



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

II PROMOCIÓN

TESIS DE GRADO MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TEMA: "CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS DEL
CAMAL DE GUAYAQUIL"

AUTORES:

CAMILO DAVID ARELLANO ARROBA

JAIME ALFREDO CALLE CAÑIZARES

DIRECTOR: ING. REINALDO DELGADO, PhD.

SANGOLQUÍ, DICIEMBRE DE 2014

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR:

El suscrito Ing. Reinaldo Delgado PhD., con cédula No. 1750580266, en calidad de Director de Tesis de la Maestría en Energías Renovables,

CERTIFICA

Que el presente proyecto de grado que lleva como título **“CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS DEL CAMAL DE GUAYAQUIL”**, realizado por el Señor Ing. Jaime Alfredo Calle Cañizares, de nacionalidad ecuatoriana, portador de la cédula de identidad No. 0910348416 y el Señor Lcdo. Camilo David Arellano Arroba, de nacionalidad ecuatoriana, con cédula de identidad No. 0910910397, como requisito para la obtención del título de Magíster en Energías Renovables, II Promoción de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, fue desarrollada bajo mi dirección y asesoría. La misma que cumple con los requerimientos científicos, tecnológicos y académicos, razón por la cual autorizo su presentación y defensa.

Guayaquil, 13 de diciembre de 2014

Ing. Reinaldo Delgado, PhD.

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

CAMILO DAVID ARELLANO ARROBA

JAIME ALFREDO CALLE CAÑIZARES

DECLARAN QUE:

El proyecto de posgrado denominado “**CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS DEL CAMAL DE GUAYAQUIL**”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas que constan al pie de páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 13 de diciembre de 2014

Ing. Jaime Alfredo Calle Cañizares

Lcdo. Camilo David Arellano Arroba

AUTORES

AUTORIZACIÓN

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución, el trabajo titulado “**CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS DEL CAMAL DE GUAYAQUIL**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 13 de diciembre de 2014.

Ing. Jaime Alfredo Calle Cañizares

Lcdo. Camilo David Arellano Arroba

AUTORES

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo y esfuerzo a los seres que más amo: a mis Hijos Lyrken Stalin, AyrtonAndre, Paul Emiliano. A mis Padres Justo Antonio y Julia Agnia. A los ciudadanos del mundo y sus nuevas generaciones para que este trabajo aporte a la utilización de energías limpias y logren reducir la contaminación y puedan vivir de una manera limpia y saludable.

Jaime Calle Cañizares

Diciembre, 2014

A mi amada esposa Norma de quien he recibido todo el apoyo; y a mi padre, quien con su ejemplo me enseñó a perseverar en lo que se persigue, y prestó su casa para el desarrollo del experimento.

Camilo Arellano Arroba

Diciembre, 2014

AGRADECIMIENTOS

Mis más profundo agradecimientos primeramente a Dios, que con su valiosa ayuda me ha permitido concluir esta etapa de mi vida profesional, a mi familia que de una u otra forman aportaron con sus granitos de arena a este logro, a mis maestros y directores que entregaron sus valiosos conocimientos para direccionar este trabajo. A mis hijos que son el combustible de mi vida. Solamente Gracias de corazón.

Jaime Calle Cañizares

Tengo que agradecer a un grupo de compañeros que me ayudaron de diferentes maneras para el estudio de este posgrado. Sólo mencionaré sus nombres de acuerdo a cómo fueron apareciendo durante todo el trabajo desarrollado:

Ing. José Guasumba, M.Sc.
MBA. Edwin Tamayo
Ing. Armando Altamirano, M.Sc.
Ing. Eloy Moncayo, M.Sc.
Ing. Francisco Terneus, M.Sc
Ing. Alfredo Barriga, PhD
Ing. Nicolás Páez, M.Sc.
Ing. Reinaldo Delgado, PhD.
Blgo. Maritza Cárdenas, PhD
Ing. Katherine Chiluisa, PhD
Dra. Gloria Bajaña de Pacheco
Mat. John Ramirez, M.Sc.

Camilo Arellano Arroba.

Diciembre, 2014

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
GLOSARIO DE TÉRMINOS	x
RESUMEN	xi
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	8
1.3. Alcance	9
1.4. Justificación	9
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	11
2.1. Conceptos generales sobre residuos	11
2.2. Fisiología de los microorganismos involucrados en la biodigestión	12
2.3. Proceso de la biodigestión anaeróbica	16
2.4. Factores que influyen en la biodigestión anaeróbica	20
2.5. Aproximaciones teóricas para la producción de biogás	26
2.6. Experiencias de la caracterización y biodigestión anaeróbica sobre desechos orgánicos	27
2.7. Biodigestores	29
2.8. Biogás	34
2.9. Características de las condiciones climáticas de Guayaquil	36
CAPÍTULO 3: EVALUACIONES	37
3.1. Análisis físico-químico de los desechos orgánicos	37

	vii
3.2. Desarrollo del sistema batch	38
3.3. Características de las mezclas de los seis biodigestores	41
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE LOS DATOS ADQUIRIDOS	43
4.1. Metodología y tecnología empleada	43
4.2. Procesamiento y análisis de datos	47
4.3. Determinación de la mezcla y tiempo requerido	50
4.4. Análisis de la máxima producción de biogás	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	57
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO DE GRADO	62
ANEXOS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Uso mundial de biomasa	1
Figura 2	Producción de energía primaria con biomasa de la UE	2
Figura 3	Consumo de electricidad de países de EU	3
Figura 4	Cambio de matriz energética	5
Figura 5	Proyecto Biodigestor en Bolívar	6
Figura 6	Faenamiento en el Camal de Guayaquil	7
Figura 7	Crecimiento bacteriano de un cultivo discontinuo	13
Figura 8	Evolución de las poblaciones en un cultivo mixto	14
Figura 9	Constante de velocidad media de Monod	16
Figura 10	Degradación anaeróbica de la materia orgánica	17
Figura 11	Fases de la digestión anaerobia y poblaciones de microorganismos	20
Figura 12	Rangos de temperatura de la producción de metano	21
Figura 13	Biodigestor de cúpula fija	31
Figura 14	Biodigestor de domo flotante	31
Figura 15	Biodigestor de dos litros	39
Figura 16	Válvula de tres vías	39
Figura 17	Incubadora térmica	40
Figura 18	Esquema del sistema de biodigestión anaeróbica	40
Figura 19	Toma de las muestra en el Camal	44
Figura 20	Preparación de las muestras	45
Figura 21	Biodigestores dentro de la incubadora	46
Figura 22	Medición y almacenamiento de biogás	47
Figura 23	Producción promedio de biogás total de cada prueba en cm ³	49
Figura 24	Producción promedio diaria acumulada en cm ³	49
Figura 25	Producción promedio diaria de biogás en cm ³	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Generación de Energía de biomasa y desechos (Billones KW)	4
Tabla 2	Optimo rango de temperatura para el desarrollo de las bacterias metanogénicas	21
Tabla 3	pH óptimo de algunas bacterias metanogénicas	24
Tabla 4	Biogás esperado de desechos	26
Tabla 5	Cálculo del porcentaje de metano de materia orgánica	27
Tabla 6	Comparación de valores analizados y bibliográficos	28
Tabla 7	Comparación de valores que afectan la digestión anaeróbica entre diferentes autores consultados	29
Tabla 8	Diferentes tipos de biodigestores usados para digestión anaeróbica	32
Tabla 9	Tipos de digestores anaeróbicos conforme a su característica	34
Tabla 10	Propiedades del biogás	34
Tabla 11	Componentes del biogás	35
Tabla 12	Temperatura en °C de Guayaquil: mínima, promedio y máxima	35
Tabla 13	Análisis físico-químico	37
Tabla 14	Combinación de las seis pruebas	41
Tabla 15	Porcentaje de sólidos y humedad	41
Tabla 16	Valores de pH de las mezclas de pruebas	42
Tabla 17	Producción diaria de biogás en cm ³ de los seis biodigestores	47
Tabla 18	Tiempo de producción de biogás	51
Tabla 19	Comparaciones de la producción de biogás	52

GLOSARIO DE TÉRMINOS

%H	Porcentaje de humedad
%ST	Porcentaje de sólidos totales
°C	Grados Celsius
C/N	Relación carbono-nitrógeno
CELEP	Corporación Eléctrica del Ecuador
DEP_01	Depósito 1: biodigestor
DEP_02	Depósito 2: almacenamiento
DEP_03	Depósito 3: depósito de direccionamiento
DQO	Demanda Química de Oxígeno
g	Gramo
INER	Instituto Nacional de Eficiencia Energías Renovables
kPa	Kilo pascal
PC	Peso carbonizado
pH	Medida de acidez o alcalinidad de una solución
PH	Peso Húmedo
PS	Peso Seco
PSPP	Programa de análisis estadístico libre
RTD	Resistencia Dependiente de Temperatura
SF	Sólidos Fijos
SPSS	Programa de análisis estadístico
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles
SV _{bs}	Sólidos Volátiles de base seca
W	Vatios

RESUMEN

El presente trabajo de investigación denominado “CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS DEL CAMAL DE GUAYAQUIL” es un proyecto que la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE ha emprendido con la finalidad de determinar la utilidad que se puede dársele a los desechos orgánicos en los Camales de las diferentes ciudades de país. La tecnología empleada para determinar las características energéticas de los desechos orgánicos del Camal, consistió en el proceso bien conocido de la digestión anaeróbica en el rango mesofílico. Se desarrollaron seis biodigestores con diferentes mezclas: excremento de ganado, hígado desechados por los veterinarios, grasas, y sangre. Los biodigestores desarrollados fueron de tipo batch de 2 litros cada uno, dentro de una incubadora en la que se controló la temperatura a $32^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$. La prueba se la repitió tres veces. Como resultado del proceso de investigación se determinó que la mayor producción de biogás se la obtuvo de la mezcla de 50g de excremento y 50g de sangre de sólidos totales obteniendo alrededor de $245,2\text{ cm}^3$ de biogás, con un porcentaje de humedad del 93,7%, pH un poco mayor a 7,0 y la eficiencia de $6,46\text{ cm}^3\cdot\text{gSV}^{-1}$.

PALABRAS CLAVES: BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA, BIOGÁS, BIODIGESTOR, RESIDUOS DEL MATADERO, MESOFÍLICO.

ABSTRACT

This research work entitled "CHARACTERIZATION OF ORGANIC WASTES SLAUGHTERHOUSE FROM GUAYAQUIL" is a project that the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE has under taken in order to determine the utility that can be given to organic wastes in the slaughterhouses different cities. The technology used to determine the energy characteristics of organic waste, consisted of the well-known anaerobic digestion at mesophilic process. Six digesters with different mixtures were developed: cattle feces, liver, fat, and blood. Developed batch digesters were type 2 liters each, in an incubator in which the temperature was controlled at $32^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$. The test is repeated it three times. The result of the investigation it was determined that: the increased production of biogas obtained from the mixture of 50 g of feces and 50 g blood getting around 245.2cm^3 of biogas, with a moisture content of 93.7%, pH slightly greater than 7.0 and efficiency of $6.46\text{cm}^3\cdot\text{gSV}^{-1}$.

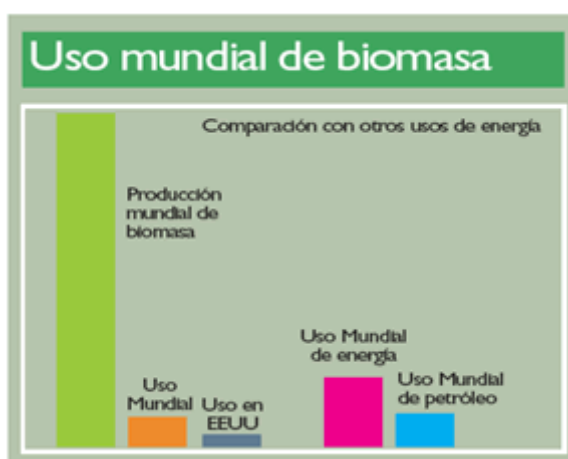
KEY WORDS: ANAEROBIC DIGESTION, BIOGAS, DIGESTER, SLAUGHTERHOUSE WASTE, MESOPHILIC.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La producción de biomasa a nivel mundial supera al uso de otros tipos de energía, como se observa en la Figura 1. Sin embargo, la utilización de biomasa en el mundo es menor en relación al empleo de petróleo.



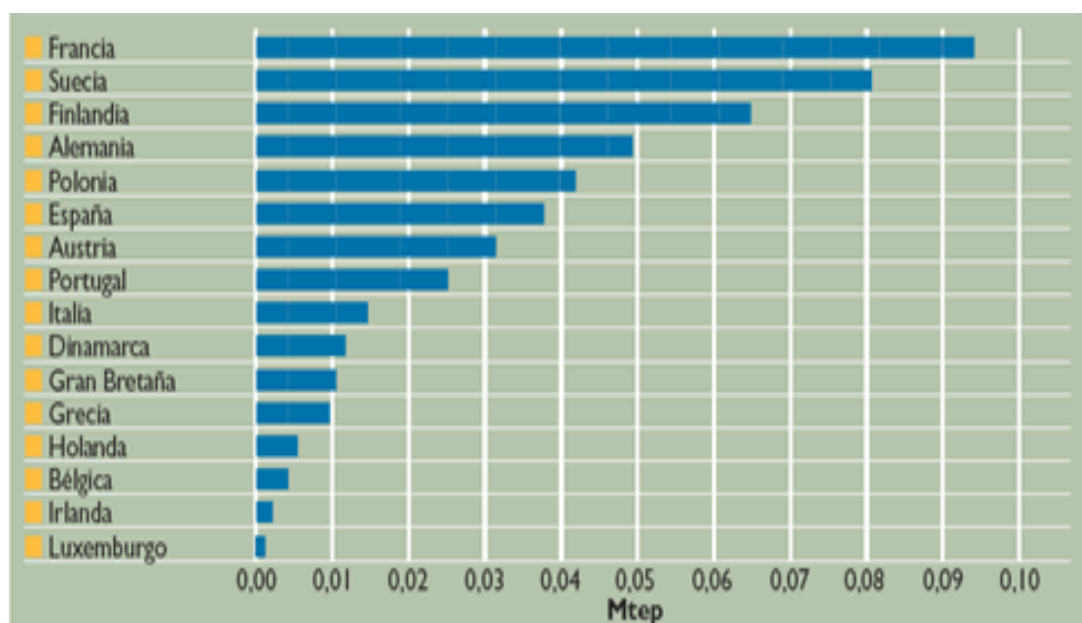
Fuente: www.energias-renovables.com

Figura 1. Uso mundial de biomasa

Todo esto se debe a que la biomasa residual es producto de las actividades humanas, y factores como el crecimiento poblacional provocan el aumento de esta masa residual; a esto se añade el crecimiento de las industrias basadas en una economía del consumismo, en la que se ha impuesto la costumbre del usar y tirar, en especial en los países desarrollados. Es en esta época que se intenta resolver las dificultades creadas de la gestión de la biomasa residual, debido a los problemas ocasionados como el impacto ambiental. Es decir, como lo presenta Campero «los cambios socioeconómicos de las últimas décadas, las altas concentraciones de población en núcleos urbanos, el desarrollo de la industria agroalimentaria, la intensificación de las explotaciones ganaderas,

las prácticas consumistas, etc., handado lugar a la generación grandes cantidades de residuos.» (Campero, 2012)

La biomasa es un recurso energético empleado por muchos países en el mundo. Por ejemplo, la producción de energía primaria con biomasa en la UE es muy destacada, siendo Francia el país con mayor producción, como lo muestra la Figura 2.



Fuente: www.energias-renovables.com

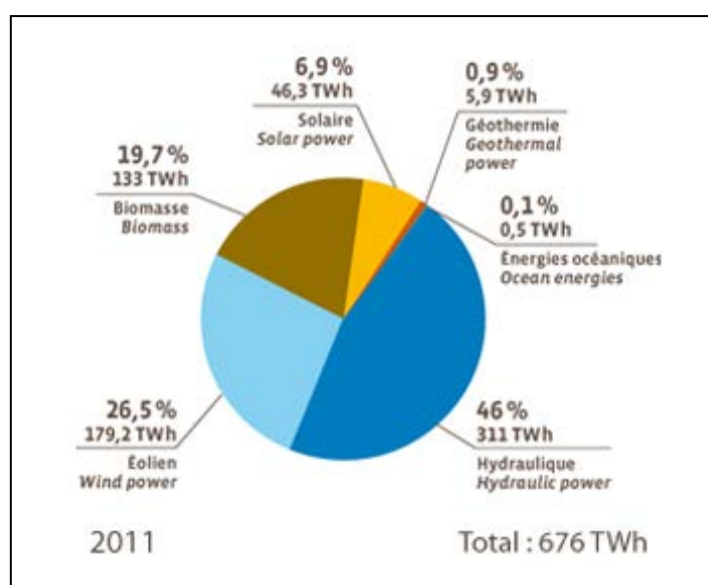
Figura 2. Producción de energía primaria con biomasa de la UE

Es conocido que la biomasa es considerada como un recurso energético renovable. De acuerdo con la fuente de Euroobserver, la biomasa ocupa el tercer lugar del consumo bruto de electricidad de la UE en el 2011, de las fuentes de energías renovables; como se presenta en la Figura 3.

La digestión anaeróbica de la fracción orgánica de los desechos municipales ha sido ampliamente implementada en Europa por décadas. Existe el proyecto Bioman, asociación constituida por el Centro Tecnológico Ainia y la empresa Hibridación Termosolar Navarra, con la finalidad de

mejorar la producción de las plantas de biogás europeas que utilizan estiércol y otras biomesas¹, en el proceso de digestión anaeróbica.

Por otro lado, del portal Murcia Economía, según KernelExport, con una inversión de 1,5 millones de euros el Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (Imida) realizarán un estudio sobre el aprovechamiento energético de residuos vegetales para determinar cuáles son las materias primas más idóneas para lograr la máxima producción de biogás. (ibid, Martes, 13 de agosto de 2013)



Fuente: <http://www.eurobserv-er.org>

Figura 3. Consumo de electricidad de países de EU

China es un líder mundial en la aplicación de las tecnologías de la digestión anaeróbica. «En los años de 1970, el gobierno chino desarrolló el primer programa de biomasa a gran escala cuando instaló: 7 millones de biodigestores, proporcionan biogás para cocinar y alumbrar a más 25 millones de chinos y, alrededor de 10.000 biodigestores de tamaño grande y mediano que suministran electricidad a las granjas. El segundo programa

¹<http://www.energias-renovables.com/articulo/proyecto-para-optimizar-la-produccion-de-biogas-20130711>

más grande fue lanzado en la India, donde en 1985 se instalaron 280.000 biodigestores de pequeña escala». (Alcides Duarte)

En la India, la gestión de los desechos orgánicos a gran escala empezó en la década de 1970, desarrollando plantas de compostaje basados en los modelos europeos. Sin embargo, estas plantas no pudieron operar debido a sus elevados costos de operación y mantenimiento. A inicios del nuevo milenio, el gobierno de la India ha realizado una serie de esfuerzo para mejorar la situación. El Ministerio de Energías no convencionales desarrolló un sistema de apoyo a los proyectos de conversión de residuos en energía. Según la fuente, la clave para la funcionalidad de los proyectos consistió en la clasificación de los desechos por origen (factor importante para el compostaje y la digestión anaeróbica) y los contratos a cortos plazos, recompra de electricidad a partir de los proyectos y acuerdos de compra de energía. Toda esta experiencia en la India demostró que el compostaje sostenible requiere del apoyo financiero y organizativo del gobierno y del sector privado. (ABD, 2011)

En Sri Lanka, son recientes los esfuerzos para promover la reutilización de los desechos orgánicos a través de la producción y el uso de compostaje en todo el país. En el 2009 se desarrolló el programa nacional «Cultivemos y elevemos el país» con una inversión de \$ 6,8 millones de dólares para promover la conciencia sobre la producción de compostaje de calidad. El reciclaje de residuos orgánicos mediante el compostaje ha cobrado impulso a través del programa Pilisaruru, que ofrece subvenciones a los municipios y diseña grandes, medianas y pequeñas plantas de compostaje. (ibid)

En América, Estados Unidos es el país de mayor generación de electricidad empleando biomasa y residuos, como lo muestra la Tabla 1, según la fuente de Energy Information Administration (EIA):

Tabla 1.

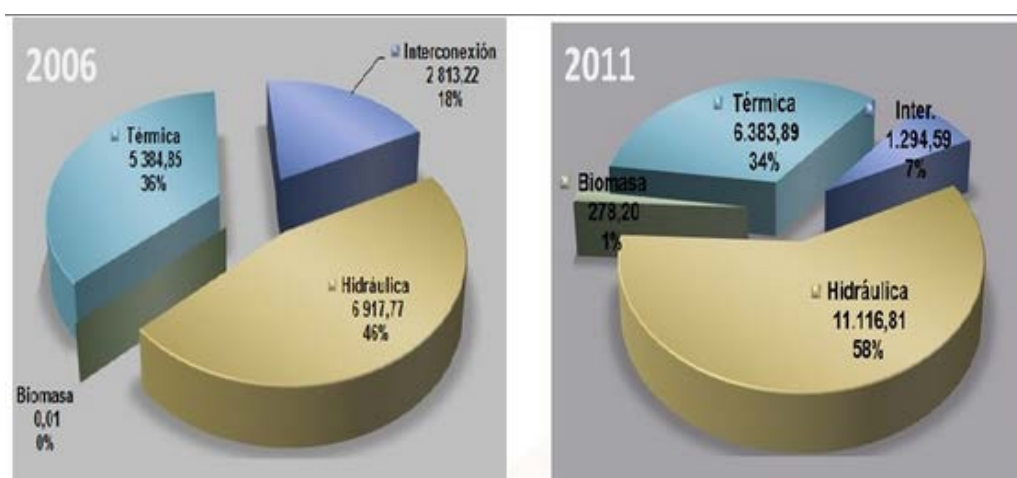
Generación de Energía de biomasa y desechos (Billones KW)

2008	2009	2010	2011	2012
------	------	------	------	------

UnitedStates	66,83728	66,42107	68,94471	67,79669	70,03099
					Continua →
Canadá	7,14	7,738	8,706	6,38	6,38
México	2,47	2,718	2,689	0,917	0,917
Argentina	2,78	2,78	2,2	2,2	--
Brasil	19,611	22,512	31,495	32	34
Chile	3,083	4,274	2,247	3,406	4,48552
Ecuador	0,522	0,442	0,483	0,483	0,483

Experiencia en Ecuador

En Ecuador se produjo un cambio de la matriz energética del empleo de biomasa de 0% en el 2006 a 1% en el 2011; según fuentes del CELEC EP (Vea Figura 4).



Fuente: CELEC

Figura 4. Cambio de matriz energética

Además, en las instalaciones del CELEC EP, Quito, se ha implementado el Laboratorio para Termovalorización de Biomosas y Residuos Sólidos Urbanos, equipos que están disponibles para la investigación de bioenergía. También INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables) tiene una línea de investigación dedicada a la biomasa.

Existen empresas que aprovechan, reutilizan y reciclan los residuos orgánicos, como es el caso del ingenio San Carlos, ubicado entre los cantones Marcelino Maridueña, Naranjito y El Triunfo, que emplean el 50% de la energía obtenida para su producción y el 50% restante es entregado a la Red del Sistema Nacional Interconectado. Posee una instalación de dos grupos turbogeneradores de 12 y 16 MW.

Pronaca es otra empresa ecuatoriana que reutiliza los desechos orgánicos. La empresa cuenta con biodigestores anaeróbicos en las granjas de cerdos, obteniendo bioabonos, fertilizantes orgánicos y biogás.

La Cooperación para la Investigación Energética, CIE, organismo de investigación y desarrollo con personería jurídica, con el financiamiento proporcionado por YCLIF (Young Connection Leadership and Innovation Fund) planificó construir tres biodigestores en diferentes comunidades de la parroquia Nono en la provincia del Pichincha al noreste de Quito y capacitar a la población para el procesamiento de los desechos orgánicos mediante los biodigestores, entrenamiento para su mantenimiento, uso del biogás y aprovechamiento del bioabono que obtendrían. Otro proyecto se desarrolló en la provincia de Bolívar que consistió en el tratamiento de los desechos orgánicos provenientes del ganado. Se construyeron 12 biodigestores en la zona (vea Figura 5), obteniendo abono orgánico (bioabono) y biogás².



Figura 5. Proyecto Biodigestor en Bolívar

²http://www.energia.org.ec/cie/?page_id=45

Uno de los trabajos recientes en el país consistió en la construcción de un biodigestor para aprovechar los desechos orgánicos que se generan del faenamiento en el Camal Metropolitano de Quito, desarrollado por la Empresa Eléctrica de Quito (EEQ) en coordinación con el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. El producto obtenido de este proyecto piloto es gas metano y fertilizantes³.

Por todo lo mencionado, se entiende el interés del mundo y del Ecuador en la investigación sobre el tema de la utilización de labiomasa residual, para este caso de los desechos orgánicos.

Los desechos orgánicos del Camal de Guayaquil

En el trabajo de faenamiento del Camal de Guayaquil (Figura 6.), se producen desechos orgánicos.



Figura 6. Faenamiento en el Camal de Guayaquil

Estos desechos orgánicos, después de ser rociados con creolina, son dispuestos en bolsas para ser llevados al botadero de basura municipal. Los productos de desechos orgánicos como, sangre, vísceras, hígados tumorosos o enfermos, grasas, purines, etc., pueden ser aprovechados para la producción de biogás. Para ello, es necesario realizar la caracterización

³ <http://www.elcomercio.com.ec/actualidad/ecuador/desechos-organicos-se-transforman-energia.html>

física-química mediante laboratorio, lo que significa conocer la composición química de los desechos, determinar la relación carbono-nitrógeno, el pH, la humedad, los sólidos totales, sólidos volátiles, etc. Esto representa ciertos inconvenientes para los temas de investigación de las Universidades por no contar con todos los equipos de laboratorio necesarios. Además, no se ha podido concretar entre las Universidades y los Centros de Investigación gubernamentales para realizar estas investigaciones, a pesar de existir convenios interinstitucionales. Por lo que, realizar esta investigación obligo a superar ciertas trabas administrativas y logísticas, y se convirtió en un verdadero desafío.

El Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, decidió tomar el desafío y desarrollar un tema de investigación que determine el potencial energético disponible en los camales del país, y mediante este trabajo de investigación se enfocará lo relacionado a los desechos orgánicos del Camal de Guayaquil.

1.2. Objetivos

Objetivo General

Determinar la caracterización de los desechos orgánicos del Camal de Guayaquil, mediante la biodigestión anaeróbica en un proceso mesofílico (de $32^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$) para obtener biogás, empleando seis biodigestores de laboratorio de capacidad de 2 litros, cada uno con diferentes combinación de los desechos orgánicos.

Objetivos Específicos

- Analizar características físicas-químicas de los desechos orgánicos.
- Definir la proporción óptima de la composición de la biomasa.
- Determinar el tiempo de retención biológico del proceso.
- Desarrollar una incubadora térmica y seis biodigestores con la capacidad de producir, medir y almacenar biogás.

- Analizar los datos obtenidos.

1.3. Alcance

El alcance de la investigación es de tipo explicativo, porque procura definir la combinación óptima de desechos orgánicos para el desarrollo de las bacterias metanogénicas, en el proceso de la digestión anaeróbica, determinando la cantidad de humedad, los sólidos totales, sólidos volátiles, el tiempo de producción de biogás, y el pH, para la mejor producción de biogás. En la investigación la temperatura se ha controlado dentro del rango mesofílico.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

Caracterizar los desechos orgánicos para obtener la producción óptima de biogás, mediante la experimentación empírica, es el desafío de este trabajo de investigación, aportando con una utilidad metodológica diferente a los países que cuentan con todos los equipos de laboratorios.

Los resultados de la investigación serán útiles para los centros de investigación de bio-energía del país, ya que todos ellos cuentan con tablas de otros países que no se acomodan a la realidad del Ecuador. De esta manera, se podrá conocer técnicamente y en mejor manera la cantidad de desechos y la humedad para la mayor producción de metano.

Además, servirá para realizar investigaciones de correlación con los desechos orgánicos de camales de otras ciudades del Ecuador. Por último, mediante este proyecto se proporciona beneficio a estos productos que no se están aprovechando, lo que da utilidad a los desechos mitigando el impacto ambiental que la Municipalidad está obligada a manejar.

De acuerdo a la investigación desarrollado por Azeem Khalid, la digestión anaeróbica de residuos orgánicos es también una tecnología útil para el medio ambiente. En su artículo describió los beneficios de este proceso de reducción de la contaminación ambiental en sus formas principales: el entorno cerrado del proceso impide la salida de metano a la

atmósfera, mientras que en la quemadel metanose liberaráel dióxido de carbono neutral (sinefecto neto endióxido decarbono y otros gasesde efecto invernadero de la atmósfera). (Khalid, 2011)

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos generales sobre residuos

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) se define residuo a «aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado un valor económico en el contexto en que fueron producidas, debido tanto a la inexistencia de tecnología adecuada para su aprovechamiento, como a la inexistencia de mercado para los productos recuperados» (Campero, 2012)

Campero también recoge que, según el estado físico de los residuos, estos pueden ser sólidos, líquidos, gaseosos y pastosos. Además, en conformidad a la estructura química, el origen y el destino final, los residuos se puede clasificar en:

- 1) Residuos orgánicos: aquellos que provienen de un organismo vivo. Pueden ser:
 - Putrescibles
 - No putrescibles
- 2) Residuos inertes: son los biodegradables e incombustibles. Proviene de la extracción o empleo de los recursos naturales, como es el caso de la construcción, demolición, etc.
- 3) Residuos peligrosos: aquellos que no se los pueden utilizar en procesos de recuperación o transformación convencionales.

Para este trabajo, los residuos involucrados son desechos orgánicos del camal de Guayaquil, los mismos que se convertirán en la fuente de energía y sustrato para los microorganismos.

2.2. Fisiología de los microorganismos involucrados en la biodigestión

Los microorganismos involucrados en biodigestión, como todos los seres vivos, requieren de energía y carbono para desarrollarse. Las bacterias obtienen la energía del carbono, y para la construcción de estructuras celulares utilizan el nitrógeno. Se conoce que De acuerdo al trabajo desarrollado por López Mendoza, la relación ideal de C:N es de 30:1. También menciona que al disminuir el nitrógeno del producto se limita la velocidad de producción de biogás, por lo contrario, al presentarse en exceso se produce más amoníaco del requerido lo que es tóxico e inhibidor para el proceso. (López Mendoza, 2009).

Los microorganismos (células bacterianas) presentes en los desechos orgánicos, contactan la parte más externa de la célula con el sustrato; propiciando que se produzca la degradación, que consiste en una serie de procesos metabólicos que se desencadena. El primer paso consiste en el transporte del sustrato al interior de la célula; dentro de ella, «las enzimas intracelulares formarán complejos con el sustrato para catalizar otras acciones encaminadas a la obtención de energía y producción del nuevo material celular», degradando los residuos orgánicos en compuestos más simples (por ejemplo de ácidos orgánicos a dióxido de carbono). (LaGrega, 1996)

En una célula se producen dos procesos metabólicos: (1) Procesos *anabólicos*, que produce protoplasma constituido por proteínas, hidratos de carbono, DNA y otros componentes celulares; este protoplasma celular consiste en 75% de agua, y su materia sólida es 90% orgánico y 10% inorgánico. (2) Procesos *catabólicos*, que consiste en la metabolización de residuos orgánicos mediante enzimas a temperatura ambiente; el metabolismo libera energía de los residuos orgánicos, haciendo que éste se degrade; la degradación transforma el residuo en compuesto más simple. (ibid)

Un sustrato que contenga los nutrientes esenciales con cualquier especie microbiana, al principio entran en una etapa de aclimatación provocando un cierto retardo en el crecimiento; luego, debido a la

abundancia de alimento la población crece de forma exponencial (fase llamada anabolismo o síntesis de alimento). Conforme crece la población bacteriana, empieza a escasear el alimento, entonces la curva de crecimiento pasa por un punto de inflexión y la población tiende a un límite o saturación. A partir de este momento la población empieza a decrecer de forma drástica; los microorganismos metabolizan su propio protoplasma, sin reposición del mismo; suele suceder que los nutrientes de células muertas sirven de alimentos a las supervivientes hasta acabar con la población. (ibid.)

Además, se han desarrollado estudios de laboratorio mediante cultivo discontinuo en un medio líquido que se inicia inoculando una pequeña cantidad de bacterias en particular, a una solución que contiene elevada concentración de un sustrato único. En estos trabajos se observa que existen cinco fases (vea Figura 7). (ibid)

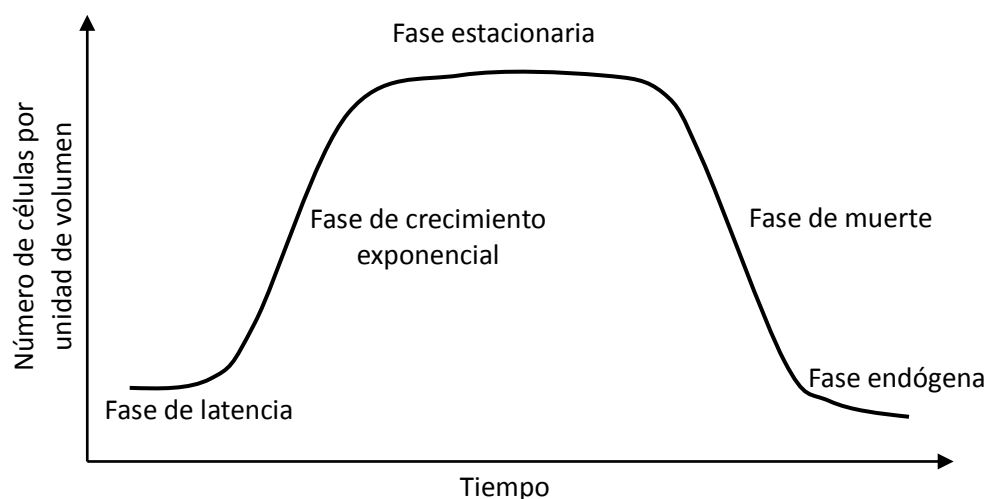


Figura 7. Crecimiento bacteriano de un cultivo discontinuo

- *Fase de latencia*, consiste en un periodo de adaptación de las bacterias al nuevo medio.
- *Fase de crecimiento exponencial*, las células se dividen a una velocidad constante provocando el crecimiento exponencial de la biomasa.

- *Fase estacionaria*, se da cuando el sustrato empieza a agotarse, la cantidad de células muertas compensa a las células nuevas.
- *Fase de muerte*, también llamada lisis, debido a que no existe adición de sustrato, el número de células que mueren excede al de células nuevas.
- *Fase endógena*, esta fase es ocasional, la velocidad de disminución de la población se reduce debido a que las células muertas aportan de sustrato para que se produzca la división de células que sobreviven.

Para la evolución de cultivos mixto, Tejero la describe con el siguiente gráfico:

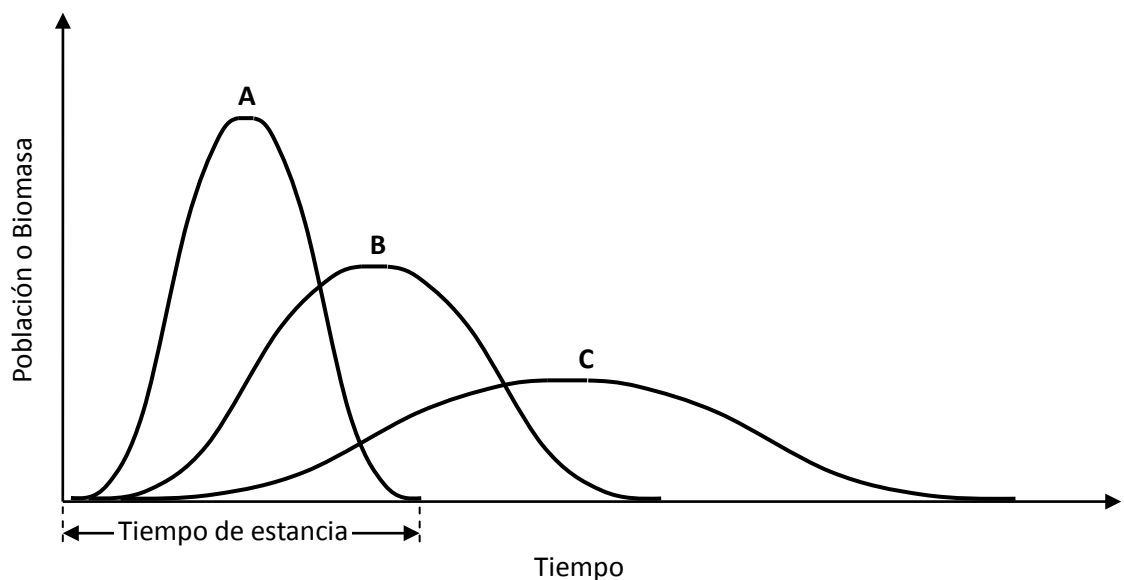


Figura 8. Evolución de las poblaciones en un cultivo mixto

Como se observa en el gráfico, existen especies con diferentes velocidades de crecimiento poblacional, por lo tanto diferente tiempo de estancia. Por ejemplo, la especie A tiene alta velocidad de crecimiento y poco tiempo de estancia, en comparación con las otras especies.

La velocidad a la cual las células se dividen se denomina *velocidad específica de crecimiento*; se mide como el número de generaciones por unidad de tiempo o el inverso del tiempo de generaciones. Existe un modelo

matemático para expresar esta *cinética de crecimiento*, propuesta por el filósofo Thomas Malthus (LaGrega, 1996):

$$\frac{dX}{dt} = \mu X$$

Siendo:

μ : coeficiente cinético de crecimiento específico [tiempo⁻¹]

X : concentración de microorganismo [masa / unida de volumen]

t : tiempo

También, Monod presentó una expresión para definir el efecto de un sustrato o nutriente limitante sobre el crecimiento específico bacteriano.

$$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \frac{S}{K_S + S}$$

Siendo:

$\mu_{m\acute{a}x}$: coeficiente de crecimiento específico máximo [tiempo⁻¹]

S : concentración de sustrato limitante en solución la [masa / unida de volumen]

K_S : constante de semisaturación; es decir concentración de S a la cual μ es la mitad de $\mu_{m\acute{a}x}$ [masa / volumen]

Según LaGreda «la ecuación de Monod describe la observación general de que la velocidad específica de crecimiento es casi linealmente dependiente de la concentración de sustrato para los rangos más bajos y aproximadamente independiente para las concentraciones más altas». En la que la constante de concentración media representa un valor aproximado de los dos rangos (Figura 9).

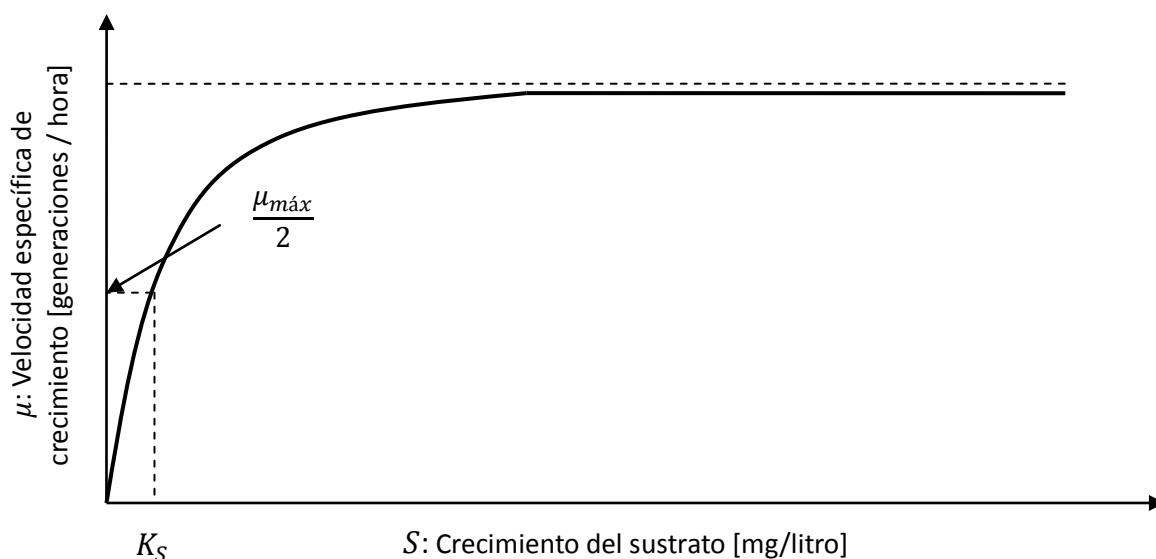


Figura 9. Constante de velocidad media de Monod

Empleando las ecuaciones de Mamthus y Monod, se obtiene:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_{máx}SX}{K_S + S}$$

Entonces se «acepta, de forma general, que la síntesis de nuevas células por unidad de sustrato eliminado es constante para un sustrato dado y una determinada especie bacteriana.» (Ibid)

2.3. Proceso de biodigestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico que tiene lugar de forma natural cuando un grupo de bacterias descomponen la materia orgánica sin la presencia de oxígeno (Agyeman, 2014; Gerardi, 2003).

Sobre la digestión anaeróbica se sabe que existen cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (en la que se produce biogás con 60% metano y 40% de dióxido de carbono). (Gerardi, 2003; Marañón, 2014; McGowan, 2009; Molino, 2013). Vea Figura10.

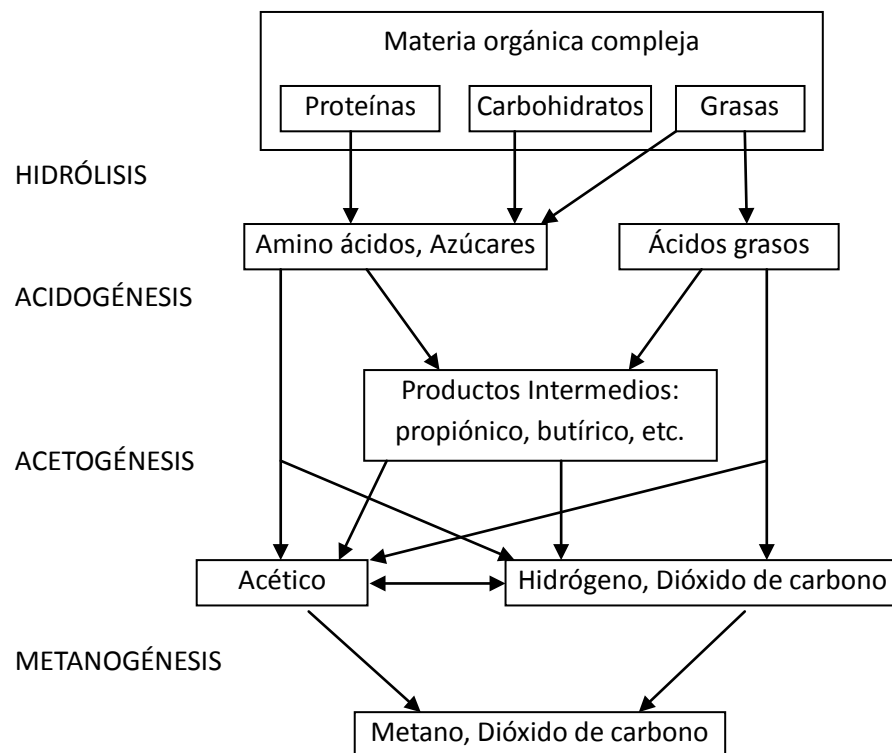


Figura 10. Degradación anaeróbica de la materia orgánica

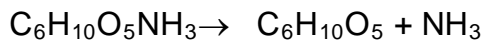
Como se observa en la figura, la **hidrólisis** o licuefacción, consiste en la descomposición de los polímeros orgánicos como las proteínas, carbohidratos y grasas en unidades más pequeñas como amino ácidos, azúcares y ácidos grasos de cadenas más largas, desarrolladas por microorganismos aeróbicos facultativos (Alcides) o bacterias celulíticas como *Cellulomonas*, *Clostridium*, *Bacillus*, *Thermomonospora*, *Ruminococcus*, *Bacteriodes*, *Erwinia*, *Acetovibrio*, *Microbispora*, and *Streptomyces* (Li, 2011), el paso de la degradación en la etapa de hidrólisis de la materia orgánica cruda se da de la siguiente manera:

Proteínas → aminoácidos

Lípidos (grasas) → ácidos grasos

Carbohidratos → azúcares

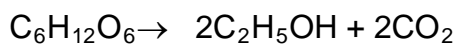
La hidrolización que se presenta por la acción de exoenzimas secretadas por las bacterias (López Mendoza, 2009). El proceso de hidrolización dependerá principalmente del pH, la temperatura, el tipo de materia orgánica y del tamaño de la partícula; y se la puede expresar con la siguiente reacción (López Martínez, 2005):



En la **acidogénesis** los compuestos orgánicos solubles, que comprenden los productos de la hidrólisis, son convertidos en ácidos orgánicos de cadenas cortas y alcoholes provocados por la intervención de endoenzimas; los ácidos grasos más relevantes son: ácido acético (CH_3COOH), propiónico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$), butírico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$), y etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), que son productos de la fermentación generada por los microorganismos *Acetobacterium*, *Clostridium*, *Sporomusa*, *Clostridium*, *Butyribacterium*, *Clostridium*, y otros (Gerardi, 2003; Li, 2011; Molino, 2013; López Martínez, 2005).

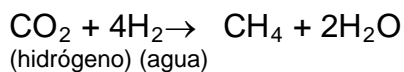
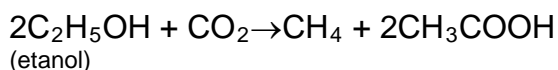
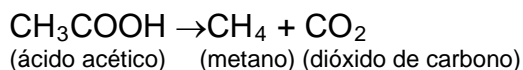
La reacción **acetogénesis** se la conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Las bacterias exclusivas acetogénicas del proceso son *Acetobacterium* y *Sporomusa*, y por bacterias no-acetogénicas como *Clostridium*, *Ruminococcus*, y *Eubacterium*. (Li, 2011)

En el documento de Molino se define la acetogénesis mediante la ecuación (Molino, 2013):



Finalmente, en la **metanogénesis** el metano (CH_4) es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H_2 y CO_2 , pudiendo formarse también a partir de otros substratos tales como ácido fórmico y metanol. Cabe señalar que las baterías metanogénicas son muy sensibles a la presencia de oxígeno. Sin embargo, se puede llegar a la etapa metanogénica (ausencia de oxígeno), debido al consumo de oxígeno por las bacterias aeróbicas

facultativas presentes en la etapa hidrolítica y acidogénica (Álvarez, 2004). Las bacterias metanogénicas pueden ser *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* y *Methanosarcina*. La reacción metanogénica se expresa según las siguientes ecuaciones: (Bansal, 2013; Guasumba, s/f; Molino, 2013; Sorensen, 2001):



El proceso de la biodigestión anaeróbica puede realizarse en tres rangos de temperatura a saber: psicrófilo menores a 20 °C, mesófilo entre 25 °C a 40 °C, y termófilo de 50 °C a 70 °C como se presenta en (Feng, 2013; Flotats, 2010; Scano, 2014).

Un resumen de la digestión anaeróbica se presenta en los artículos de investigación de Flotats (Figura 11).

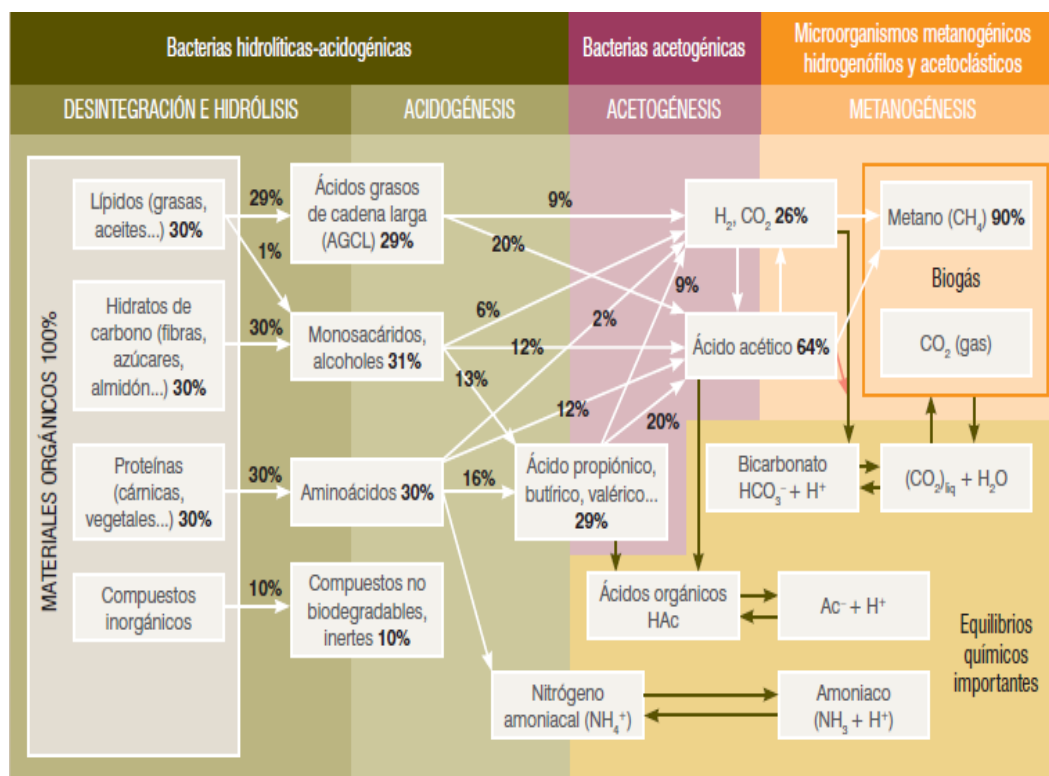


Figura 11. Fases de la digestión anaerobia y poblaciones de microorganismos

2.4. Factores que influyen en la biodigestión anaeróbica

Temperatura

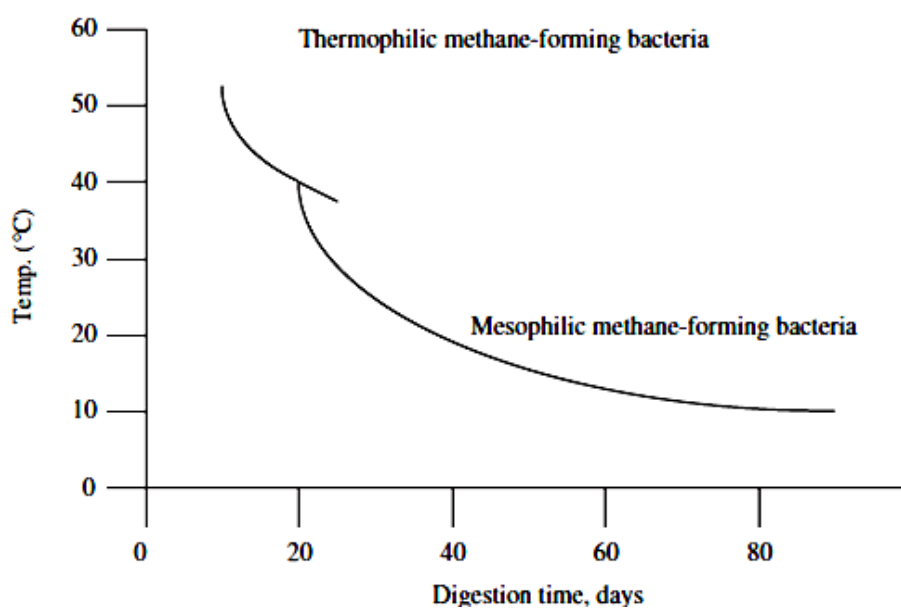
El problema común en el proceso consiste en mantener una temperatura uniforme en el digester, ya que se requiere proporcionar un ambiente favorable para el desarrollo poblacional de las bacterias. La mayoría de las bacterias formadoras de metano (bacterias metanogénicas) son activas en dos rangos de temperatura: el rango mesofílico de 30 °C a 40 °C y el rango termofílico de 50 °C a 60 °C. (López Martínez, 2005) Sin embargo, estos rangos de temperatura dependerán del tipo de bacteria formadora de metano, como se muestra en la Tabla 2. (Gerardi, 2003)

Tabla 2.

Optimo rango de temperatura para el desarrollo de las bacterias metanogénicas

Grupo de bacteria	Tango de temperatura [°C]
<i>Psychrophiles</i>	5 a 25
<i>Mesophiles</i>	30 a 35
<i>Termophiles</i>	50 a 60
<i>Hyperthermophiles</i>	>65

La producción de metano se desarrolla a través de una relativa amplia gama de valores de temperatura. La mayoría de los digestores anaeróbicos, especialmente aquellos en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, operan en el rango mesofílico de temperatura. Vea Figura 12.



Fuente: Gerardi, 2003

Figura 12. Rangos de temperatura de la producción de metano

Debido a todo esto, se entiende que la temperatura es uno de los factores de mayor importancia que afectan a la actividad microbiana dentro de un biodigestor; por lo que la producción de metano es fuertemente

dependiente de la temperatura. La temperatura también afecta el desarrollo de las bacterias formadoras de ácidos volátiles (bacterias acetanogénicas). Sin embargo, las fluctuaciones de temperatura pueden afectar favorablemente a un determinado grupo de bacterias y desfavorablemente a otro grupo. (ibid)

Por otro lado, las bacterias hidrolíticas no son tan sensibles a los cambios de temperatura como sucede con las bacterias metanogénicas y acetanogénicas.

Tiempo de retención

Existen dos tiempos de retención en los biodigestores anaeróbicos: tiempo de retención de sólidos (TRS) y tiempo de retención hidráulico (TRH). El TRS es el tiempo promedio en que las bacterias (sólidos) están en el digestor. El TRH es el tiempo en que las aguas residuales o lodo están en el digestor anaeróbico. Para un digestor sin recirculación, estos tiempos son iguales. Si se presenta reciclaje en el digestor, estos tiempos pueden variar de forma significativa. Los TRS típicos para los digestores anaeróbicos son mayores a 12 días, siendo este tiempo de mayor importancia que el TRH y que no es afectado por la naturaleza de las aguas residuales o lodos, a menos que tengan elementos tóxicos para las bacterias. El TRS afecta a la población bacteriana y a la capacidad del volumen del digestor. El TRH afecta a la conversión de sólidos volátiles en productos gaseosos. (ibid)

Nutrientes

Se ha determinado dos tipos de nutrientes para el desarrollo de bacterias en el tratamiento biológico: macronutrientes y micronutrientes.

Los **macronutrientes**, por ejemplo nitrógeno y fósforo, son requeridos en grandes cantidades por las mayorías de las bacterias. La cantidad de nitrógeno y fósforo necesarios para satisfacer la actividad bacteriana y mantener un rendimiento aceptable en el digestor puede determinarse por dos métodos: (1) calcular la cantidad de nutrientes que deben estar

presentes en el producto de ingreso en el digestor, de ser necesario se añaden nutrientes; (2) las concentraciones residuales adecuadas de nutrientes de solubles se deben encontrar en el efluente del digestor; si no sucede hay que añadir nutrientes. Un nivel apropiado de Nitrógeno provoca alta velocidad de producción. (López Mendoza, 2009)

Los **micronutrientes**, por ejemplo cobalto, hierro, níquel y sulfuro, son requeridos en menores cantidades; pero son requeridos de forma obligatoria por las bacterias metanogénicas. La presencia adecuada de estos micronutrientes ayuda a minimizar los trastornos que se presentan en el biodigestor ocasionados por la acumulación de ácidos grasos volátiles.

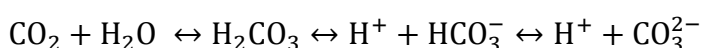
De esta manera, el cobalto es requerido como un activador del sistema enzimático en las bacterias metanogénicas, haciendo más eficiente la conversión de acetato a metano. El hierro es difícil de ser asimilado por las bacterias formadoras de metano, por lo que debe estar en solución, lo que difícilmente se cumple en el medio ambiente de las bacterias. La falta adecuada de níquel en el digestor implica una disminución significativa en la tasa de producción de metano; esto es, disminución de la capacidad enzimática de conversión de acetato a metano. (Gerardi, 2003)

Alcalinidad y pH

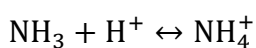
Suficiente alcalinidad es necesaria para el control de pH adecuado, la que sirve como un «amortiguador» impidiendo los cambios bruscos del pH. Ahora bien, esto es importante debido a que la actividad enzimática o rendimiento del digestor está influenciada por el pH. De esta manera, la actividad enzimática de las bacterias acetanogénicas está por encima de 6,5 de pH; mientras que para las bacterias metanogénicas está por encima de 6,2 de pH. La mayoría de las bacterias anaeróbicas operan adecuadamente dentro de rango de 6,8 a 7,2 de pH. (Gerardi, 2003; Alvarez, 2004)

La alcalinidad es el resultado de la liberación de grupos amino ($-NH_2$) y producción de amoníaco (NH_3) cuando los residuos proteicos se degradan. La alcalinidad está presente principalmente en la forma de bicarbonatos que están

en equilibrio con el dióxido de carbono en el biogás a un pH dado. Cuando los compuestos orgánicos se degradan, se libera dióxido de carbono. Cuando los aminoácidos y las proteínas se degradan, dióxido de carbono y amoníaco se liberan. La relación de los resultados de dióxido de carbono en la producción de ácido carbónico, la alcalinidad de bicarbonato, y la alcalinidad de carbonato están dadas en la siguiente ecuación:



La relación de los resultados de amoníaco en la producción de iones de amonio mediante la ecuación:



El pH o la alcalinidad en el digestor se deben al equilibrio entre el ácido carbónico, la alcalinidad del bicarbonato y carbonato, de los iones de amonio y del amonio; lo que producen por la alimentación de sustrato o por la producción de compuestos ácidos y alcalinos durante la degradación de los compuestos orgánicos. También es efecto de la liberación de nitrógeno y la producción de dióxido de carbono de la descomposición de los compuestos orgánicos. Los valores óptimos dependerán del tipo de bacteria metanogénica, como se observa en la Tabla 3. (Gerardi, 2003)

Tabla 3.

pH óptimo de algunas bacterias metanogénicas

Género	pH
<i>Methanosphaera</i>	6,8
<i>Methanothermus</i>	6,5
<i>Methanogenium</i>	7,0
<i>Methanolacinia</i>	6,6 – 7,2
<i>Methanomicrobium</i>	6,1 – 6,9
<i>Methanospirillum</i>	7,0 – 7,5
<i>Methanococcoides</i>	7,0 – 7,5
<i>Methanohalobium</i>	6,5 – 7,5

Continua →

<i>Methanlobus</i>	6,5 – 6,8
<i>Methanothrix</i>	7,1 – 7,8

Para mejorar los valores de pH y alcalinidad se suele adicionar bicarbonato de sodio y bicarbonato de potasio debido a su solubilidad, fácil manipulación y no ocasiona mayores efectos negativos en el digestor.

Toxicidad

La toxicidad en el biodigestor puede ser causada por una variedad de desechos inorgánicos y orgánicos; como por ejemplo alcoholes, amoníaco, inhibidores químicos empleados como conservantes de alimentos, hidrocarburos clorados, cianuro, detergentes, desinfectantes, metales pesados, compuestos orgánicos nitrogenados, oxígeno, productos farmacéuticos, etc. Ahora bien, todo digestor tiene cierto grado de toxicidad; los factores que determinan el valor tóxico influyen en (1) la capacidad de las bacterias en adaptarse a una concentración constante de residuos tóxicos, (2) la ausencia o presencia de otros residuos tóxicos y, (3) cambios en las condiciones operativas. Los indicadores de toxicidad incluyen la ausencia de hidrógeno, ausencia de metano, disminución de alcalinidad y pH, aumento de la concentración de ácido volátil.

Agitación

La agitación en los reactores anaeróbicos mejora la eficiencia de producción. Con la agitación se consigue poner en contacto el sustrato fresco con la población bacteriana, se evita la formación de espuma o costra superficial, se evita la sedimentación, y minimiza la estratificación térmica ya que mantiene una temperatura uniforme en todo el reactor. López recomienda que las palas agitadoras sean construidas de acero inoxidable o PVC, para evitar corrosión por el ácido sulfhídrico. Además, las revoluciones deben ser muy bajas, alrededor de 30 r.p.m. (López Mendoza, 2009)

Otros factores

También se conoce sobre los factores importantes para que el desarrollo de la biodigestión anaeróbica sea exitosa: La relación de carbono y nitrógeno C:N cuyo valores óptimos son de 20 a 30 (Agyeman, 2014; Flotats, 2001; Flotats, 2010; Li, 2011; López Martínez, 2005); según el trabajo de Álvarez, el estiércol y rumen de vaca cumplen con el rango para el proceso de biodigestión anaeróbica, no así la sangre que se encuentra por debajo del rango especificado, C:N=4 (Álvarez, 2004). Otros factores son el pH alrededor de 5 a 6,5 para la acidogénesis y alrededor de 6,6 para la metanogénesis, DQO (demanda química de oxígeno), tiempo de retención que varía del tipo de reactor y de la mezcla pudiendo ser de 10 a 60 días, y porcentaje de humedad de 30 a 95% según algunos autores, de acuerdo con (Feng, 2013; Flotats, 2001; Fonseca, 2009; Scano, 2014).

2.5. Aproximaciones teóricas de la producción de biogás

Los desechos orgánicos pueden emplearse para la producción de biogás, trabajos desarrollados presentan una aproximación de esta producción que se muestra en la Tabla 4. (Agyeman, 2014; Álvarez, 2004; Cadena, 2009)

Tabla 4.

Biogás esperado de desechos

Desecho de matadero	Gas total [m ³ /kg]	Metano [m ³ /kg]
Excremento	0,2 a 0,4	0,1
Sangre	0,16	0,08
Viscera	0,09	0,04
Contenido intestinal (rumen)	0,47	0,35

Por otro lado, Domínguez toma como referencia las ecuaciones estequiométricas de Buswell, que son aplicables a la fermentación teórica de metano para todos los sustratos (De la Torre Caritas, 2008; Domínguez, s/f).

$$C_n H_a O_b = \left(n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2} \right) H_2O + \left(\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4} \right) CO_2 + \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} \right) CH_4$$

Donde n , a y b son la cantidad de átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno respectivamente, contenidos en las moléculas de materia orgánica degradada. Mediante esta ecuación, es posible obtener de forma teórica, el porcentaje de metano para diferentes materias orgánicas. En la Tabla 5 se muestra un ejemplo de los cálculos empleando la ecuación.

Tabla 5.

Cálculo del porcentaje de metano de materia orgánica

Materia	Fórmula química	Resultado de la reacción	%CH ₄
Lípidos	C ₅₇ H ₁₀₄ O ₆	→ 28H ₂ O + 17CO ₂ + 40CH ₄	70,2
Proteínas	C ₅ H ₇ O ₂	→ 2H ₂ O + 2CO ₂ + 3CH ₄	57,5
Carbohidratos	C ₆ H ₁₀ O ₅	→ H ₂ O + 3CO ₂ + 3CH ₄	50,0

2.6. Experiencias de la caracterización y la biodigestión anaerobia sobre desechos orgánicos

Los métodos de caracterización de los desechos orgánicos están tomando nuevos matices. Lo típico que se suele realizar consiste el análisis físico y químico de estos productos para conocer la humedad, la cantidad de sólido volátil, la demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno, los componentes químicos, etc.(Gerardi, 2003; McGowan, 2009). Según Sitorus, la caracterización de los desechos es importante para calcular la cantidad y composición de biogás producido en el proceso de digestión anaeróbico (Sitorus, 2013), siendo el pH (alrededor de 7) y la relación carbono-nitrógeno C/N (de 20 a 30) factores de importancia. En la Tala 6 se presenta los datos procesados por René Álvarez en la que se puede notar la diferencia que existe entre los valores bibliográfico (*) y los obtenidos en su investigación.

Tabla 6.

Comparación de valores analizados y bibliográficos

Residuo	C/N	* C/N	N [g/kg SV]	* N [g/kg SV]	P [g/kg SV]	* P [g/kg SV]
Estiércol vaca	23	15 – 30	26	80 – 120	12	10 – 25
Rumen vaca	24	15 – 30	24	80 – 120	7	10 – 25
Sangre vaca (Oriente)	4	15 – 30	158	80 – 120	1	10 – 25
Sangre vaca (Altiplano)	4	15 – 30	156	80 – 120	1	10 – 25
Residuo de mercado	24	15 – 30	24	80 – 120	4	10 – 25

Fuente: Álvarez, René (IIEDEPROQ)

Por otro lado, la mayoría de los estudios realizados emplean el proceso bien conocido de la digestión anaeróbica, utilizando biodigestores con capacidades por encima de los 5 litros. Sólo el estudio realizado por Agyeman y Tao usa la capacidad de 2 litros (Agyeman, 2014). Otros utilizan la técnica de la co-digestión mezclando los purines con desechos de vegetales o frutas para mejorar la producción de metano. (Ashekuzzaman, 2011; Domínguez, s/f; Flotats, 2001; González, 2010; Lobato, 2012; López, 2005; Marañón, 2009; Salomoni, 2011; Scano, 2014)

Las diferentes investigaciones presentan criterios diversos en el empleo de la cantidad de agua que debe tener la mezcla para la biodigestión en general. Flotats considera que los mejores resultados se producen con la menor presencia de agua (Flotats, 2010). López Martínez sugiere alrededor del 30% al 50% de agua (López, 2005). Mientras que Ocaña enfatiza que debe ser alrededor del 80% de agua (Ocaña, 2001), Por otro lado, Guasumba recomienda que el contenido de humedad supere el 85% (Guasumba, s/f).

Además, investigaciones realizadas presentan buenos resultados efectuando preparación de los desechos antes de la biodigestión (Cadena,

2011; Fonseca, 2009). Otros estudios han empleado inóculos preparados que aportaron con las bacterias desarrolladas para la biodigestión en la etapa metanogénicas (Ackemez, 2012; González, 2010).

Sin embargo, es interesante notar los valores que presentan los diferentes investigadores. Por lo que se presenta una tabla de comparación de estos datos, indicando sus autores, a manera de ejemplo. (Tabla 7)

Tabla 7.

Comparación de valores que afectan la digestión anaeróbica entre diferentes autores consultados

AUTOR	pH óptimo	C:N	Tiempo de retención	Producción de biogás
Agyeman	6,6 a 7,7	21		
Alvarez	6 a 7	No importa	25 a 44	0,2 m ³ /kg
Cadena				0,4 m ³ /kg
Domínguez	6,6 a 7,6			
Float	7	20 a 30	30	25 m ³ /Tn
Li		20 a 30	40	0,4 m ³ /Tn SV
López	> 6,5	20 a 30	40	
Gonzales			16	
Khalid	6,5 a 7,5	20 a 35		

2.7. Biodigestor

Un digestor de desechos orgánicos o *biodigestor* es un contenedor cerrado, hermético e impermeable, que puede ser construido de diferentes materiales: vidrio, cerámico, plástico, metal, etc. Dentro del biodigestor se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales o humanos, desechos vegetales, etc.) en determinada dilución de agua para que a través de la fermentación anaeróbica se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se

disminuya el potencial contaminante de los excrementos. (López Mendoza, 2009)

El biodigestor puede ser diseñado para incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de hidrogenación y pos-tratamiento (filtro y piedras, de algas, secado, entre otros) a la salida del reactor.

Básicamente se puede clasificar tres tipos de biodigestores (De la Torre, 2008; Gerardi, 2003, Khalid, 2011):

Biodigestores de flujo discontinuo

También conocido como tipo de “lote” o “batch”. En este tipo se carga la totalidad del material a fermentar al inicio del proceso hasta finalizar el proceso, cuando se realiza la descarga del efluente. El trabajo con este sistema requiere de un operador permanente, tanque de almacenamiento para la materia prima y depósito de gas. Por lo general es mayormente utilizado en pruebas de laboratorio para realizar nuevos análisis del proceso o comportamiento de elementos a fermentar.

Biodigestores de flujo semicontinuo

La carga del material a fermentar y la descarga del efluente se realizan de manera continua o por pequeños baches, que puede ser cada día o cada 12 horas mientras dure el proceso. Estos modelos son los mayormente difundidos a nivel mundial, y los más empleados en las zonas rurales, entre ellos se tienen:

- **De cúpula fija, modelo chino:** El digestor está construido por ladrillos, piedra y hormigón; la superficie interior es cubierta por una capa delgada de mortero o cemento para hacerlo firme (Figura 13). El gas producido es guardado o almacenado en la cúpula, como la cúpula es fija, los volúmenes del efluente varía debido a la presión variable desarrollada

por la producción de metano con valores alrededor de 1 y 1,5 m de agua (1 metro de agua = 0,09670 atmósferas).

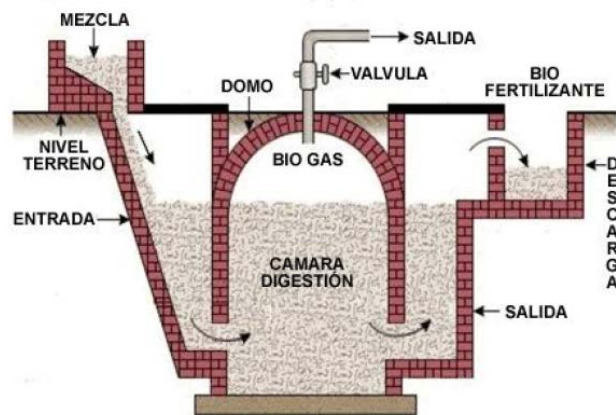


Figura 13. Biodigestor de cúpula fija

- **De cúpula móvil o domo flotante, modelo hindú:** El modelo opera a presión constante. El digestor se alimenta una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantiene a condiciones óptimas de operación. (Figura 14)

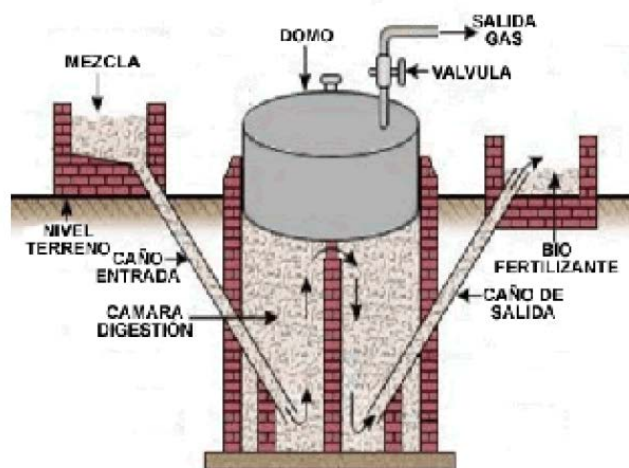


Figura 14. Biodigestor de domo flotante

Biodigestores de flujo continuo

En este tipo de biodigestor la carga se mantiene de forma regular. Se requiere que la biomasa a procesar esté diluida antes de la alimentación para que facilite la circulación. Se usan generalmente para tratamiento de aguas residuales. La producción de Biogás es mucho mayor.

El desarrollo de biodigestores modernos puede presentar etapas de pre-tratamientos, así como de más de una etapa de producción de biogás (Fonseca, 2009).

De acuerdo con el trabajo de investigación desarrollado por Khalid, «un biorreactor anaeróbico debe ser diseñado de tal manera que permita una alta tasa de carga orgánica de forma continua y sostenible, con un corto tiempo de retención hidráulica, que tenga la capacidad de producir la mayor cantidad de metano» (Khalid, 2011).

Khalid también presenta un cuadro (Tabla 8) de comparación de una variedad de nuevos diseños de biorreactores que se han desarrollado en los últimos años.

Tabla 8.

Diferentes tipos de biodigestores usados para digestión anaeróbica

Bioreactor type	Type of substrate	Organic loading rate (kg/m ³ /d)	Comments
Anaerobic sequencing batch bioreactor	Fruit and vegetable waste and abattoir wastewater	2,1	A decrease in biogas production was observed due to high amount of free ammonia at high organic loading rate (OLR)
Continuously stirred tank reactors	Municipal solid waste	15	The reactor showed superior process performance as the OLR progressively increased up to 15 kg/m ³ /d

Continua →

Full-scale anaerobic digester	Industrial food waste	17	Methane yield of 360 l/kg feed waste with 40 days retention time was observed
Integrative biological reactor	Kitchen waste	8	Integrative biological reactor showed the best performance and biogas production rate was higher than the single reactor
Laboratory-scale semi continuous reactors	Municipal solid waste and press water from municipal composting plant	20	The reactor performance for biogas production was higher up to 20 OLR but further increase in OLR did not affect the biogas production
New starch based flocculant-anaerobic fluidized bed bioreactor	Primary treated sewage effluent with or without refractory organic pollutants	43	The efficiency and microbial activity at high OLR was higher than conventional anaerobic fluidized bed bioreactor
Rotating drum mesh filter bioreactor	Municipal solid waste	15	The reactor proved to be stable and helpful in mixing the waste at high OLR, which is usually not possible in mechanically stirred digesters
Self mixing anaerobic digesters	Poultry litter	16	Self mixing at high OLR and high biomethanization of the poultry litter was observed
Submerged anaerobic membrane bioreactor	Sewage sludge, food waste and livestock wastewater	1,8	The reactor showed unstable performance during the initial stage, but performed superior after acclimation formation
Two-phase anaerobic semicontinuous digester	Olive mill wastewater and olive mill solid waste	14	The best performance in terms of methane productivity, soluble COD and phenol removal efficiencies and effluent quality was observed
Two stage anaerobic hydrogen and methane production reactor	Organic waste	3	Compared to a single-stage methanogenic reactor, 11% higher energy was achieved
Up flow anaerobic solid state bioreactor	Mixture of maize silage and straw	17	The UASS reactor showed the highest methanogenic performance for the digestion of solid biomass

Otra forma de clasificar los biodigestores es de acuerdo a su característica como se ve en la Tabla 9.

Tabla 9.

Tipos de digestores anaeróbicos conforme a su característica

Característica	Aplicación
Sistema de crecimiento bacteriano	Suspendido Fijo
Temperatura	Psicrofílico Mesofílico Termofílico
Configuración	Simple etapa (fase) Doble etapa (fase)

2.8. Biogás

Biogás es el producto de un proceso metabólico de la descomposición de la materia orgánica sin la presencia de oxígeno. Básicamente está constituido por metano y dióxido de carbono (otros compuestos en menor cantidad). El metano es un combustible con un valor calórico de 4.700 a 5.500 kcal/m³. López Mendoza presenta una tabla de propiedades del biogás (López Mendoza, 2009).

Tabla 10.

Propiedades del biogás

	CH ₄	CO ₂	H ₂ – H ₂ S	otros	Biogás 60/40
Proporciones % Volumen	55 – 70	27 – 44	1	3	100
Valor calórico (Kcal/m ³)	8.600	---	2.581	5.258	5.140
Ignición % Aire	5 – 15	---	---	---	6 – 12
Temperatura Ignición (°C)	650 – 750	---	---	---	650 – 750
Presión crítica (MPa)	4,7	7,5	1,2	8,9	7,5 – 8,9
Densidad nominal (g/l)	0,7	1,9	0,08	---	1,2

Continua →

Densidad relativa	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83
Inflamabilidad Vol. % Aire	5 – 15	---	---	---	6 – 12

Los componentes del biogás principalmente son el metano y el dióxido de carbono, y pequeñas cantidades de otros elementos que dependerá de la biomasa empleada, como se presenta en la Tabla 11. (Ibid)

Tabla 11.

Componentes del biogás

Metano (CH₄)	55 a 70 %
Anhídrido carbónico (CO₂)	35 a 40 %
Nitrógeno (N₂)	0,5 a 5 %
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	0,1 %
Hidrógeno (H₂)	1 a 3 %

2.9. Características de las condiciones climáticas de Guayaquil

Para el proceso de digestión anaeróbica, que ayuda a determinar la característica energética de los desechos orgánicos que se ha utilizado, el factor importante a definir en la ciudad es la temperatura.

Tomando los datos disponibles del Laboratorio de Fuentes Renovables de Energía⁴, de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, de la ESPOL, se presenta en la Tabla 12 los valores de temperaturas de la ciudad de Guayaquil del año 2012.

Tabla 12.

Temperatura en °C de Guayaquil: mínima, promedio y máxima

MES	MIN	PRO	MAX
ENE	21,1	24,7	32,6

Continua →

⁴ <http://esp.fimcp.espol.edu.ec/sitefimcp/web/p-proyecto-investigacion.asp>

FEB	21,4	24,9	32,1
MAR	21,8	26,1	32,6
ABR	21,6	26,5	34,4
MAY	21,3	26,2	34,0
JUN	21,1	25,6	33,2
JUL	19,3	24,2	32,5
AGO	18,7	23,4	31,6
SEP	18,8	23,7	32,0
OCT	19,7	23,9	33,4
NOV	18,8	24,0	33,4
DIC	20,3	26,0	34,4

De la Tabla 12 se puede observar que el valor promedio de la temperatura está dentro del proceso mesofílico de la digestión anaeróbica. Por lo que, si el experimento se lo desarrolla en este proceso, sólo se requerirá de un ambiente cerrado y calentar durante la noche.

CAPÍTULO 3

EVALUACIONES

3.1. Análisis físico-químico de los desechos orgánicos

Parte del análisis se desarrolló en el laboratorio del PROTAL-ESPOL. Las condiciones climáticas del ensayo fue de $22,5^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$, con $55\% \pm 15\%$ de humedad relativa. De acuerdo con el informe técnico del Laboratorio, el método de referencia para la determinación del pH fue API-5.8-04-01-00B1 (AOAC 18th 981.12), para la determinación de las cenizas se usó AOAC 18th 920.153, la grasa total fue determinado mediante AOAC 18TH 960.39(API-5.8-04-01-00B17), para la humedad se empleó API-5.8-04-01-00B14 (AOAC 18TH 950.46B), las proteínas fueron definidas mediante el método AOAC 18th 981.10 y los carbohidratos fueron calculados por diferencia. (Vea Anexos). En la Tabla 13 se presenta un resumen de los valores determinados.

Tabla 13.

Análisis físico-químico

Ensayos realizados	Unidad	Hígado	Sangre	Excremento
pH	--	6,15	7,19	6,9**
Carbohidratos	%	5,64	0,91	--
Grasa Total	%	3,45	0,056	3,80*
Proteínas	%	18,24	13,92	10,10*
Humedad	%	71,06	84,23	70,00*
Cenizas	%	1,61	0,88	2,69*
Sólidos Totales	%	28,94	15,77	30,0*
Sólidos Volátiles**	%	60,84	30,97	40,93
Sólidos Fijos**	%	25,50	15,00	19,00
Carbón	%	--	42,93*	13,40*
Hidrógeno	%	--	6,55*	1,76*

Continua →

Oxígeno	%	--	21,63*	11,45*
Nitrógeno	%	--	11,73*	0,62*

* Valores tomados de la Base de datos de biomasa y desechos de ECN Phyllis2.

** Valores obtenidos experimentalmente.

Los valores de sólidos volátiles (correspondiente a los sólidos volátiles de base seca) se los calcularon mediante la fórmula:

$$SV = \frac{PS - PC}{PS}$$

Los sólidos fijos (correspondiente a sólidos volátiles de base húmeda) se lo obtuvo:

$$SF = \frac{PS - PC}{PH} \times 100$$

Siendo:

PH: Peso de la muestra con humedad (200 g de referencia)

PS: Peso obtenido al calentar el *PH* durante 4 horas a 105 °C.

PC: Peso obtenido al calentar el *PS* durante 4 horas a 550 °C.

3.2. Desarrollo del sistema batch

El biodigestor desarrollado consiste en un sistema cerrado, biodigestor discontinuo, con la capacidad de determinar la cantidad de biogás producido en cm³, como se muestra en la Figura 15.

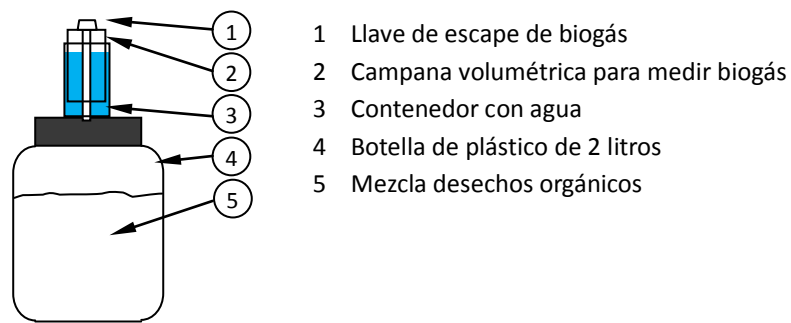


Figura 15. Biodigestor de dos litros

La medición de biogás producido por los biodigestores se lo realizó con una jeringa de 20 cm³ para el contenedor de agua y de 10 cm³ para la campana volumétrica. Se emplearon válvulas (Figura 16) de tres vías para direccionar el biogás producido al depósito de almacenamiento.



Figura 16. Válvula de tres vías

Tanto el biodigestor terminado como el depósito de almacenamiento fueron sometidos a 100 kPa de presión interna para comprobar que no se presenten fugas, utilizando el medidor de presión SE43N122.

Como el proceso escogido para el proyecto está dentro del rango mesofílico, es decir, de 25 a 40 °C, se desarrolló una incubadora térmica, la misma que tiene una resistencia eléctrica de 500 W y un electro ventilador que permite la recirculación del aire para que la temperatura sea la misma dentro del sistema. La temperatura dentro de la incubadora está gobernada por el controlador de procesos HANYOUNG, modelo NX4 con RTD como transductor. El controlador fue configurado para que opere en función ON/OFF a una temperatura de 32 °C con una histéresis de ± 1 °C.

La incubadora se la fabricó con estructura metálica con dimensiones de 40x33x54 cm, forrada de un aislamiento térmico fibro-madera, suficiente para la calidad ciudad de Guayaquil, como se aprecia en la Figura 17.

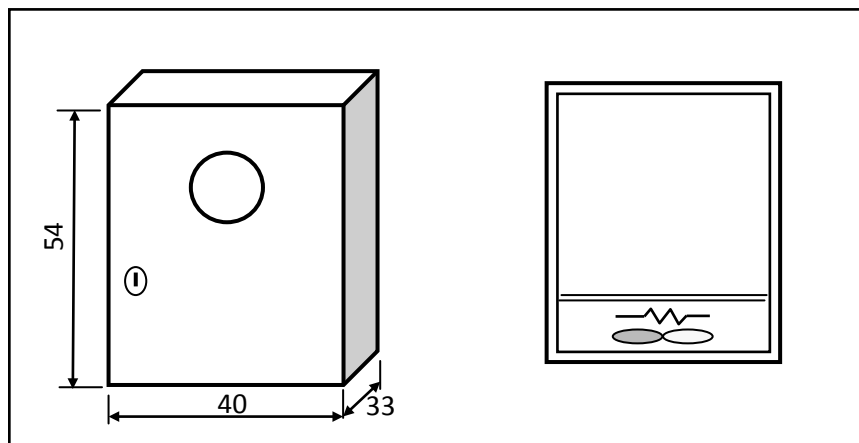


Figura 17. Incubadora térmica

El depósito de almacenamiento consistió en una botella de plástico de 180 cm³, la que se la dejó al vacío. Cuando era necesario traspasar el biogás producido del biodigestor (DEP_01) al depósito de almacenamiento (DEP_02), se maniobraban las válvulas. El equipo denominado DEP_03 consistió en una jeringa de 10 cm³ para ayudar el traslado del biogás al depósito cuando se lo requería. (Figura18)

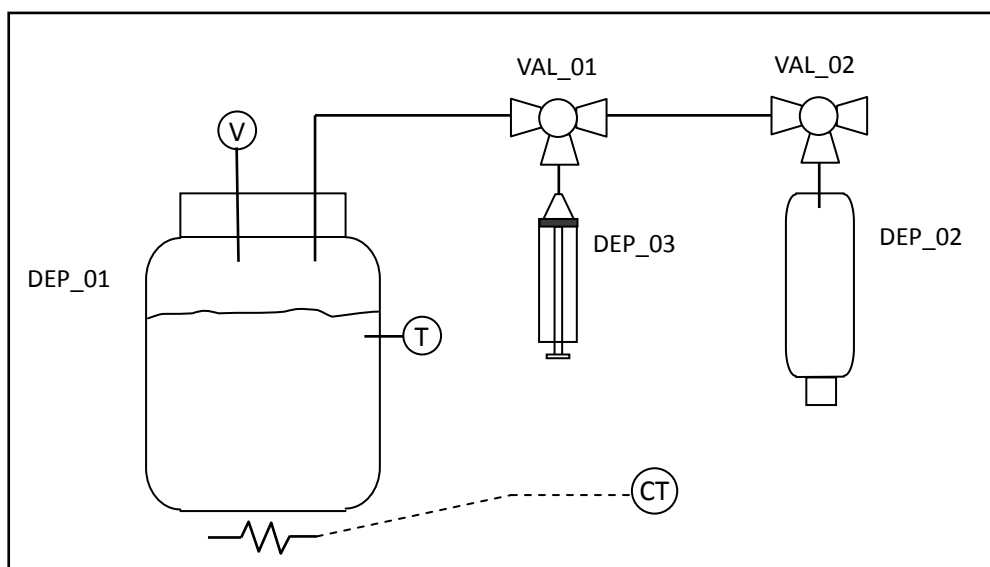


Figura 18. Esquema del sistema de biodigestión anaeróbica

3.3. Características de la mezcla de en los seis biodigestores

En cada biodigestor se preparó una mezcla diferente de desechos orgánicos provenientes del Camal de Guayaquil, con el objetivo de determinar la combinación que produce mayor cantidad de biogás. También se varió la cantidad de agua presente en la mezcla. En la Tabla 14 se presentan estos valores, en la que se ha considerado los sólidos totales ST de cada producto, es decir separándolos de su contenido de agua, con la finalidad de determinar el contenido de humedad total de la mezcla. Tanto el hígado como las grasas fueron molidos para homogenizar las mezclas. Los productos fueron pesados con la balanza digital SCA-301.

Tabla 14.
Combinación de las seis pruebas

	ST Purines [gr]	ST Grasas [gr]	ST Sangre [gr]	ST Hígado [gr]	Total de Agua
Prueba 1	100,00	-	-	100,00	1.400,00
Prueba 2	50,00	-	50,00	-	1.500,00
Prueba 3	50,00	-	-	100,00	1.450,00
Prueba 4	50,00	50,00	-	-	1.500,00
Prueba 5	30,00	-	50,00	70,00	1.450,00
Prueba 6	600,00	-	-	-	1.000,00

En la Tabla 15 se observa el porcentaje de las mezclas de los sólidos totales, la humedad tota, y los sólidos volátiles de base seca.

Tabla 15.
Porcentaje de sólidos y humedad

	ST [gr]	%ST	%H	SV [gr]	Mezcla Total [gr]
Prueba 1	200,00	12,50	87,50	117,80	1.600,00
Prueba 2	100,00	6,25	93,75	37,95	1.600,00
Prueba 3	150,00	9,38	90,63	97,30	1.600,00

Continua →

Prueba 4	100,00	6,25	93,75	52,90	1.600,00
Prueba 5	150,00	9,38	90,63	83,57	1.600,00
Prueba 6	600,00	37,50	62,50	245,56	1.600,00

Para definir los sólidos volátiles de cada prueba se calculó obteniendo el porcentaje de los sólidos volátiles en los sólidos totales de cada componente de la mezcla y se los sumó, utilizando la fórmula:

$$\sum ST \times \%SV_{bs}$$

De donde:

ST: Sólido Total de cada componente (hígado, excremento, sangre, grasa)

$\%SV_{bs}$: Porcentaje de sólido volátil en base seca cada componente

La medición del pH en cada mezcla se la realizó empleando el equipo Extech PH100, a una temperatura promedio de 30°C. Los datos se presentan en la Tabla 3.4, en la que se aprecia el pH al inicio y al final del proceso.

Tabla 16.

Valores de pH de las mezclas de pruebas

	INICIO	FINAL
Prueba 1	6,7	7,5
Prueba 2	7,2	7,0
Prueba 3	7,8	7,3
Prueba 4	6,8	5,7
Prueba 5	7,0	7,0
Prueba 6	7,4	7,5

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LOS DATOS ADQUIRIDOS

4.1. Metodología y tecnología empleada

Se desarrollaron pruebas preliminares para la familiarización del proceso y para la determinación de errores. En esta etapa de preparación se desarrollaron varios sistemas de medición de biogás y diferentes métodos de almacenamiento. Se notó también que la producción de biogás terminaba en la tercera semana con la tecnología empleada.

De acuerdo con los requerimientos del trabajo de investigación global que requiere la Universidad, se desarrollaron seis biodigestores de plástico tipo batch de 2 litros, dentro de un ambiente cerrado controlando únicamente la temperatura a $32^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Cada biodigestor se lo llenó con desechos orgánicos y agua hasta completar 1.600 gramos aproximadamente. Se midió el pH de la mezcla al ingreso del biorreactor y al finalizar el proceso.

El análisis físico-químico lo desarrolló el laboratorio de alimentos del PROTAL-ESPOL. Otras fuentes requeridas se las tomaron de las bases de datos existentes (ECN Phyllis2) y mediante pruebas propias.

La experiencia determinó la necesidad de realizar cuatro veces al día la lectura del biogás producido, e inmediatamente enviar ese biogás al depósito de almacenamiento.

Procedimiento para la toma de muestras:

- Se empleó ropa apropiada para protegerse y mantener la integridad de la muestra. (Figura 19)

- Se recolectaron las muestras frescas, recién desechadas del camal, en bolsas limpias libres de cualquier agente ajeno a la muestra, se las selló y etiquetó.



Figura 19. Toma de las muestra en el Camal

Herramientas y materiales:

- Guantes y tapaboca
- Overol corporal
- Botas caña alta
- Casco y gorro
- Pala cromado
- Bolsas plásticas nuevas
- Baldes limpio
- Cava para refrigerar la muestra

Preparación del experimento:

- Inmediatamente recolectadas las muestras, se molieron el hígado y las grasas. (Figura 20)
- Se pesó todas las partes con la balanza digital SCA-301 y se lo depositó en los biodigestores conforme a lo determinado en la Tabla 3.2. Se identificó cada biodigestor con marcador permanente numerándolo y se estableciendo una posición para cada uno dentro de la incubadora térmica.
- Se realizó la medida de pH de cada mezcla con el equipo Extech PH100.



Figura 20. Preparación de las muestras

- Se selló los biodigestores con pegamento; se probó que no existan fugas y que sea posible las mediciones volumétricas de biogás. Esto último se lo consigue apretando un poco el biodigestor y observando que el medidor mantenga la medida por un momento. Cuando existe fuga no se mantiene la medida volumétrica del biogás. Esta parte es de vital importancia para el experimento, no se debe proseguir si no se lo consigue.
- Se ajustó el controlador de temperatura de la incubadora dentro del rango mesofílico; esto es, a $32^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Una vez alcanzada la temperatura deseada, se colocaron los biodigestores dentro de la incubadora. (Figura 21)



Figura 21. Biodigestores dentro de la incubadora

Mediciones

- De acuerdo a la experiencia, se realizaron cuatro mediciones diarias de biogás. Todo se registró.
- Diariamente se controló el nivel de agua del embase de medición.
- Los diez primeros días se dejó salir el biogás evitando que ingrese oxígeno al biodigestor.
- Para realizar el almacenamiento de biogás, se colocó el depósito de almacenamiento DEP_02 y la jeringa de 10 cm³ (DEP_03), como lo indica la Figura 22. (1) Maniobrando la válvula VAL_01 se obtiene el biogás en la jeringa; (2) luego se maniobra las válvulas VAL_01 y VAL_02 para enviar el biogás al depósito de almacenamiento DEP_02.

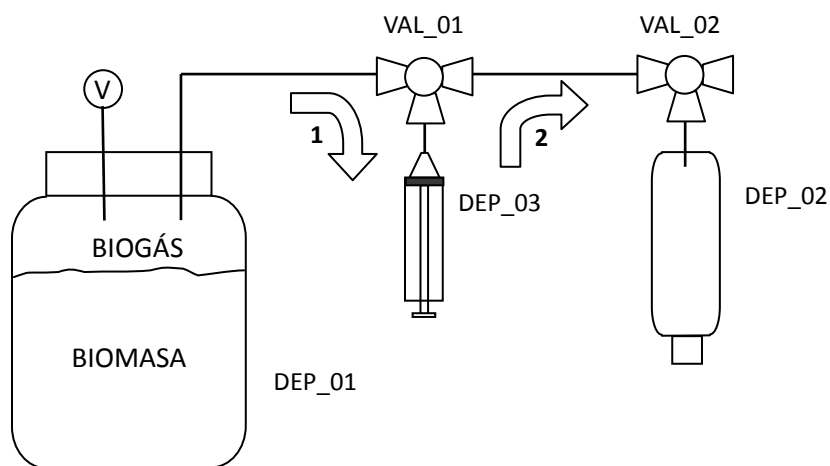


Figura 22. Medición y almacenamiento de biogás

- La producción terminó alrededor de los veinticuatro días. Sin embargo, el proceso se continuó hasta los treinta días.
- Terminado el proceso, se procedió a tomar muestras de todas las pruebas para volver a medir el pH. (Vea Tabla 3.4)

4.2. Procesamiento y análisis de datos

Debido que se repitió la prueba tres veces, se presentan los promedios de los datos obtenidos en la Tabla 17. Las curvas promedio de respuesta diaria y volumétrica acumulada en las Figuras 23 y 24, respectivamente. Los datos de cada prueba se los presenta en los Anexos.

Tabla 17.

Producción promedio de biogás en cm^3 de los seis biodigestores

DÍA	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0	0	0	0	0	0	0
1	4,7	6	2,5	0	6	0
2	4,8	10	10	0	9	0,5
3	6	17,8	4	4	16,6	1,6
4	8,2	16	5,2	4	12,2	4,2

Continua →

5	8	12,2	3,5	3,1	9,4	6,8
6	6	18	3,4	6	10	19
7	5,5	12,9	3,3	8	15	14
8	11,2	15	3,4	12	18	24
9	10	15	2,5	18	15,2	22
10	15,9	17,2	3	20	18	24
11	18	17	2	18,8	10	20
12	21,5	12,3	0	12	8	22
13	16	13	0	5	4	24
14	0	11	0	4	0	15
15	0	11	0	6	0	12,6
16	0	12	0	12	0	1,6
17	0	9	0	3,2	0	4
18	0	7,8	0	0	0	0
19	0	6	0	0	0	0
20	0	6	0	0	0	0
21	0	2,6	0	0	0	0
22	0	0,8	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0

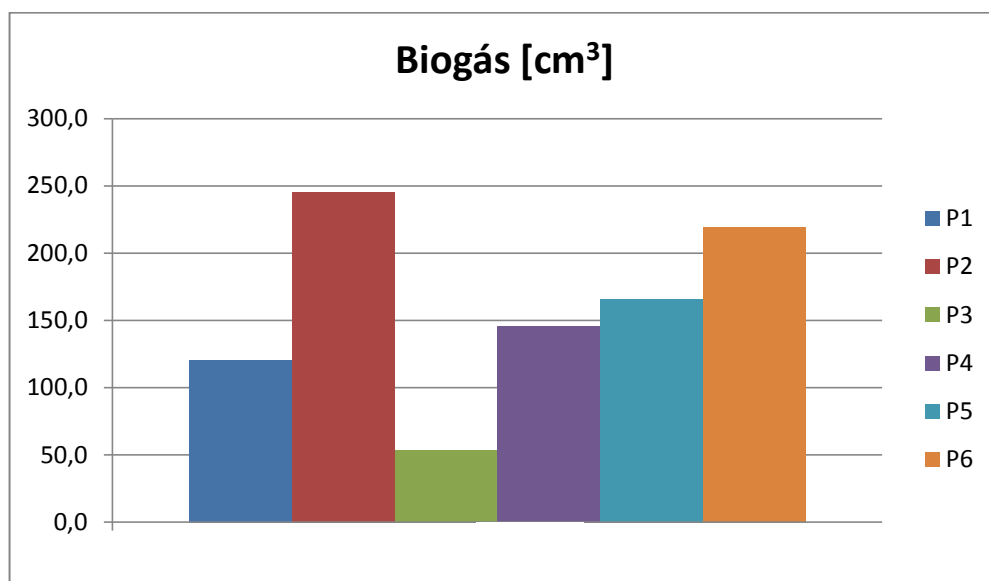


Figura 23. Producción promedio de biogás total de cada prueba en cm³

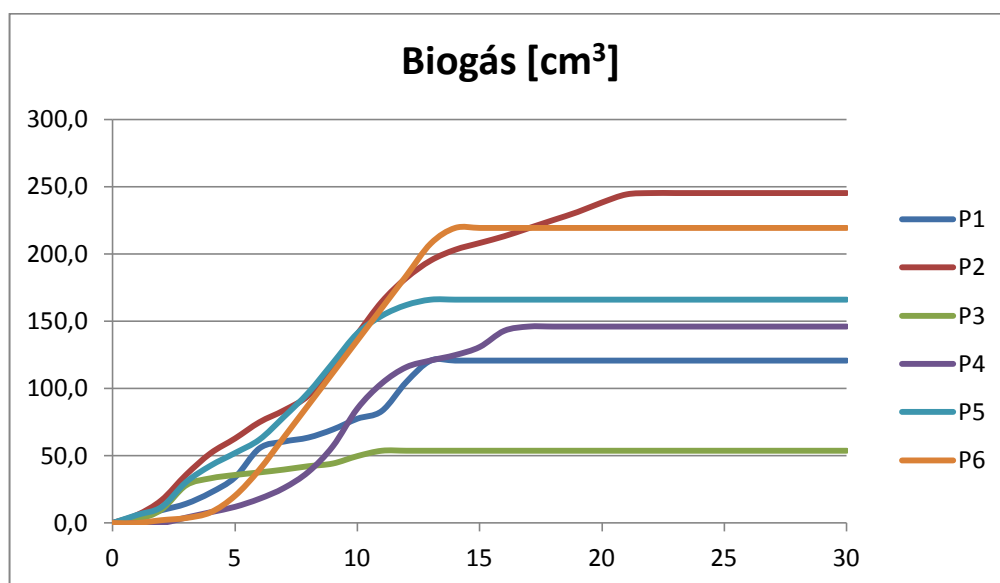


Figura 24. Producción promedio diaria acumulada en cm³

La Figura 25 presenta la producción promedio diaria de las seis pruebas. Debido a que se repitieron tres veces las pruebas, en el gráfico se observa el promedio de los 18 valores medidos.

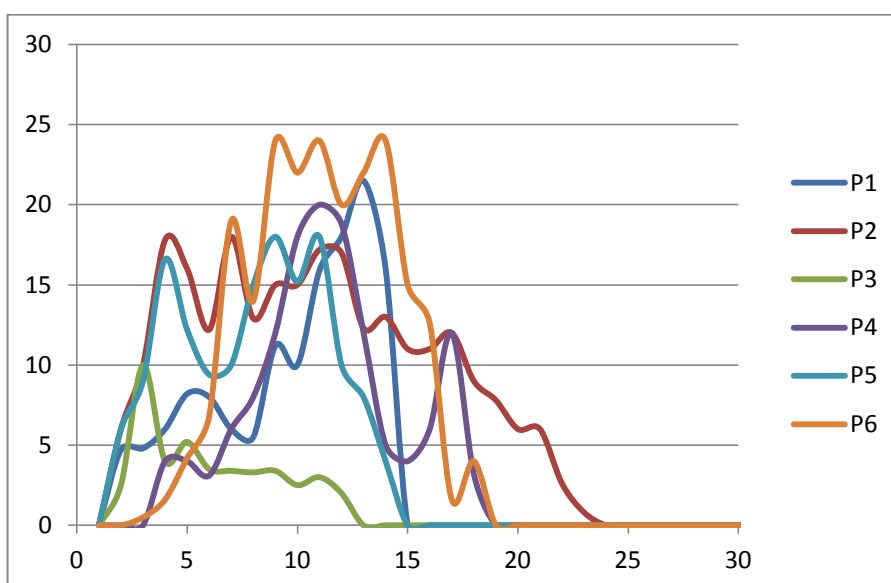


Figura 25. Producción promedio diaria de biogás en cm³

4.3. Determinación de la mezcla – tiempo requerido

La capacidad de todos los biodigestores fue de 1.600 gramos, lo que representa aproximadamente el 80% de la capacidad total del biodigestor, como se muestra en la Tabla 15 del capítulo anterior. Las mezclas (Tabla 14) se las determinó para efectuar comparaciones entre las diferentes pruebas.

Como se conoce que los excrementos de ganado producen biogás, se escogió la Prueba 6 (600g de excremento y 1kg de agua) como el patrón de referencia, con un porcentaje de humedad de 62,5%.

Entre la Prueba 1 (100g de excremento y 100g de hígado) y Prueba 3 (50g de excremento y 100g de hígado) se analiza la producción con menor contenido de excremento. La Prueba 2 (50g de excremento y 50g de sangre) y Prueba 4 (50g de excremento y 50g de grasa) se compara la producción de biogás entre la sangre y la grasa. La prueba 5 (30g de excremento, 50g de sangre y 70g hígado) implica añadir mayor cantidad de hígado en toda la mezcla.

El tiempo de retención de las investigaciones analizadas dependía del tipo de biodigestor. La mayoría de los estudios emplearon, o bien el sistema

de flujo semi-discontinuo, o bien de flujo continuo. De acuerdo al objetivo de esta investigación, se empleó el tipo batch o de flujo discontinuo en ambiente mesofílico. Por tal razón, el tiempo de retención dependió del resultado obtenidos de esta investigación; esto es, hasta el momento en que se detuvo la producción de biogás, la misma que se lo obtiene de la Tabla 18 (valores de producción promedio de la digestión anaeróbica) y se lo presenta en la Tabla 4.2; en la que se puede apreciar el máximo de 22 días para la Prueba 2 y el mínimo de 11 días para la Prueba 3.

Tabla 18.

Tiempo de producción de biogás

Pruebas	Tiempo de producción en días	Cantidad de biogás en cm ³
1	13	120,7
2	22	245,2
3	11	53,7
4	17	146,0
5	13	166,0
6	16	219,3

4.4. Análisis de la máxima producción de biogás

Para efectuar el análisis de la máxima producción de biogás se ha desarrollado la Tabla 19 donde se presentan todos los valores importantes, y se ha tomado en cuenta tres factores:

1. La obtención total del experimento en todos los días de prueba.
2. La característica de producción del biogás.
3. La eficiencia de producción de la cantidad de biogás obtenido en función de la cantidad de sólidos volátiles (SV) de la mezcla.

A simple vista se determina la mayor producción en la Prueba 2 (50g de excremento con 50g de sangre y 1500g de agua) con 245,2 cm³. La Prueba 2 también tiende a ser más eficiente (6,46 cm³·gSV⁻¹) al considerar la cantidad de biogás por SV empleados. En esta mezcla, también se debe notar que contiene el mayor porcentaje de humedad, con el 93,75%. Además, es la que tiene el mayor tiempo de producción con 22 días. Con todo esto, se ha tomado esta mezcla como un elemento importante para continuar con el desarrollo del análisis, cuyo elemento importante es la sangre. Se menciona esto debido a las pocas investigaciones empleando sangre.

Tabla 19.

Comparaciones de la producción de biogás

PRUEBA	pH INICIO	pH FINAL	ST [gr]	SV [gr]	% H	Días de producción	Biogás [cm ³]	Eficiencia [cm ³ ·gSV ⁻¹]
1	6,7	7,5	200,0	117,80	87,50	13	120,7	1,02
2	7,2	7,0	100,0	37,95	93,75	22	245,2	6,46
3	7,8	7,3	150,0	97,30	90,63	11	53,7	0,55
4	6,8	5,7	100,0	52,90	93,75	15	146,0	2,76
5	7,0	7,0	150,0	83,57	90,63	13	166,0	1,99
6	7,4	7,5	600,0	245,56	62,50	13	219,3	0,89

La Prueba 5 es otra mezcla que contiene sangre (30g excremento, 50g sangre, 70g hígado). Su producción está por debajo de la prueba patrón (P6) pero con el doble de eficiencia. Lo que provoca pensar que el hígado puede causar inconvenientes.

Las otras pruebas que contienen hígado son P1 (100g excremento, 100g hígado, 1400g de agua) y P3 (50g excremento, 100g hígado, 1450g de agua). Nótese que tanto P1 y P3 presenta los peores resultados con 120,7 cm³ y 53,7 cm³, respectivamente. Además, de tener la menor eficiencia para

cada caso ($1,02 \text{ cm}^3.\text{gSV}^{-1}$ y $0,55\text{cm}^3.\text{gSV}^{-1}$). El problema con P3 puede deberse al alto nivel de pH, alrededor de 7,8 al iniciar. Lo que implica que la mezcla es más alcalina que las otras. Por otro lado, las muestras de hígado que se tomaron eran productos enfermos: con gusanos, cirrosis, etc., lo que pudo ocasionar problemas para el desarrollo de las bacterias.

La Prueba 6 es la más acercada a la curva teórica de población bacteriana. Las Pruebas P2, P3 y P5 tienen un rápido crecimiento en los primeros 5 días. Sólo P2 se mantiene hasta la etapa metanogénicas.

El pH al comienzo y final del proceso no tuvo cambio significativo, sólo en la Prueba 4 tiene una diferencia de 1,1. Cabe mencionar que todas las mezclas de las diferentes Pruebas estuvieron dentro del rango recomendable.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se concluye que:

- La producción de biogás se la obtiene a los primeros días del proceso de digestión, entre el 4to y 5to día, tomando como referencia el gráfico de la producción acumulativa de la Figura 24 y considerando a partir del 10% de la producción cuando llega a la fase estacionaria del crecimiento bacteriano. En la Figura 24 se puede notar que se cumple el paso de la fase de latencia al de crecimiento exponencial.
- El tiempo de producción (tiempo hasta cuando se detiene la producción de biogás) en cinco Pruebas, excluyendo la Prueba 3, implica un periodo de 13 a 22 días, lo que representa un promedio de 17,5 días.
- La mejor producción se logró en el producto con sangre P2. En la curva diaria se observa que tiene una alta velocidad de producción, lo que se entiende como un nivel apropiado de nitrógeno en la mezcla, conforme se mencionó en el capítulo 2. Al emplear sangre en el proceso se obtuvo mayor tiempo de producción (22 días). Debido a esto se puede afirmar que con la mezcla P2 se consiguió la mejor eficiencia de producción ($6,46 \text{ cm}^3 \cdot \text{gSV}^{-1}$).
- La diferencia de componentes de desechos orgánicos presentan diferencias significativas en la producción de biogás, valores de $53,7 \text{ cm}^3$ a $245,2 \text{ cm}^3$ (cuatro veces más). De la misma manera se presentan diferencias en la eficiencia de producción en relación a la cantidad de sólidos volátiles empleado: $0,55$ a $6,46 \text{ cm}^3 \cdot \text{gSV}^{-1}$.
- El porcentaje de humedad óptimo fue alrededor del 60 al 93%, considerando la eficiencia de producción.
- En la Prueba 4 se presentó cierto nivel de toxicidad perjudicial, debido a la disminución del pH, como se explicó en el Capítulo 2. Otro factor que originó inconvenientes se debió a que la masa de grasa no estuvo

debidamente disuelta para servir de alimentos a las bacterias. Es difícil conseguir esto ya que la grasa tiende a formar una costra en la superficie del sustrato.

- La combinación óptima consistirá, para esta investigación, en mezclas con el mismo porcentaje de sólidos totales de sangre y excremento, como fue el caso de la Prueba 2; con una humedad de alrededor del 90%, y con el pH mayor a 7,0. Todo esto da a entender que existe una tendencia al aumento de la producción de biogás empleando sangre en el sustrato.

RECOMENDACIONES

- Es imprescindible tomar precauciones cuando se trabaja con desechos. Es decir, el empleo de implementos de protección como guantes, ropa apropiada, máscaras, etc.
- También será conveniente utilizar detectores de metano para controlar las posibles fugas que se puedan presentar. Si se desea trabajar con biodigestores de mayor capacidad, es apropiado emplear válvulas de seguridad liberadoras de presión.
- Es muy conveniente realizar pruebas preliminares, más aún si no se tiene experiencias sobre cualquier proceso.
- Conviene tener inóculos de laboratorio para continuar desarrollando estos tipos de investigaciones, casi todos los trabajos consultados operan de esta manera. Sin embargo, esto implicará tener un laboratorio para el mantenimiento del inóculo y una persona controlando el proceso.
- Convendría realizar un medidor volumétrico diario, de esta manera bastaría con medir una vez al día. Se recomienda realizar la medición en la tarde cuando la temperatura ambiente está dentro del rango mesofílico. Esto dependerá de la localidad donde se realice la prueba.

- Para futuros experimentos se recomienda llegar a un convenio formal con el laboratorio de INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables), a fin de efectuar la prueba de cromatografía de gases y obtener la característica del biogás producido. Para ello, el laboratorio exige conseguir fundas tedlar de alrededor 300 ml, lo que fue imposible en nuestro caso, dentro y fuera del país.
- Futuras investigaciones podrían contar con un agitador del sustrato mientras se desarrolla el proceso, a fin de evitar la acumulación de costras en la superficie.
- Por último, como se ha conseguido determinar la tendencia del crecimiento de producción de biogás empleando igual cantidad de sólidos totales de sangre y excremento, sería conveniente desarrollar nuevas investigaciones para complementar este tema.

BIOBLOGRAFÍA

- Ackmez, M. (2012). Anaerobic digestion. *Biogas production*.
- Agyeman, Fred O. and Tao, Wendong. (2014). Anaerobic co-digestion of food waste dairy manure: Effects of food waste particle size and organic loading rate. *Journal of Environmental Management*, 133, 268-274. New York: University of New York.
- Alcides Duarte, E.H. *Programa Mejoramiento de las bases de datos para una política energética más sustentable en Paraguay. Construcción e instalación de un biodigestor*. Paraguay.
- Álvarez, René. (2004). *Producción anaeróbica de biogás. Aprovechamiento de los residuos del proceso anaeróbico*. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
- Ashekuzzaman, S. M. and Poulsen, Tjalfe G. (2011). Optimizing feed composition for improved methane yield during anaerobic digestion of cow manure based waste mixtures. *Bioresource Technology*. 102, 2213-2218. Aalborg University, Sohngaardsholmesvej, Denmark.
- Asia Development Bank. (2011). *Toward sustainable municipal organic waste management in south Asia. A guidebook for policy makers and practitioners*. ADB. Philippines.
- AzuraZakarya, Irnis. (2013). Production of methane gas from organic fraction municipal solid waste via anaerobic process: application methodology for the Malaysian condition. *Environment and Waste Management*, Vol. 1w, No. 2. India: Universiti Malaysia Perlis.
- Balmant, W. et al. (2014). Optimal operating conditions for maximum biogas production in anaerobic bioreactors. *Applied Thermal Engineering*. 62, 197-206. Curitiba, Brasil: Universidad Federal do Paraná.
- Bansal, Ankur K. et al. (2013). The road to zero waste: Anaerobic digester. *International Journal of environmental sciences*, Vol. 3, No. 5.

Kurukshetra.

Battimelli, A. y otros. (2009). Slaughterhouse fatty waste saponification to increase biogas yield. *Bioresource Technology*. France.

Cadena, Javier Eduardo. (2009). *Factibilidad técnica y económica para la implementación de un sistema de aprovechamiento de desechos orgánicos producidos por el Camal del Gobierno Municipal del Cantón de Salcedo*. Sangolquí: ESPE.

Campero Rivero, Oliver. (2012). Monitorización y evaluación comparativa de la tecnología de biodigestores anaerobia como fuente de energía renovable en dos ámbitos familiar e industrial en Bolivia. Huelva: Universidad Internacional de Anadalucía.

De la Torre Caritas, Nadia. (2008). Digestión anaerobia en comunidades rurales. Universidad Carlos III de Madrid.

Domínguez, Pedro Luis y Ly, Julio. *Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados*. La Habana, Cuba: Instituto de investigaciones porcinas.

Feng, Yinghong et al. (2013). Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron. *Water research* XXX. 1-9. China: Dalian University of Technology.

Flotats, Xavier et. Al. (2001). Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria. *Porci; Monografías de actualidad*, 65, 51-65. Universidad de Lleida.

Flotats, Xavier. (2010). Biogás y gestión de deyecciones ganaderas.

Fonseca, Escudero de. (2009). Metano en residuos domésticos. Barranquilla, Colombia.

Gerardi, Michael H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. , Canadá: Published by John Wiley & Sons

González, L. Martín. (2010). Anaerobic co-digestion of the organic of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant:

Recovering a wasted methane potential and enhancing the biogas yield. *Waste Management*. 30, 1854-1859. Spain: UniversitatAutonoma de Barcelona.

Guasumba, José. (s/f). *Generación rápida de biogás, como alternativa energética promisorio*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Hood, E. et al. (2011). *Plan biomass conversion*. Ed. Wiley-Blackwell.

Khalid, Azeem et al. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*. 31, 1737-1744. Pakistan: AgricultureUniversity, Rawalpindi.

LaGrega Michael D. y otros. (1996). *Gestión de residuos tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos*. Traducido por Belén Garrido-Lestache Valenciano y otros. Volumen II. Madrid: McGraw-Hill.

Li, Yebo et al. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 821-826. The Ohio State University.

Lobato Fuertes, Álvaro. (2012). *Estudio de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos con otros substrates agroindustriales*. España:Universidad de León.

López, Iván y Liliana Borzacconi. (2009). Modelling of slaughterhouse solid waste anaerobic digestion: Determination of parameters and continuous reactors simulator. *Waste Management* 30 (2010) 1813–1821. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.

López Martínez, Germán. (2005). *Digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos urbanos*. Bogotá, Colombia.

López Mendoza, Cludia y Omar López Solís. (2009). *Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias químicas de la Universidad Varacruzana*. México, Varacruz: Universidad

Veracruzana.

Marañón Maison, Elena et al. (2009). Manual de estado de arte de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y agroindustriales. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.

Marañón, Elena et al. (2014). Anaerobic Mesophilic Treatment of Cattle Manure in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor with Prior Pasteurization. *Air & Waste Management Association*. At:11:54. London, UK.

McGowan, T. (2009). *Biomass and alternate fuel systems, and engineering and economic guide*. Ed. John Willer&Sons.

Molino, A. et al. (2013). Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. *Fuel*. 103, 1003-1009. Matera, Italy: ENEA, National Agency for New Technologies.

Ocaña, Francisco Javier. (2011). Biodigestor anaerobio de laboratorio. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés.

Ortega Rodriguez, M. (2000). *Energias renovables*. Ed Madrid: Paraninfo.

Regueiro, Leticia et al. (2012). Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates. *Bioresourse Technology*, 123, 507-513. Santiago de Compostela, Spain: School of Engineering, University of Santiago de Compostela.

Salomoni, C. et al. (2011). Enhanced methane production in a two-phase anaerobic digestion plant, after CO₂ capture and addition to organic wastes. *Bioresourse Technology*, 102, 6443-6448. Bologna; Italy.

Scano, Efsio Antonio et al. (2014). Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy Conversion and Management*, 77, 22-30. CA, Italy: Biofuels and Biomass Laboratory, SardegnaRicerche.

Sitorus, Berlian et al. (2013). Biogás recovery from anaerobic digestion

process of mixed fruit-vegetable wastes. *Energy Procedia*.32, 176-182. Indonesia: Elsevier.

Sorensen, Bent. (2001). *Renewable energy*. 4th edition. MA, USA: Elsevier.

Twidell, John and Weir, Tony. (2006). *Renewable energy resources*. Second edition. New York: Edit. Taylor & Francis.

Varnero, María T. et al. (2012). Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usando en la generación eléctrica. *Información tecnológica*. Vol. 23(2), 31-40. Universidad de Chile.

Watanabe, Ryoya et al. (2013). Enhancing methane production during the anaerobic digestion of crude glycerol using Japanese cedar charcoal. *Bioresourcetechnology*. 150, 387-392. TohokuUniversity, Japan.

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO DE GRADO
“CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS DEL CAMAL
DE GUAYAQUIL”

AUTORES

JAIME ALFREDO CALLE CAÑIZARES

CAMILO DAVID ARELLANO ARROBA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

M.Sc. Ing. Oswaldo Ibarra

COORDINADOR MER

Ing. Carlos Naranjo

DIRECTOR DEL DECEM

UNIDAD DE GESTIÓN DE POSGRADOS

Doctora Amparo Martínez

DIRECTORA

Sangolquí, 13 de diciembre de 2014

