por tanto mantuvo las condiciones más adecuadas para llevar a cabo la producción de biogás reflejado en la producción de metano (190 L/Kg SVT) para MC, mientras que para FP (256 L/Kg SVT), lo que representa 1.9 veces más que MC. La mezcla inoculadora presento una gran estabilidad y la mayor producción de biogás comparado con las cinéticas de producción probadas.
- Este comportamiento siguió presentándose en la cinética 1 de producción de biogás con la mezcla seleccionada (2: Excreta de Vaca/ 1: Suero de Leche / 1: inóculo, Agua necesaria para la dilución), en donde a pesar de MC presentar mayor estabilidad se mantuvo con rendimientos por debajo de FP (23 y 45 L /kg SVT respectivamente), en donde FP obtuvo 1.9 veces más comparado con MC. En esta etapa la composición máxima de metano en el biogás registrada es de 32% de metano en ambos digestores estos valores se presentaron en la semana 1, 6 y 7 y son concordantes con el tiempo en el cual la mezcla obtenían mayor producción de biogás en la etapa anterior. Sin embargo los rendimientos bajaron comparados con los reactores de 1L en condiciones batch, esto atribuido a la variación de concentración de cada residuo en la mezcla en el digestor. El fenómeno presentado en la etapa anterior de reducción en la concentración del amonio (3 a 1 g/Kg ROA) atribuido al suero de leche, bajo estas condiciones (alimentación semicontinua, volumen de 28L) se confirma nuevamente, propiedad importante del suero de leche para regular la producción de amoníaco.

- En la cinética 2 de producción de biogás con la segunda mezcla seleccionada (2: Excreta de Vaca/ 1: Residuos de frutas y verduras / 1: inóculo, Agua necesaria para la dilución), en esta etapa el pH se mantuvo alto (7.4 -7.7), con base a lo esperado en etapas anteriores (7.0), como resultado hubo un aumento en la concentración de NH_3 afectando principalmente a FP, como resultado se afectó la producción de biogás, a pesar de esto FP continuo con mejores rendimientos comparado con MC (27 y 36 L /kg SVT). Se obtuvo una proporción máxima de 58% de metano en ambos digestores estos valores se presentaron en la semana 5 y 6 respectivamente, lo que hace de este mezcla contenga la cantidad suficiente para que el biogás sea usado como combustible.
- Comparando ambos biodigestores, el equipo de mezcla completa (MC) tuvo un desempeño más deficiente de reducción de SVT, DQO y producción de biogás que el de flujo pistón (FP) durante los 138 días que duro el proceso, se atribuye a los ST <7% y ORL bajas con respecto a FP, otro factor fue la falta de homogeneidad de la temperatura por agitación deficiente, la variación el contenido del digestor respecto a la etapa 2, el uso de residuos refrigerados, y el cambio de sistema batch a semicontinuo, influyendo en el rendimiento final (MC=65 y FP= 123 L/Kg SVT reducido), por otro lado tiene desventajas operacionales por su orientación lo que hace poco práctico su llenado.

En conclusión los residuos como PR a pesar de poseer gran factibilidad en la producción de biogás, pueden ocasionar problemas operacionales por sus características físicas, pero en general se prueba que los (ROA), seleccionados son factibles para proveer de los nutrientes necesarios para mejorar la digestión anaerobia al ser evaluada en las proporciones y parámetros correctos, obteniendo una producción de biogás con calidad suficiente para ser usado como combustible. Con lo que se propone las siguientes proporciones de 2: EV/ 1: SR /1: LA y 2: EV/ 1: FV/1: LA, y los siguientes parámetros de operación de THR= 40 días, ORL= 1.0 - 1.8 Kg SVT/ m³*d, ST=5-7%, pH=7.0 ±0.3, y con

CONCLUSIONES GENERALES

agitación continua de (40-50 rpm) con lo cual podrán obtener valores iguales o mayores de 58% de metano.

9. RECOMENDACIONES

La problemática de los altos costos energéticos en el campo e industrias en México puede ser aminorada por las energías renovables como la digestión anaerobia que es capaz de aprovechar residuos que a su vez podrían provocar una problemática ambiental, por lo que a partir del presente trabajo se dan las siguientes recomendaciones con el fin de agregar y mejorar la calidad de esta investigación.

ETAPA1

- Las pruebas de BMP a nivel laboratorio para la codigestión anaerobia se recomiendan realizarse para evaluar la factibilidad y el comportamiento de residuos diferentes o en diferentes proporciones a este trabajo, para tener un panorama del comportamiento a esperar en pH, producción de biogás y carga orgánica.
- Caracterizar microbiológicamente las poblaciones presentes en los biodigestores al contener las mezclas que obtuvieron mejores rendimientos, en las diferentes etapas y después de las alimentaciones con una nueva mezcla.

ETAPA 2

- Estudiar para caracterizar la capacidad del suero de leche de controlar la generación de amoníaco de las excretas y lodos. Realizar las alimentaciones de las dos mezclas seleccionadas de forma intercaladas (2: Excreta de Vaca/ 1: Frutas y verduras / 1: inóculo y 2: Excreta de Vaca/ 1: Suero de leche / 1: inóculo), para evitar los altos pH y la acumulación de amonio que podría causar una inhibición por amoníaco. Evaluar la codigestión de mezclas de paja a escala en condiciones batch para evitar la obstrucción de tuberías.

- Evaluar con caracterización fisicoquímica (Humedad, pH, materia orgánica, N, P, K, Ca, Mg, Zn, Mn, Fe, C/N, tasa de mineralización) y biológica (bacterias patógenas) y la calidad e inocuidad del fertilizante orgánico generado en los biodigestores, para determinar si son aptos para aplicarse como fertilizante y mejorador de suelos.

ETAPA 3

- Los biodigestores deben encontrarse en un lugar donde puedan recibir la luz del sol para aprovechar esta energía y ayudar a mantener la temperatura adecuada para proceso. Y se recomienda utilizar los biodigestores pilotos con agitación continua para garantizar la homogeneidad de la temperatura.
- Esta investigación fue limitada por el sustrato fresco, particularmente excreta de vaca, que fue refrigerada (4°C), lo que pudo haber variado la respuesta de la generación de metano y la composición del sustrato, por lo que se tiene que es recomendable instalar el biodigestor cerca del suministro de materia prima (ROA y excretas) y donde el efluente pueda ser almacenado.

10. BIBLIOGRAFIA

1. Abbasi, Tasneem, S.M. Tauseef, y S.A. Abbasi, "Biogas Energy". New York, USA: Springer, 2012.
2. Achu, Ivo, Tesis doctoral "Anaerobic digestion of crop and waste biomass: Impact of feedstock characteristics on process performance". Dinamarca: LUND University Sweden, 2012.
3. Ahn, H. K., M. C. Smith, S. L. Kondrad, y J. w. White. "Evaluation of Biogas Production Potential by Dry Anaerobic Digestion of Switchgrass–Animal Manure Mixtures". *Appl Biochem Biotechnol*, 2010: 965-975.
4. Ahning, Birgitte K., "Biomethanation I, II", United States of America: Springer, 2003.
5. Ainia, "Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales". España: Dept. Calidad y Medio Ambiente (ainia CENTRO TECNOLÓGICO), 2011.
6. Avendaño, Diego, "Diseño y construcción de un digestión anaerobia de flujo piston que trate residuos generados de una explotación ganadera de la localidad de Loja, Ecuador empleando tecnologías apropiadas". Madrid: Universidad Politecnica de Madrid, 2010.
7. Bhattacharyya, Bimal C, y Rintu Banerjee, "Environmental Biotechnology", 50-60. EUA: Oxford University Press, 2007.
8. Bouallagui, H., H. Lahdheb, Ben E. Romdan, B. Ranchdi, y M. Hamdi, "Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability whit co-sustrates addition", *Journal of Enviromental Management*, 2009: 1844-1849.
9. Campos, Elena, Xavier Elias, y Xavier Flotats. "Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje". Madrid: Días de Santos, 2012.
10. Carrillo, Leonor, "Energía de biomasa", 82. S.S. Jujuy, 2004.
11. Deublein, Dieter, y Angelika Steinhauser, "Biogas from waste and renewable resources". Germany: Wiley-Vch, 2008.

12. Fantozzi, Francesco, y Cinzia Buratti, "Biogas production from different substrates in an experimental Continuously", *Bioresource Technology*, 2009: 5783–5789.
13. Gerardi, Michael H., "The Microbiology of Anaerobic Digesters", Canada: Wiley-Interscience, 2003.
14. Gómez, X., MJ: Cuetos, J. Cara, y A. Morán, "Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate", *Renewable Energy*, 2006: 2017-2024.
15. Hilborn, Victoria, "Anaerobic Digestion of Broiler Chicken Manure", Ottawa Canada: University of Guelph, 2011.
16. Hilkihah, A., M.J. Ayotamuno, y C.L. Eze., "Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste", *Applied Energy*, 2008: 430–438.
17. IDEA, "Biomasa, digestores anaerobios", Madrid: Instituto para la diversificación y ahorro de energías, 2007.
18. INEGI, "Pedro Escobedo, Quéretaro de Arteaga", *Cuaderno estadístico municipal* , 2004.
19. Kheradmand, S, A. Karimi-Jashni, y M. Sartaj, "Treatment of municipal landfill leachate using a combined anaerobic digester and activated sludge system", *Waste Management*, 2010: 1025-1031.
20. Lahdhed, E., H. Bouallagui, Ben Romdam, B. Rachdi, y M. Hamdi, "Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition", *Journal of Environmental Management*, 2009: 1844-1849.
21. Lara Guiltapi, Edwin Sebastian, y María Belén Hidalgo Chimborazo, "Diseño de un bioreactor y conducción de biogas generado por las excretas de ganado vacuno, estación TUNSHI- ESPOCH", Ecuador: Escuela superior de Chimborazo Riobamba, 2011.
22. Li, Ronsping, Shulin Chen, y Xiujiu Li, "Biogas Production from Anaerobic Co-digestion", *Appl Biochem Biotechnol* 160 (2011): 643-654.

23. Lin J., J. Zuo , L. Gan , P. Li , F. Lui , K. Wang , L. Chen y H. Gan , "Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China", *Journal of Environmental Science*, 2011: 1403-1408.
24. Manterola, Héctor, Dina Cerda, y Jorge Mira, "Los residuos agrícolas y su uso en la alimentación de rumiantes", Santiago de Chile: Fundación para la innovación agraria del ministerio de agricultura, 1999.
25. Maserá, Omar, "LA BIOENERGÍA EN MÉXICO; Situación actual y perspectivas" México: © Edición original publicada por RED MEXICANA DE BIOENERGÍA, A.C., 2011.
26. Muller, Wolf-Rudiger, Irene Frommert, y Ralf Jorg, "Standardized methods for anaerobic biodegradability testing", *Environmental Science and Bio/technology*, 2004: 141-158.
27. Murto, M., L. Bjornsson, y B. Mattiasson, "Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sawege sludge and pig manure", *Journal of Enviromental*, 2004: 101-107.
28. Nayono, Satoto E., Claudia Gallert, y Josef Winter, "Co-digestion of press water and food waste in a biowaste digester for improvement of biogas production", *Bioresource Technology*, 2010: 6987-6993.
29. Qamaruz, Nastaein, "The Aplicability of Batch Tests to Asees Scale Up to Continuous Reactor Systems", New Zealand: University of Canterbury, 2010.
30. Robalio, Homer Santiago, Tesis de maestria "Evaluacion de la actividad biologica y nutricional del biol en diferentes formulaciones y la respuesta a su aplicacion en cultivos de arroz (Oriza Sativa) y maíz (Zae Maus) en Guayas", Guayaqui, Ecuador: Escuela superior politecnica del litoral, 2011.
31. Robalio, Homero Santiago, "Evaluación de la Actividad Biológica y Nutricional del Biol en Diferentes Formulaciones y la Respuesta a su Aplicación en Cultivos de Arroz (Oriza sativa) y Maíz (Zae mays), en Guayas", Ecuador: Escuela Superior Politecnica del Litoral, 2011.
32. Varnero, María Teresa, "Manual de biogas", Santiago de Chile: FAO, 2011.

33. Veyna, Sagrario, Tesis de maestria "Efecto del control de pH, temperatura y adiccion de nitrógeno sobre la digestion anaerobia de residuos hoticolas", México D.F.: Instituto Politecnico Nacional, 2007.

PAGINAS WEB CONSULTADAS

1. SEGOB. 23 de Noviembre de 2012.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5278970&fecha=23/11/2012 (último acceso: 05 de Junio de 2012).
2. 06 de 12 de 2011.
<http://www.universia.net.mx> (último acceso: 01 de 10 de 2013).
3. Vísquez, Joaquín A. «viogaz.»
2013. <http://www.viogaz.com/public.php> (último acceso: 13 de 10 de 2013).

11. ANEXOS.

12.1. ANEXO A. TECNICAS ANALITICAS.

12.1.1. NMX-AA-034-SCFI-2001 Determinación de sólidos totales (ST)

Se tomó 25gr de muestra homogenizada, se transfirió la muestra a la cápsula de porcelana que previamente ha sido puesta a peso constante, se llevó a sequedad la muestra en la estufa a 103°C-105°C, se enfrió en desecador hasta temperatura ambiente y se determinó su peso hasta alcanzar peso constante. Calcular el contenido de sólidos totales de las muestras como sigue:

$$ST = (W_{105^{\circ}C} - W_c) * 1\ 000 / W_r$$

Donde:

ST: son los sólidos totales, en gr de ST /Kg de sustrato;

$W_{105^{\circ}C}$: Peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en gr.

W_c : Peso de la cápsula vacía, en gr a peso constante.

W_r : Cantidad de residuos, en gr.

12.1.2. NMX-AA-034-SCFI-2001 Determinación de sólidos totales volátiles (SVT)

Se introdujo la cápsula conteniendo el residuo de 105°C a la mufla a 550°C ± 50°C durante 15 min a 20 min, se enfrió a temperatura ambiente en desecador y se determinó su peso hasta alcanzar peso constante. Calcular el contenido de sólidos totales de las muestras como sigue:

$$SV = (W_{105^{\circ}C} - W_{550^{\circ}C}) * 1\ 000 / W_r$$

Donde:

SV: son los sólidos volátiles, en gr SV/Kg de sustrato;

$W_{105^{\circ}C}$: Peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en gr.

$W_{550^{\circ}C}$: Peso de la cápsula con residuos, después de la calcinación en gr.

W_r : Cantidad de residuos, en gr.

12.1.3. NMX-F-317-S-1978. Determinación de pH.

Para el producto semisólidos se adiciono cuando el caso lo requirió entre 10 y 20 mL de agua destilada por cada 100 g de producto, para obtener una pasta uniforme. Se calibro el potenciómetro con las soluciones reguladoras de pH 4, pH 7 y pH 10, se tomó una porción de la muestra ya preparada, se mezcló bien y se ajustó a temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$, se sumergió el electrodo en la muestra y se tomó lectura.

12.1.4. Determinación de demanda química de oxígeno total (DQOt)

Se partió de 0.2 mL de muestras diluidas en agua destilada en una proporción 1:100 y un blanco de agua destilada. Se añadió en el tubo de reactivo de dicromato de potasio y ácido sulfúrico marca HACH de alto rango (0-15000 gr/l) y se agito el contenido. El tubo se dispuso en un reactor durante 2 horas a 150°C . Después se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente y se procedió a su lectura en el espectrofotómetro marca HACH a 420 nm. La lectura obtenida en mg/l se multiplico por el factor de ajuste para tubos marca HACH de alto rango (0-15000 gr/l).

12.1.5. Determinación de demanda química de oxígeno soluble (DQOs).

Se partió de muestras diluidas en agua destilada en una proporción 1:100 y se centrifugaron a 5000 rpm y fueron filtradas. Se añadió 0.2 mL en el tubo de reactivo de dicromato de potasio y ácido sulfúrico marca HACH de alto rango (0-15000 gr/l) y se agito el contenido. El tubo se dispuso en un reactor durante 2 horas a 150°C . Después se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente y se procedió a su lectura en el espectrofotómetro marca HACH a 420 nm. La lectura obtenida en mg/l se multiplico por el factor de ajuste para tubos marca HACH de alto rango (0-15000 gr/l).

12.1.6. Determinación de nitrógeno amoniacal (NH₃-N)

Método de silicato (0 a 50 mg/L NH₃-N): Se partió de 0.1 mL de muestras diluidas en agua destilada en una proporción 1:1000, y un blanco de agua destilada. Se adiciono el contenido de un sobre con el reactivo silicato de amonio, y el contenido de un sobre con el reactivo de cianurato de amonio, agitar hasta disolver, esperar 20 minutos de reacción y se procedió a su lectura en el espectrofotómetro marca HACH a 655 nm.

13.1.1. Determinación teórica de relación carbono/nitrógeno (C/N)

$$C/N = \frac{C1*Q1 + C2*Q2... Cn*Qn}{N1*Q1 + N2*Q2... Nn*Qn}$$

C/N= Relación de carbono y nitrógeno de la mezcla. **Q1**= Cantidad de materia prima 1 en Kg. **Q2**= Cantidad de materia prima 2 en Kg. **C1**= %C en la materia prima 1. **C2**= %C en la materia prima 2. **N1**= %N en la materia prima 1. **N2**= %N en la materia prima 2

12.1.7. Calidad de biogás.

El biogás producido en la etapa 3 de este proyecto fue un analizador de gas portátil de la marca LANDTEC, modelo GEM 2000 el cual nos permite medir el porcentaje de CO₂, CH₄ y O₂ en la mezcla, el cual se ilustra en la Ilustración 1, error reportado de medición se muestra en la Tabla 25, el flujo típicamente es de 300 cc/min.



Ilustración 1.-

Presión de gas	ERROR DE MEDICION		
	CH ₄	CO ₂	O ₂
0-5 %	±0.3	±0.3	±1.0
5-15%	±1.3	±1.3	±1.0
15-100%	±3.0	±3.0	±1.0

Fotografía del analizador portátil de biogás.

Tabla 26.- Errores de medición del analizador.

12.2. ANEXO B. DESCRIPCION DE EQUIPO 3 (BIODIGESTORES).

12.2.1. Características generales.

Los biodigestores pilotos semicontinuos son un recipiente cilíndrico provisto de una tapa hermética, el recipiente de acero inoxidable tiene un volumen útil de 28 l, con 35 cm de diámetro interior y una relación altura / anchura de 4/3. Cuentan con sistema de calefacción tipo resistencia con una temperatura máxima de funcionamiento de 400ª C para mantener el material a la temperatura requerida está equipado con un termopar, conectado a un controlador de temperatura que se muestra en la Ilustración 2. Dos orificios están perforados en la tapa del digestor, con extensión de tubo de acero y conectados a válvulas. Tienen un sistema de agitación con una velocidad de 50 rpm.



Ilustración 2.- Panel de control de los biodigestores (pantalla de control de temperatura °C, encendido y apagado de temperatura y agitación).

12.2.2. Especificaciones del equipo de mezcla completa (MC).

A demás de contener las características generales, tiene una terminación en cono con 16 cm de altura y una geratriz de 20 cm, para retener lixiviados, que tiene un orificio en la parte central que va a la tubería de la válvula de purga, que se encuentra en la parte posterior del biodigestor como se muestra en Ilustración 3. La agitación consta de dos hélices con cuatro aspas cada una. El equipo cuenta con una entrada de alimentación que tiene forma de sifón el cual sale aproximadamente de la mitad del equipo. En un orificio de la tapa es colocado el conector de descarga de biogás.



- a) 1) Panel de control de agitación y temperatura, 2) puesto de muestreo y medición de biogás, 3) válvula de muestreo y purga, 4) sistema de agitación, 5) tanque de 30 L.



- b) Parte interna del biodigestor en donde se observa el sistema de agitación con 2 dispositivos con las 4 aspas cada uno.

Ilustración 3.-Fotografías del equipo de mezcla completa de la parte externa y de la parte interna.

12.2.3. Especificaciones del equipo de flujo pistón (FP).

A parte de contener las características generales, tiene una válvula de purga, que se encuentra en la parte posterior del biodigestor. La agitación consta de siete aspas que forman una agitación de tipo gusano. El equipo cuenta con un orificio en la parte superior como se muestra Ilustración 4 en donde es colocado el conector de descarga de biogás.



a) 1) Panel de control de agitación y temperatura, 2) puesto de muestreo y medición de biogás, 3) válvula de muestreo y purga, 4) sistema de agitación, 5) tanque de 30 L.



b) Parte interna del biodigestor en donde se observa el sistema de agitación con 16 aspas en forma de gusano.

Ilustración 4.- Fotografías del equipo de mezcla completa de la parte externa y de la parte interna.

12.3. ANEXO C. RESULTADOS.

Pruebas preliminares	Volumen	PROMEDIOS	pH	ST (%)	SV (%)
----------------------	---------	-----------	----	--------	--------

		Biogás (mL)	n=2			
V1	50% EV / 50% LA	5907 ^A	Antes	7.3	15	8.64
		5307 ^A	Después	7.5	12	7.54
V2	50% EV / 50% FV	1138 ^A	Antes	7.0	9.9	7.55
		330 ^B	Después	5.3	8.4	6.02
V3	33% EV / 33% FV / 33% LA	576 ^B	Antes	7.0	10.0	7.35
		508 ^B	Después	6.7	4.9	4.59
C1	50% EC / 50% LA	4539 ^A	Antes	6.8	7.0	8.2
		4539 ^A	Después	7.5	5.5	1.9
C2	50% EC / 50% FV	707 ^A	Antes	6.5	12.7	11.6
		707 ^A	Después	5.6	2.9	3.51
C3	33% EC / 33% FV / 33% LA	1149 ^A	Antes	6.5	10.6	8.58
		1149 ^A	Después	5.5	4.9	3.44

Volumen de producción de biogás en condiciones estándar (1 atm, 0°C) expresados en mL (^A ensayo evaluado con 440gr y ^B ensayo evaluado con 220 gr), datos promedios de resultados obtenidos antes y después de la digestión de pH, Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles Totales (SVT) expresados en porcentaje. **FUENTE:** El autor, 2013.

Mezclas sin inóculo		Volumen Biogás (mL)	PROMEDIOS n=2	pH	ST (%)	SV (%)	NH ₃ (g/ Kg ROA)	DQO (g/ Kg ROA)
EV	1:EV/1:AGUA	1289 ^A	Antes	7.0	7	4	1.0	56
		545 ^B	Después	7.1	5.3	2	4.4	24
A1	1: EV/ 1: SR	1160 ^A	Antes	7.0	10	8	1.1	114
		576 ^B	Después	5.8	7	4	5.4	71
A2	1: EV/ 0.5: PJ	1899 ^A	Antes	7.8	14	9	1.2	191
		994 ^B	Después	7.7	8.8	6	3.9	61
A3	1: EV/ 1: FV	1138 ^A	Antes	7.0	10	8	1.0	49
		330 ^B	Después	5.5	8.4	6	1.5	40
A4	1: EV/ 0.5: PJ/1: SR	149 ^A	Antes	7.0	13	9	0.9	84
		86 ^B	Después	6.9	12.7	7	1.0	65
A5	1: EV/ 0.5: PJ/1: FV	607 ^A	Antes	7.0	14	11	1.9	117
		245 ^B	Después	6.6	9.98	10	1.8	69
B1	2: EV/ 1: SR	1588 ^A	Antes	6.9	10	8	1.2	106
		450 ^B	Después	6.9	8.9	6	1.3	93
B2	2: EV/ 0.5: PJ	616 ^A	Antes	7.3	14	9	1.1	104
		234 ^B	Después	7.7	12.2	7	1.9	18
B3	2: EV/ 1: FV	1222 ^A	Antes	6.9	11	8	1.9	153
		485 ^B	Después	7.0	10.9	7	1.5	61
B4	2: EV/ 0.5: PJ/1: SR	297 ^A	Antes	6.9	13	9	1.8	34
		98 ^B	Después	7.5	8.7	7	0.5	23
B5	2: EV/ 0.5: PJ/1: FV	204 ^A	Antes	6.8	14	11	1.7	129
		77 ^B	Después	7.1	13	9	6.5	78

Volumen de producción de biogás en condiciones estándar (1 atm, 0°C) expresados en mL (^A ensayo evaluado con 440gr y ^B ensayo evaluado con 220 gr), datos promedios de resultados obtenidos antes y después de la digestión de pH, Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles Totales (SVT) expresados en porcentaje. Amoníaco (NH₃) y Demanda química orgánica total (DQO) expresados en g/kg ROA.

FUENTE: El autor, 2013.

Mezclas con inóculo		Volumen Biogás (mL)	PROMEDIOS n=2	pH	ST (%)	SV (%)	NH ₃ (g/ Kg ROA)	DQO (g/ Kg ROA)
a1	1: EV/ 1: SR/1:LA	1110 ^A	Antes	7	10	7	0.8	86
		600 ^B	Después	7.1	9.3	5	1.8	11
a2	1: EV/ 0.5: PJ/1:LA	1110 ^A	Antes	7.6	17	9	0.7	104

		600 ^B	Después	8.5	16	5	0.9	6
a3	1: EV/ 1: FV/1:LA	3445 ^A	Antes	7	10	7	0.8	93
		1748 ^B	Después	6.9	7.7	5	3.5	22
a4	1: EV/ 0.5: PJ/1: SR/1:LA	1102 ^A	Antes	6.8	13	10	1.0	65
		508 ^B	Después	7.7	6.9	6	1.6	20
a5	1: EV/ 0.5: PJ/1: FV/1:LA	2957 ^A	Antes	6.8	12	10	3.8	54
		2295 ^A	Después	7.2	8.4	7	4.4	20
b1	2: EV/ 1: SR/1:LA	1605 ^A	Antes	7.5	9	7	1.7	56
		540 ^B	Después	6.5	15	5	4	13
b2	2: EV/ 0.5: PJ/1:LA	1110 ^A	Antes	7	13	9	1.3	43
		600 ^B	Después	6.9	16	4	7	6
b3	2: EV/ 1: FV/1:LA	3445 ^A	Antes	7	9	7	0.9	48
		1748 ^B	Después	6.9	16	6	5.5	18
b4	2: EV/ 0.5: PJ/1: SR/1:LA	1102 ^A	Antes	7	14	10	1	62
		508 ^B	Después	7.5	10	7	2.5	41
b5	2: EV/ 0.5: PJ/1: FV/1:LA	2957 ^A	Antes	7	14	10	1.2	107
		2295 ^A	Después	6.5	9.4	5	3.3	16

Volumen de producción de biogás en condiciones estándar (1 atm, 0°C) expresados en mL (^A ensayo evaluado con 440gr y ^B ensayo evaluado con 220 gr), datos promedios de resultados obtenidos antes y después de la digestión de pH, Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles Totales (SVT) expresados en porcentaje. Amoníaco (NH₃) y Demanda química orgánica total (DQOt) expresados en g/kg ROA.

FUENTE: El autor, 2013.

DIGESTOR MEZCLA COMPLETA PROMEDIOS n=2		pH	ST (%)	SV (%)	NH ₃ (g/ Kg ROA)	DQO (g/ Kg ROA)	DQOs (g/ Kg ROA)	Volumen de biogás (mL)	CH ₄ (%)
SEM1	3:EV/1:FV/1:SR/1:LA	6.5	6%	44	0.7	59	-	0	--
SEM2		6.8	4%	28	-	60	-	513	--
SEM3		6.6	4%	28	-	51	-	1063	--
SEM4		6.6	4%	30	-	55	-	2052	--
SEM5		6.7	4%	47	-	55	-	1246	--
SEM6		6.9	3%	24	-	55	-	4764	--
SEM7		7.0	3%	22	3.2	55	-	1283	--
SEM1	2:EV/1:SR/1:LA	7.30	7%	66	3.0	69	29	1539	32
SEM2		7.76	4%	24	-	62	30	183	30
SEM3		7.82	4%	24	-	53	33	183	10
SEM4		7.60	5%	38	-	60	25	1660	8
SEM5		7.66	5%	22	-	53	25	660	5
SEM6		7.73	5%	35	-	54	25	3152	32
SEM7		7.67	4%	23	2.0	52	24	0	32
SEM1	2:EV/1:SR/1:LA	7.65	2%	13	1.0	56	25	1245	15
SEM2		7.72	3%	15	-	42	25	660	--
SEM3		7.60	3%	14	-	47	23	81	--
SEM4		7.45	3%	16	-	50	23	1612	28
SEM5		7.55	4%	18	-	41	25	4038	58
SEM6		7.44	3%	19	1.9	48	24	1173	52

Datos de pH, Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles Totales (SVT) expresados en porcentaje. Amoníaco (NH₃), Demanda química orgánica total (DQOt) y Demanda química orgánica soluble (DQOs) expresados en g/kg ROA. Volumen de producción de biogás en condiciones estándar (1 atm, 0°C) expresados en mL y porcentaje de metano (CH₄). FUENTE: El autor, 2013.

DIGESTOR FLUJO PISTON PROMEDIOS n=2		pH	ST (%)	SV (%)	NH ₃ (g/ Kg ROA)	DQO (g/ Kg ROA)	DQOs (g/ Kg ROA)	Volumen de biogás (mL)	CH ₄ (%)
SEM1	3:EV/1:FV/1:SR/1:LA	6.50	78	46	0.7	48	-	0	--
SEM2		7.04	69	48	-	60	-	0	--
SEM3		7.12	66	38	-	70	-	8607	--
SEM4		7.32	55	33	-	69	-	8135	--
SEM5		7.25	60	34	-	64	-	9528	--
SEM6		7.53	65	41	-	74	-	13742	--
SEM7		7.35	60	39	3.0	71	-	10994	--
SEM1	2:EV/1:SR/1:LA	7.25	9%	52	3.0	82	36	3737	32
SEM2		7.66	7%	42	-	82	36	5753	28
SEM3		7.69	7%	21	-	67	37	2510	10
SEM4		7.54	8%	45	-	56	33	2235	8
SEM5		7.74	7%	43	-	60	34	1649	5
SEM6		7.80	7%	42	-	61	32	5240	32
SEM7		7.68	6%	30	1.0	64	30	1832	32
SEM1	2:EV/1:SR/1:LA	7.66	7%	36	2.0	72	30	6376	15
SEM2		7.65	7%	45	-	57	33	3291	--
SEM3		7.69	7%	47	-	54	19	1099	--
SEM4		7.70	6%	44	-	56	30	1033	28
SEM5		7.71	6%	33	-	59	31	660	58
SEM6		7.66	4%	26	4.0	52	29	476	52

Datos de pH, Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles Totales (SVT) expresados en porcentaje. Amoníaco (NH₃), Demanda química orgánica total (DQOt) y Demanda química orgánica soluble (DQOs) expresados en g/kg ROA. Volumen de producción de biogás en condiciones estándar (1 atm, 0°C) expresados en mL y porcentaje de metano (CH₄). FUENTE: El autor, 2013.