

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE EXCRETAS PORCINAS EN LA GRANJA AGROINPORC Y DISEÑO DE UN BIODIGESTOR

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
AGROINDUSTRIAL**

VERÓNICA MABEL BAUTISTA GUERRA
mabel15685@yahoo.com

DIRECTORA: ING. NEYDA FERNANDA ESPÍN FÉLIX, M.Sc.
neyda.espin@epn.edu.ec

Quito, julio del 2016

© Escuela Politécnica Nacional (2016)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Verónica Mabel Bautista Guerra, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Verónica Mabel Bautista Guerra

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Verónica Mabel Bautista Guerra, bajo mi supervisión.

Ing. Neyda Espín, M.Sc.
DIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme la oportunidad de vivir.

A mis padres, Víctor Bautista y Fanny Guerra por darme la vida, apoyarme en todo momento, y ser un pilar fundamental en mi vida. A mis hermanas y hermano, Eva, Mayra, Amparo y V. Hugo, por los gratos momentos compartidos.

A mi esposo Braulio Tapia, mis hijos Janis y Braulio Jr, por su apoyo incondicional.

A la Ing. Neyda Espín, a la Ing. Mary Casa y al Ing. Carlos Tapia, quienes con su conocimiento, paciencia, tiempo y dedicación pudieron guiar este proyecto hasta su culminación.

A mi familia, especialmente a mis padres.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	viii
INTRODUCCIÓN	ix
1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Producción porcina en el Ecuador	1
1.2 Fermentación anaerobia para la obtención de biogás	4
1.2.1 Fases de la digestión anaerobia	6
1.2.2 Biol	8
1.2.3 Biogás	9
1.2.4 Factores determinantes para la producción de biogás	10
1.3 Biodigestores anaerobios	17
1.3.1 Características de un biodigestor	17
1.3.2 Tipos de biodigestores	18
1.3.3 Planta de biogas	20
1.3.4 Parámetros operacionales del digestor	22
1.3.5 Beneficios ambientales de la digestión anaeróbica	24
2 PARTE EXPERIMENTAL	25
2.1 Objetivos	25
2.2 Materiales	25
2.3 Determinación de la producción de biogás	26
2.3.1 Determinación de la cantidad de excretas generadas en la granja	26
2.3.2 Caracterización físico - químico de excretas	26
2.3.3 Descripción del biodigestor	27
2.3.4 Preparación de la materia prima	28
2.3.5 Efecto de la temperatura en la generación de biogás	29
2.3.6 Prueba final a las mejores condiciones	30
2.4 Diseño de un biodigestor anaerobio	31
2.4.1 Especificaciones del diseño del biodigestor	31
2.4.2 Localización del biodigestor	34
2.5 Análisis costo/ beneficio	34

3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
3.1	Determinación de la producción de biogás	35
3.1.1	Cantidad de excretas generadas en la granja	35
3.1.2	Resultados de los análisis físicos - químicos de las excretas de cerdo	38
3.1.3	Efecto de la temperatura en la generación de biogás	40
3.1.4	Prueba final a las mejores condiciones	45
3.2	Diseño de un biodigestor	48
3.3	Análisis costo/beneficio	63
3.3.1	Costos directos	63
3.3.2	Costos indirectos	65
3.3.3	Egreso anual	67
3.3.4	Sustitución de gas comercial por biogás	67
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
4.1	Conclusiones	69
4.2	Recomendaciones	70
	BIBLIOGRAFÍA	71
	ANEXOS	78

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1	Eliminación de residuos porcinos por región	2
Tabla 1.2	Concentración media de purines de cerdo	4
Tabla 1.3	Composición físico químico de un digestato porcino	9
Tabla 1.4	Composición del biogás	10
Tabla 1.5	Relación C/N de sustratos para la digestión anaerobia	12
Tabla 1.6	Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaerobia	13
Tabla 1.7	Contenido promedio de sólidos totales en diversos residuos	14
Tabla 1.8	Inhibidores en el proceso de digestión anaerobia y sus concentraciones perjudiciales	15
Tabla 1.9	Poder calorífico de diferentes combustibles	16
Tabla 1.10	Diferencias y semejanzas entre los modelos de biodigestores más conocidos	19
Tabla 2.1	Análisis físico-químicos realizados en muestras de estiércol	26
Tabla 2.2	Análisis químicos de muestra de biol	31
Tabla 3.1	Producción diaria de excretas porcinas	36
Tabla 3.2	Caracterización de excretas porcinas	38
Tabla 3.3	Resultados de la Prueba t para la producción de biogás acumulado a temperatura controlada y temperatura ambiente	42
Tabla 3.4	Caracterización de biogás a temperatura controlada (35 °C) y ambiente	43
Tabla 3.5	Caracterización de biogás	45
Tabla 3.6	Caracterización del biol	46
Tabla 3.7	Funcionamiento de lámparas	48
Tabla 3.8	Consumo de biogás diario y mensual de las lámparas	49
Tabla 3.9	Parámetros para dimensionar la fosa	54
Tabla 3.10	Dimensiones del tanque de carga y salida de efluentes	59

Tabla 3.11	Costo de materiales directos para la implementación del biodigestor	64
Tabla 3.12	Costos de mano de obra directa para la implementación de la fosa y el invernadero	65
Tabla 3.13	Costos totales directos	65
Tabla 3.14	Costos de materiales indirectos	66
Tabla 3.15	Costo de mano de obra indirecta	66
Tabla 3.16	Costos indirectos totales	67
Tabla 3.17	Gasto anual por compra de cilindros de gas	67
Tabla 3.18	Producción de biogás total	68

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1	Esquema gráfico de la digestión anaerobia	6
Figura 1.2	Reacciones químicas durante la digestión anaerobia	8
Figura 1.3	Sistema de digestión tipo batch	18
Figura 1.4	Sistema de digestión continuo	19
Figura 1.5	Sistema de digestión de dos etapas	20
Figura 1.6	Componentes de un sistema de biogás	21
Figura 1.7	Esquema de la línea de conducción de biogás	22
Figura 2.1	Esquema para recolección y almacenamiento de biogás	27
Figura 2.2	Esquema del método de desplazamiento de líquido	28
Figura 3.1	Producción de biogás a partir de excretas de cerdo durante 30 días de retención a C: temperatura controlada 35 °C y A: temperatura ambiente	41
Figura 3.2	Composición de biogás a temperatura ambiente y controlada (35 °C)	44
Figura 3.3	Prueba de inflamabilidad	46
Figura 3.4	Digestor tubular	51
Figura 3.5	Dimensionamiento del biodigestor tubular	53
Figura 3.6	Vista frontal de la zanja	54
Figura 3.7	Vista Lateral de la zanja	55
Figura 3.8	Presiones sobre la fosa del biodigestor	55
Figura 3.9	Esquema del biodigestor tubular	57
Figura 3.10	Dimensiones del tanque de efluentes	58
Figura 3.11	Dimensión de la tubería para el tanque de entrada	59
Figura 3.12	Dimensión de la tubería para el tanque de efluentes	60

Figura 3.13	Sistema de acoples para la salida del biogás	60
Figura 3.14	Acople de la válvula de seguridad	61
Figura 3.15	Dimensiones del gasómetro	62

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Criterios de la calidad de agua permisibles para la preservación de flora y fauna	78
ANEXO II	
Distribución de la granja porcina agroinporc	80
ANEXO III	
Determinación de parámetros físicos y químicos	81
ANEXO IV	
Distribución de biogás a las lámparas de calefacción en la sala de maternidad y cría	89

RESUMEN

En el presente proyecto se estudió la influencia de la temperatura en la producción diaria de biogás a partir de las excretas porcinas. El material orgánico para la fermentación se obtuvo de la granja experimental Agroinporc ubicada en la provincia de Pichincha cantón Cayambe. Se planteó un diseño experimental de dos grupos; es decir con dos tratamientos, uno a 35 °C y el segundo a temperatura ambiente promedio (t media de 26 °C) con dos repeticiones cada uno. Como reactor se utilizó un recipiente plástico de 6 L de capacidad, acoplado en su tapa una manguera para la recolección del biogás. En la caracterización de las excretas de cerdo se obtuvieron valores promedio de pH igual a 7,58; porcentaje de sólidos totales (ST) de 73,52 % y la relación carbono-nitrógeno (C/N) de 11,58. Se caracterizó el biogás producido a los 10 y 30 días de fermentación a temperatura ambiente y controlada (35 °C). La concentración promedio de metano a los 30 días de fermentación a 35 °C fue de 69,04 % p/p mientras que a temperatura ambiente se obtuvo 54,02 % p/p. El incremento de biogás a 35 °C fue 21,76 % mayor con respecto a la producción a temperatura ambiente. Los análisis de poder calórico se reportaron en una muestra de biogás con un valor de 990,30 btu/pie³. Además, se realizó una caracterización del biol al final de la fermentación. El valor promedio de nitrógeno amoniacal fue de 56 ppm, el valor del fósforo fue 350 ppm y el potasio 570 ppm. Con los mejores resultados experimentales, se diseñó un biodigestor tubular que consideró el 42.9 kg de la producción de estiércol diario y el tiempo de retención de 25 días. La producción de biogás diaria calculada cubre los requerimientos para cuatro lámparas que funcionan durante 8 horas diarias, empleadas para las salas de maternidad de la granja porcina.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la producción porcina en el Ecuador ha incrementado, debido a que la carne de cerdo constituye la tercera fuente de proteína animal dentro de la alimentación de los ecuatorianos, detrás de la carne de pollo y res, respectivamente. En el 2007 se producía 87 000 TM de carne de cerdo, mientras que en el 2011 se incrementó la producción a 104 000 TM, evidenciándose un incremento del 20 % en cinco años. Del mismo modo, el consumo per cápita aumentó de 7 a 10 kg/persona/año (MAGAP, 2010, p. 6).

El aumento en el consumo de carne de cerdo, también ha incrementado los residuos generados por la producción porcina. Los residuos producidos en granjas porcinas están asociados con problemas medioambientales debido a las elevadas concentraciones de materia orgánica y metales pesados como cobre y zinc contenidas en las excretas. Además, estos desechos producen la contaminación de aguas destinadas al riego agrícola y la eliminación de metano contribuye a la polución de la atmósfera. Como solución a la problemática ambiental y alternativa energética, el manejo de excretas porcinas representa una alternativa viable de bajo costo para la producción de biogás y biofertilizante. La producción técnica de fertilizantes líquidos y sólidos como subproductos de la fermentación se utilizan como abonos amigables para el medio ambiente y permite a los agricultores disminuir el uso de fertilizantes de origen químico (Choi, 2007, p. 1).

El biogás es el producto de la fermentación anaerobia donde intervienen microorganismos en la degradación de la materia orgánica con la finalidad de proporcionar sustratos en forma de azúcares, aminoácidos, alcoholes y ácidos grasos que posteriormente producirán gas metano (FAO, 2011, p.14). En el proceso fermentativo, la relación C/N es necesaria para el desarrollo de microorganismos y se considera un óptimo de 30. El biogás producido es una mezcla principalmente de metano y dióxido de carbono cuya composición puede variar según el tipo de sustrato utilizado, los microorganismos empleados y condiciones de temperatura, tiempo de retención, pH y humedad. Las

concentraciones de metano, según bibliografía, se encuentran entre 50 y 70 % p/p y entre 20 y 40 % de CO₂. Se estima que la producción de biogás a partir de estiércol porcino adulto es de 0,3 a 0,4 m³ de biogás (Abbasi, Tauseef y Abbasi, 2012, p. 43).

La tecnología de fermentación anaerobia mediante la implementación de biodigestores, permite la generación de energías térmica o eléctrica que puede ser aprovechada en una empresa, finca o comunidad. Los factores a considerar para el diseño de un biodigestor son cantidad de residuos generados, características de los sustratos y ubicación. Se han desarrollado varios tipos de digestores, de entre los cuales, los de tipo tubular son los más empleados por su fácil instalación, un tiempo de vida útil de 10 a 15 años y costos de operación y mantenimiento bajos (Samayoa, Bueso y Víquez, 2012, p. 18).

La granja experimental AGROINPORC, dada la problemática ambiental con los residuos generados en ella, mostro su interés por emplear las excretas porcinas para generar biogás y ser utilizado en la misma granja. Sin embargo, a pesar de que existe bibliografía respecto de digestores, el diseño de uno requiere de datos experimentales que permitan obtener parámetros reales para determinar el tamaño y tipo de biodigestor. Por esta razón, se planteó el presente trabajo, cuyo objetivo fue el de evaluar la generación de biogás a partir de excretas porcinas y diseñar un biodigestor.

1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 PRODUCCIÓN PORCINA EN EL ECUADOR

El objetivo principal para la producción porcina es la obtención de proteína de origen animal de mejor calidad y en el menor tiempo posible. Para ello se trabaja con razas especializadas productoras de carne con bajo porcentaje en grasa, que en promedio alcanzan los 100 kg de peso vivo en 24 semanas desde su nacimiento (INTA, 2012, p. 37).

En los últimos años la producción porcina en el Ecuador se ha desarrollado considerablemente; en el año 2010 la carne de cerdo se constituyó como la tercera fuente de proteína animal dentro de la alimentación de los ecuatorianos, tras la de pollo y res respectivamente. Según la encuesta nacional de granjas porcinas efectuado en el 2010, el incremento es notorio, ya que en el 2007 se producían 87 000 TM de carne de cerdo, mientras que la ESPAC en el 2011 reporto un aumento a 104 000 TM, evidenciándose un incremento del 20 % en esos cinco años. Del mismo modo el consumo per cápita aumento de 7 a 10 kg/persona/año (MAGAP, AGROCALIDAD y ASPE, 2010, p. 6).

Según el censo porcícola efectuado por el MAGAP, AGROCALIDAD Y ASPE (2010), existen 1 737 granjas porcinas registradas a nivel nacional con un total de 1 489 761 animales (p. 22), mientras que, en el 2014 la Encuesta de superficie y producción agropecuaria (ESPAC) reporta un incremento cercano al 23 % con 1 934 162 cabezas de animales. Con respecto a la distribución de las granjas, el 41 % de ellas se sitúan en la sierra, el 38 % en la costa, el 18 % en el oriente y el 2 % en galápagos. De estas granjas, el 82 % son de ciclo completo, el 13 % de ceba y el 5 % de cría (MAGAP, AGROCALIDAD Y ASPE 2010, pp. 22-33). Refiriéndose a granjas de cría a las destinadas a producir lechones (hasta 40 kg) para su venta, granjas de ceba las que engordan lechones de 2 meses (20 kg) hasta que alcancen los 100 kg aproximadamente y granjas de ciclo completo aquellas que realizan las actividades de producción de lechones y cerdos de engorde (INTA, 2012, p. 38).

AGROCALIDAD Y ASPE (2013) mencionan que el desarrollo del sector porcino en el país se debe a factores como: el adelanto tecnológico en las instalaciones, mejoramiento genético, adecuado manejo y alimentación balanceada de los animales, así como, la aplicación de buenas prácticas de producción porcícola difundidas a los pequeños productores a través de programas del MAGAP (p.3).

Se estima que el 90 % de la demanda nacional de carne porcina es abastecido por los grandes, medianos y pequeños productores, y el resto se importa mayoritariamente de Chile y Brasil, en especial subproductos para la elaboración de embutidos (grasa, cuero, trimmings) (MAGyP, 2013, p. 43). En cuanto a las exportaciones, el MAGAP señala que Ecuador envía principalmente embutidos a Colombia y Estados Unidos (p. 53).

El incremento en la producción porcina también aumentó la generación de desechos; según el censo realizado por el MAGAP (2010), apenas el 44% de los purines reciben tratamiento en lagunas de oxidación o con el empleo de biodigestores, mientras que el 56% se eliminan a ríos, quebradas y alcantarillado. En la Tabla 1.1 se muestra la disposición final de los residuos porcinos de las granjas por región del país.

Tabla 1. 1 Eliminación de residuos porcinos por región

Región	Alcantarillado	Laguna de oxidación o biodigestores	Ríos/ Quebradas
Costa	41	283	333
Sierra	59	339	320
Oriente	6	145	171
Galápagos	0	4	36

(MAGAP, 2010, p. 61)

La legislación de la calidad ambiental vigente en el Ecuador señala que, con el fin de evitar la contaminación ambiental a los recursos de aire, agua y suelo, los purines generados en las granjas porcinas deben ser tratados adecuadamente y

cumplir con la normativa ambiental dispuesta en el TULSMA (libro VI, anexo I), previo su descarga final (AGROCALIDAD Y MAGAP, 2013, p. 33).

De acuerdo con la ley y reglamento de gestión ambiental, los criterios de calidad de aguas permisibles para la preservación de flora y fauna en aguas dulces, cálidas, frías, incluye una carga de microbiana máxima de 200 ppm y un pH 6,5 - 9. En el Anexo I se presentan los requisitos legales completos.

1.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS EXCRETAS PORCINAS

Las excretas que producen los cerdos se constituyen de heces y orina, 55 y 45 % respectivamente. El contenido de materia seca es cercano al 12 % y la humedad al 88 %. La densidad de la excreta es comparable a la del agua, puesto que es ligeramente mayor a 1. El pH varía entre 6 y 8, sin embargo, tiende a la neutralidad mientras más fresca sea la excreta. Por cada 100 kg de peso vivo del cerdo se genera a diario 0,25 kg de DBO (Demanda biológica de oxígeno) y 0,75 kg DQO (Demanda química de oxígeno), aproximadamente. Además, la excreta porcina contiene alrededor de 0,41 kg/día de sólidos totales (ST) y de 0,3 a 0,33 kg/día de sólidos volátiles (SV) (Gerardi, 2003,p. 6; INIA, 2005, p.20). Debido a su composición, diversas aplicaciones se pueden dar a las excretas porcinas entre ellas se tiene: fertilizante orgánico, mejorador de suelos, sustrato para la elaboración de compost, sustrato en lombricultura y como materia prima para generar energía (biogas) (INIA, 2005, p.95). Con respecto a esta última aplicación, se estima que el rango del potencial de producción de biogás a partir de estiércol porcino está entre 0,3 y 0,4 m³/kg SV (Abbasi, Tauseef y Abbasi, 2012, p. 43; Choi, 2007, p. 160) ó de 0,06 a 0,13 m³/kg de estiércol (Abbasi, Tauseef y Abbasi, 2012,p.69; FAO, 2011,p.34).

Los residuos en las explotaciones porcinas están constituidos por las excretas, restos de comida, agua de lavado y bebederos, lo que combinado se denomina purín. El purín contiene aminoácidos, lípidos, proteínas, hidratos de carbono, úrea y compuestos azufrados, así como un elevado contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio y micronutrientes como hierro, cobre, magnesio y

zinc (INTA, 2012, p. 239). SAC (2002) menciona que el valor fertilizante del estiércol de cerdo depende en gran medida del alimento suministrado a estos (p.25).

En la Tabla 1.2, se muestran las concentraciones medias de los purines de cerdos. La tasa de producción diaria y concentración del purín depende de factores como la edad y madurez fisiológica del cerdo, número de animales en la granja, cantidad y composición del alimento, volumen de agua consumida por el animal, clima y el sistema de manejo de cada granja.

Tabla 1. 2 Concentración media de purines de cerdo

Parámetro	Concentración
Materia seca %	5-7 %
Demanda biológica de oxígeno (DBO ₅)	15 000 - 25 000 (mg/L)
Demanda química de oxígeno (DQO ₅)	35 000 - 60 000 (mg/L)
Nitrógeno amoniacal	3 000 - 5 000 (mg/L)
Sodio	1 000 - 2 000 (mg/L)
Fósforo	1 000 - 3 000 (mg/L)
Potasio	1 000 - 3 000 (mg/L)
Cobre	20 - 40 (mg/L)
Zinc	20 - 40 (mg/L)
Hierro	50 - 150 (mg/L)

(INTA, 2012, p.239)

1.2 FERMENTACIÓN ANAEROBIA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS

La tecnología de digestión anaerobia es empleada en el tratamiento de aguas residuales para la remoción de la materia orgánica soluble (Díaz, Estipia, y Molina, 2002, p.15), y como medio alternativo para el tratamiento de estiércol, residuos orgánicos de los hogares, zonas urbanas e industriales (Ford, 2007, p. 21).

Díaz, Estipia, y Molina (2002) definen a la digestión anaerobia, como el proceso mediante el cual, en ausencia de oxígeno, los microorganismos utilizan la materia orgánica como fuente de energía y carbono, para generar nueva biomasa (biol) además de productos de oxidación como metano y dióxido de carbono (p. 41).

La materia orgánica es catabolizada mediante las bacterias anaerobias estrictas o facultativas, a través de reacciones de óxido-reducción, bajo condiciones de oscuridad y en ausencia de oxígeno, para obtener compuestos orgánicos solubles. El producto generado en el proceso fermentativo acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica (Gerardi, 2003, p. 43).

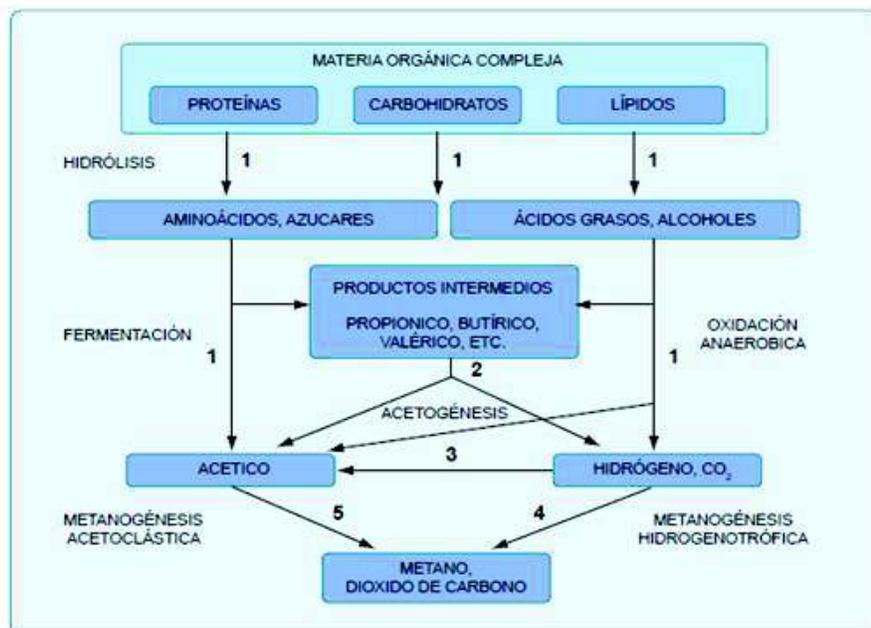
Según Gerardi (2003), la respiración anaeróbica es un proceso biológico, que consiste en la óxido-reducción de monosacáridos y otros compuestos. La respiración requiere de aceptores de electrones externos para la disposición de los electrones liberados durante la degradación de la materia orgánica. En este caso los aceptores de electrones pueden ser compuestos orgánicos como: CO_2 , SO_4^{2-} o NO_3^- . Cuando el CO_2 acepta los electrones liberados por la materia orgánica, se reduce a gas metano (CH_4). La producción de CH_4 mediante esta vía se conoce como metanogénesis hidrogenotrófica y es responsable de un tercio de la producción total de metano. Ciertos microorganismos anaeróbicos también utilizan el CO_2 como aceptor de electrones y reducen el hidrógeno a ácido acético (p. 31).

La presencia de sulfato en un ambiente anaeróbico desvía parte de la materia orgánica hacia la reducción de sulfato mediante un grupo especializado de bacterias anaeróbicas conocido como bacterias reductoras de sulfato. La liberación de sulfuro de hidrógeno, gas de olor penetrante, es característico en ambientes anaeróbicos en los cuales el sulfato actúa como aceptor de electrones (Cervantes, Pavlostathis y Van Handel, 2006, p. 23; Gerardi, 2003, p. 31).

1.2.1 FASES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia se caracteriza por las diversas reacciones bioquímicas realizadas por microorganismos para degradar el material orgánico, se divide en cuatro etapas: Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Seadi, Rutz, Prassl, Köttner, Finsterwalder, Volk y Janssen, 2008, p.21) como se muestra en la Figura 1.1. Cada etapa presenta diferentes velocidades de reacción, según la composición del sustrato y el desarrollo estable del proceso anaerobio (IDAE, 2007, p.9).

La eficiencia del proceso de digestión anaerobia depende de la degradación del material orgánico en cada etapa, puesto que, actúan en secuencia grupos diferentes de bacterias en cada fase, es decir, que el producto metabólico de un grupo sirve de sustrato a otro (Díaz, Estipia, y Molina, 2002, p. 43).



Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 1. 1 Esquema gráfico de la digestión anaerobia
(FAO, 2011, p. 20)

Durante la hidrólisis, las bacterias fermentativas excretan enzimas hidrolíticas, para la conversión de los biopolímeros en compuestos más simples y solubles, es decir que las proteínas, carbohidratos y lípidos se convierten en aminoácidos, azúcares y ácidos grasos, cabe mencionar que, la tasa de conversión de lípidos es muy lenta a una temperatura menor de 18 °C.

Estos productos son fermentados en la etapa de acidogénesis que resultan en la producción de ácidos grasos (ácido acético, fórmico, propiónico, butírico), alcoholes y compuestos minerales (dióxido de carbono, gas hidrógeno, amoníaco y sulfuro de hidrógeno). En la etapa de acetogénesis, las bacterias acetogénicas consumen los ácidos grasos volátiles de bajo peso molecular formados en la etapa anterior que se convierten en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.

Finalmente, la producción de metano y dióxido de carbono se produce por acción de las bacterias metanogénicas. El 70% de metano se forma por la descarboxilación de acetato por medio de bacterias del género *Methanobacterium*, mientras que el 30% restante se forma por la reducción del dióxido de carbono mediante la catalización de hidrógeno.

La etapa de la metanogénesis es crítica, ya que las reacciones químicas suceden más lentamente, además, está directamente influenciada por las condiciones de operación, composición de la materia prima, velocidad de alimentación, temperatura, pH y oxígeno, siendo estos factores determinantes para la producción de metano (Cervantes, Pavlostathis y Van Handel, 2006, p. 69; Díaz, Estipia y Molina, 2002, p. 40; Gerardi, 2003, pp. 51-57). La Figura 1.2 detalla las diferentes reacciones químicas llevadas a cabo durante la digestión anaerobia.

Tipo de Reacción	Ecuación
Fermentación de glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}_2$
Fermentación de la glucosa a butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{H}_2$
Fermentación del butirato a acetato e H_2	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Fermentación del propionato a acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Acetogénesis a partir del H_2 y CO_2	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del CO_2 y H_2	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

Figura 1. 2 Reacciones químicas durante la digestión anaerobia
(Díaz, Estipia, y Molina, 2002, p. 45)

1.2.2 BIOL

El residuo producto de la degradación de la materia orgánica en el proceso de la digestión anaerobia es conocido como digestato (Schnürer y Jarvis, 2010, p. 95), el cual puede ser utilizado como fertilizante, debido que solo una parte del carbono disponible en la materia orgánica se degrada, haciéndolo más fácil de absorber, mientras que el resto de nutrientes se conservan (FNR, 2010, p. 206).

Por lo tanto, debido a su alto contenido orgánico este puede ser utilizado en el riego en huertos de hortalizas o en cultivos hidropónicos (FAO, 2011, p. 73), en la recuperación de suelos, así como, en estanques piscícolas donde estimula el crecimiento de algas que sirven de alimento a los peces (UPME, 2003, p. 31).

El digestato contiene una porción líquida denominado biol, y otra sólida. El biol generalmente contiene mayor concentración de nutrientes que la fracción sólida y puede ser utilizado como un fertilizante orgánico foliar (UPME, 2003, p. 31).

La calidad y el contenido nutricional del digestato dependen esencialmente de los materiales utilizados para la digestión anaeróbica así como del proceso de digestión mismo, esto es temperatura, tiempo de retención, etc. (Schnürer y Jarvis, 2010, p. 95).

Cervantes, Pavlostathis, y Van Haandel (2006) añaden que existe una mayor concentración de nutrientes (macro, N, P y K, y micro) en aguas residuales de origen animal que en aguas residuales de origen vegetal, por ello, la combinación de estos residuos influye en la calidad del digestato (p. 75).

La Tabla 1.3 detalla la composición físico química de un digestato, producto de la digestión anaerobia de estiércol porcino.

Tabla 1. 3 Composición físico químico de un digestato porcino

Parámetro	Concentración	Parámetro	Concentración	Parámetro	Concentración
Sólidos totales	1,40 %	Nitrógeno total	0,26 - 0,30 %	Fósforo total	400 ppm
Sólidos volátiles	0,75 %	Relación C/N	5,3 - 3,33 %	Potasio total	100 ppm
pH	6,70 - 7,90 %	Nitrógeno amoniacal	200 - 400 ppm	Potasio disponible	290 ppm
Carbono orgánico	0,40 - 0,09 %	Fósforo disponible	48 ppm	Calcio soluble	0,21%
Magnesio Soluble	0,14%	Zinc	0,05 ppm	Cobre	0,017 ppm
Azufre	0,33 ppm	Manganeso	0,005 ppm	Boro	0,005 ppm

(MAG, 2010, p. 39)

1.2.3 BIOGÁS

El biogás es la mezcla gaseosa compuesta principalmente de metano y dióxido de carbono además de trazas de otros gases (nitrógeno, monóxido de carbono, ácido sulfhídrico, e hidrógeno) producto de la digestión anaerobia de material orgánico. Su composición depende de la materia orgánica a tratar y de las condiciones del proceso.

En la Tabla 1.4 se muestra la composición promedio del biogás. El poder calorífico del biogás está entre 5 500 kcal/Nm³ (6,4 kWh/Nm³) (IDAE, 2007, p. 9).

Si este posee en su composición una concentración de metano mayor al 45 % es inflamable (FAO, 2011, p. 16).

Tabla 1. 4 Composición del biogás

Componente	Porcentaje (%)
Metano (CH ₄)	50-70
Anhídrido Carbónico (CO ₂)	30-40
Hidrógeno (H ₂), Ácido sulfhídrico (H ₂ S) y otros gases	≤ 5

(IDAE, 2007, p. 7)

1.2.4 FACTORES DETERMINANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Existen diversos factores que determinan una mayor o menor producción de biogás; entre los principales están la materia prima, temperatura, pH, relación C/N y microorganismos involucrados en el proceso de fermentación.

Materia prima

Seadi et al (2008) mencionan que para la producción de biogás se pueden utilizar diferentes tipos de sustratos como materia prima, estos pueden ser de origen animal, vegetal, forestal, agroindustrial, entre otros (p. 17). Los residuos más comunes son:

- Excretas y purines de animales
- Residuos y subproductos agrícolas (rastros, malezas, etc)
- Cultivos energéticos (maíz, caña)
- Residuos agroindustriales (origen animal y vegetal)
- Desechos municipales
- Aguas residuales de mataderos

Nutrientes

Los microorganismos tienen necesidades específicas de macronutrientes, micronutrientes y vitaminas de acuerdo a su especie. La concentración y disponibilidad de estos elementos afecta la tasa de crecimiento y la actividad de las poblaciones microbianas. Por lo tanto, la cantidad y calidad del biogás depende directamente del suministro óptimo de nutrientes (proteínas, grasas y carbohidratos) a los microorganismos, puesto que las metanobacterias se inhiben ante la falta de nutrientes (FNR, 2010, p. 28).

Relación Carbono/Nitrógeno

Las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas son el carbono y el nitrógeno. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células (Schnürer y Jarvis, 2010, p.47). Las bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima está en un rango de 30 - 20:1 (FAO, 2011, p. 35).

Abbasi, Tauseef, y Abbasi (2012) señalan que, cuando la relación C/N es alta, el nitrógeno es consumido rápidamente por las bacterias metanogénicas hasta agotarse, resultando en la inhibición de la producción de biogás. En cambio, una relación C/N baja, la actividad bacteriana se inhibe, debido a que, el nitrógeno es liberado y se acumula en forma de amonio, lo que resulta en el aumento del pH (nivel superiores de 8.5) ejerciendo un efecto tóxico sobre las bacterias metanogénicas (p. 5). La Tabla 1.5 muestra la relación C/N de algunas materias primas.

Tabla 1. 5 Relación C/N de sustratos para la digestión anaerobia

Sustrato		Relación C/N
Residuo de animales	Estiércol bovino	20-35:1
	Estiércol porcino	10-20:1
Residuos sólidos municipales	Fracción orgánica	9-12:1
Residuos de comida	Frutas	35-50:1
Residuo vegetal	Residuos de restaurantes	14-38:1
	Paja de maíz	60-120:1
	Ensilaje de maíz	10:01

(Forster, Isaac, R., Pérez, M. y Schvartzi, C., 2012, p. 34).

Temperatura

El proceso de digestión anaerobia es fuertemente dependiente de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, depende de la temperatura. Conforme aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás (Cervantes, Pavlostathis, y Van Haandel, 2006, p. 24).

Los microorganismos que participan en el proceso de digestión se desarrollan a diferentes temperaturas. Gerardi (2003) señala que según el rango de temperatura estos microorganismos se dividen en psicrófilos, mesófilos y termófilos (p.90). Si la temperatura está por encima o por debajo de su rango óptimo, el crecimiento de los microorganismos puede inhibirse (FNR, 2010, p. 23).

En la Tabla 1.6 se presenta la clasificación de los microorganismos según su temperatura de trabajo.

Tabla 1. 6 Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaerobia

Grupo de bacterias	Mínimo (°C)	Óptimo (°C)	Máximo (°C)	Tiempo de fermentación (días)
Psicrofílicos	04-10	15-18	20-25	sobre 100
Mesofílicos	15-20	25-35	35-45	30-60
Termofílicos	25-45	50-60	75-80	10-15

(FAO, 2011, p.38)

Los microorganismos psicrofílicos trabajan a temperaturas debajo de los 25 °C, con un bajo desempeño de degradación y de producción de biogás (FNR, 2010, p. 25), mientras que las bacterias formadoras de metano tienen su crecimiento óptimo a temperaturas mesofílicas, con un rendimiento alto de producción de gas debido a la buena estabilidad del proceso.

Según Gerardi (2003) las plantas de biogás operan en el rango mesofílico con una temperatura óptima de 35 °C (p.89). En tanto que la producción de metano en el rango termófilo se realiza generalmente en plantas de tratamiento de aguas residuales que son capaces de calentar las aguas (Abbasi, Tauseef, y Abbasi, 2012, p.7).

pH

El valor del pH influye en el crecimiento de microorganismos metanogénicos y afecta a la disociación de algunos compuestos de importancia para el proceso de digestión anaerobia (amoníaco, sulfuro, ácidos orgánicos) (Seadi, T. et al., 2008, p. 26). Cervantes, Pavlostathis y Van Haandel (2006) mencionan que el pH óptimo para la digestión mesofílica es el neutral, valores inferiores a 6,3 o superiores a 7,8 inhiben gravemente la producción de metanogénica (p.77).

Gerardi (2003) señala que inicialmente el pH dentro de un biodigestor anaerobio disminuirá, debido a la producción de ácidos volátiles, sin embargo, como las

bacterias formadoras de metano consumen estos compuestos y los convierten en metano y dióxido de carbono (CO₂), el pH del digestor incrementará y se estabilizará (p.99). Una excesiva acumulación de amonio a causa de la degradación del nitrógeno incrementa el pH e inhibe el proceso de digestión (Abbasi, Tauseef y Abbasi, 2012, p.7).

Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

La materia orgánica se constituye de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). Un alto contenido de sólidos puede limitar la movilidad de las bacterias afectando directamente la producción y eficiencia de biogás (FAO, 2011, p. 36).

Diaz, Estipia y Molina (2002) añaden que los sólidos totales contienen sólidos fijos y sólidos volátiles. Los sólidos fijos representan la fracción de sólidos que permanecen tras el secado de una muestra a 105 °C (p.104). Mientras, los sólidos volátiles (SV) de una muestra, es la fracción que se volatilizó tras una incineración a 600 °C. Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano (FAO, 2011, p. 36). En la Tabla 1.7 se muestra la concentración de sólidos totales de distintas materias primas.

Tabla 1. 7 Contenido promedio de sólidos totales en diversos residuos

Materias Primas	% Sólidos Totales (ST)
Bovinos	13,40 -56,20
Porcinos	15-49
Aves	26-92
Rastrojo de maíz	77
Paja de trigo	88-90
Hortalizas	10-15
Tubérculos	10-20
Aserrín	74-80

(FAO, 2011, p.36)

Tóxicos e inhibidores de la metanogénesis

La producción de gas en una planta puede verse afectada por varias razones, una de ellas, es la presencia de sustancias conocidas como inhibidores que pueden hacer más lento el proceso de degradación y que en concentraciones tóxicas detienen el proceso. Existen inhibidores que ingresan al digestor a través de la adición de sustrato, y aquellos que se forman como productos intermedios a partir de las etapas individuales de descomposición (sulfuro, amoniaco y ácidos grasos) (FNR, 2010, p. 28).

La presencia de pequeñas concentraciones de metales pesados (cobre, níquel, cobalto, cromo, zinc y plomo), así como minerales (sodio, potasio, calcio, magnesio, amonio, y azufre) estimulan el crecimiento bacteriano, pero en concentraciones elevadas tienen un efecto tóxico. Igualmente la presencia de detergentes (jabón, antibióticos, y disolventes orgánicos) inhiben el crecimiento normal de las bacterias en el digestor (Abbasi, Tauseef, y Abbasi, 2012, p.24). En la Tabla 1.8 se muestran los inhibidores y sus concentraciones perjudiciales.

Tabla 1. 8 Inhibidores en el proceso de digestión anaerobia y sus concentraciones perjudiciales

Inhibidor	Concentración Inhibitoria (mg/L)
Oxígeno	> 0,1
Sulfuro de hidrógeno	> 50
Ácidos grasos volátiles	> 2 000
Nitrógeno de amoniaco	> 3 500
Metales pesados	Cu > 50 Zn >150 Cr >100
Desinfectantes, Antibióticos	No especificado

(FNR, 2010, p. 28).

Agitación

La agitación permite mantener la homogeneidad de un fluido, por lo tanto, la estabilidad del proceso, dentro de un digestor. Específicamente, la agitación busca mezclar el material entrante con las bacterias metanogénicas, para detener la formación de espuma y evitar gradientes de temperatura pronunciados dentro del digestor (Abbasi, Tauseef, y Abbasi, 2012, p. 9), además de evitar la acumulación de sedimentos que provocan la formación de espacios muertos, es decir, sin actividad microbiana (FAO, 2011, p. 50).

El grado de agitación requerida depende del contenido de la mezcla de digestión, una agitación muy rápida puede interrumpir la actividad de las bacterias, mientras que una agitación demasiado lenta provoca una mezcla inadecuada del sustrato con las bacterias (Abbasi, Tauseef y Abbasi, 2012, p.9).

Usos del biogás

El principal uso del biogás es el aprovechamiento energético por el alto poder calorífico (5 500 kcal/ Nm³). Ford (2007) menciona que 1 m³ tiene una energía equivalente a 0,68 L de gasolina, suficiente para producir 1,5 kw/h de energía o 3 kw/h de calor (p. 3). En la Tabla 1.9 se presenta el poder calorífico de diferentes combustibles.

Tabla 1. 9 Poder calorífico de diferentes combustibles

Poder calorífico	Equivalencia
Biogás	5 000 kcal/m ³
Diésel	10 700 kcal/kg
Gas licuado	10 800 kcal/kg
Gas natural	8 600 kcal/m ³
Kerosene	10 300 kcal/kg

(Abbasi, Tauseef y Abbasi, 2012, p. 2)

Según IDAE (2007), entre las principales aplicaciones del biogás, como generación de energía está (p. 8):

- Producción de calor e iluminación (lámparas infrarrojas, calderas)
- Aplicación en quemadores (cocción de alimentos)
- Producción de electricidad (refrigeradoras)
- Como combustible para vehículos

1.3 BIODIGESTORES ANAEROBIOS

Un biodigestor, es un tanque donde se procesa la materia orgánica para producir biogás. Los biodigestores pueden variar en formas y tamaños, en función de las necesidades del productor y la disponibilidad del material orgánico (Ford, 2007, p.13).

1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE UN BIODIGESTOR

De acuerdo con FAO (2011) un biodigestor en general posee los siguientes componentes (p. 79).

- Tanque de mezcla: La materia prima (estiércol) se mezcla con agua hasta obtener un material homogéneo.
- El tubo de entrada: Tubería por donde ingresa el sustrato al digestor.
- Digestor: La suspensión se fermenta en el interior del digestor y se produce biogás través de la acción bacteriana.
- Gasómetro o domo: Lugar de almacenamiento del biogás
- La tubería de salida: La suspensión digerida se descarga en el tanque de salida a través de una tubería.
- Gasoducto: El gasoducto transporta el gas hasta el punto de utilización, tales como una estufa o una lámpara.

1.3.2 TIPOS DE BIODIGESTORES

Los biodigestores pueden clasificarse según la carga de la materia orgánica en sistema discontinuo, sistema continuo y sistema de dos etapas.

Sistema discontinuo (tipo batch)

Este sistema se caracteriza porque la carga inicial (materia prima) se introduce en el digestor, luego de su degradación por un prolongado tiempo, el efluente se descarga por completo, como se muestra en la Figura 1.3. El digestor se alimenta con una nueva porción y el proceso se repite (Seadi, et. al., 2008, p.75). Este tipo de biodigestores son utilizados para la digestión de materiales celulósicos. Su utilización no está muy difundida (Samayoa, Bueso y Víquez, 2012, p. 21).

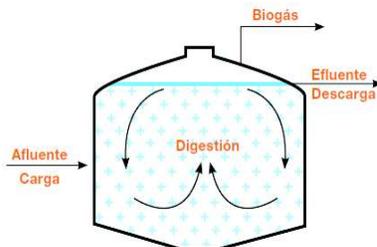


Figura 1.3 Sistema de digestión tipo batch
(IDAE, 2007, p.29)

Sistema continuo

En este sistema el afluente (materia orgánica) ingresa periódicamente al digestor, y ya sea mecánicamente o por presión en material digerido es empujado (Seadi, et. al., 2008, p. 75). Los tiempos de retención son menores a los del sistema discontinuo (UPME, 2003, p.20). La figura 1.4 muestra el funcionamiento del sistema continuo.

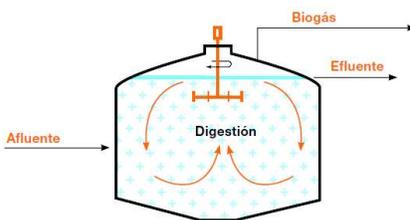


Figura 1. 4 Sistema de digestión continuo
(IDAE, 2007, p. 29)

Samayoa, Bueso y Víquez (2012) mencionan que existen muchos diseños y formas de biodigestores según su estructura, de los cuales mayormente se emplean los siguientes tipos: de estructura sólida fija (construido bajo tierra con ladrillo o bloque), estructura sólida móvil (posee dos estructuras, una enterrada y construida con ladrillo o bloque y otra estructura metálica o plástica sobre la primera) y de balón de plástico (construido con plástico o caucho) (p. 21).

La Tabla 1.10 detalla los biodigestores más difundidos y que históricamente se han aplicado a pequeña y mediana escala (Samayoa, Bueso y Víquez, 2012, p. 16). Los cuales se emplearían para el tratamiento de excretas porcinas en granjas familiares, comerciales e industriales (MAGAP, 2 010, p. 5).

Tabla 1. 10 Diferencias y semejanzas entre los modelos de biodigestores más conocidos

Características	Tipos de biodigestores		
	Tubular	Cúpula fija	Cúpula flotante
Vida útil	10 -15 años	> 20 años	> 15 años
Presión del biogás	variable y baja	variable	Constante
Fuga de biogás	no es común	común	no es común
Tamaño del biodigestor	4 - 100 m ³	5 m ³	5-15 m ³
Materiales de construcción	plástico PVC (polietileno)	cemento, ladrillo o bloque y varilla	cemento, ladrillo o bloque, acero
Mantenimiento del sistema	Bajo	bajo	Alto
Ubicación del digestor y requerimiento de espacio	semi-enterrado	bajo tierra totalmente	bajo tierra
Generación de empleos locales	Si	si	si

(Samayoa, Bueso y Víquez, 2 012, p. 21)

Sistema de dos etapas

En el primer digester a fin de favorecer el proceso de hidrólisis se manejan prolongados tiempos de retención, continuamente existe otro digester en donde se digieren las sustancias producidas en la anterior etapa, durante un tiempo de retención menor, como se muestra en la Figura 1.5. Este sistema ha sido aplicado con éxito para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis, por ejemplo, frutas, verduras, etc (IDAE, 2007, p.29).

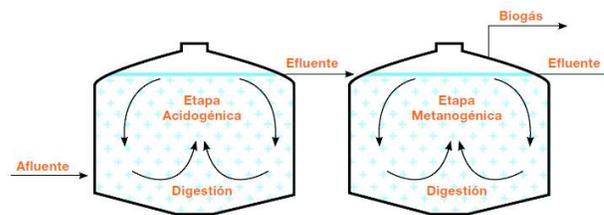


Figura 1. 5 Sistema de digestión de dos etapas
(IDAE, 2007, p. 29)

1.3.3 PLANTA DE BIOGAS

La Figura 1.6 muestra la distribución de una planta de biogás. Seadi, et al (2008) menciona que en una planta de biogás se llevan a cabo diferentes procesos como (p.62):

- Recolección, acondicionamiento, transporte y almacenamiento del material orgánico a tratarse.
- Introducción del material orgánico al digester para el proceso de degradación.
- Producción, conducción y almacenamiento del biogás para su posterior utilización.
- Conducción, acondicionamiento y almacenamiento del digestato para su aprovechamiento como fertilizante.

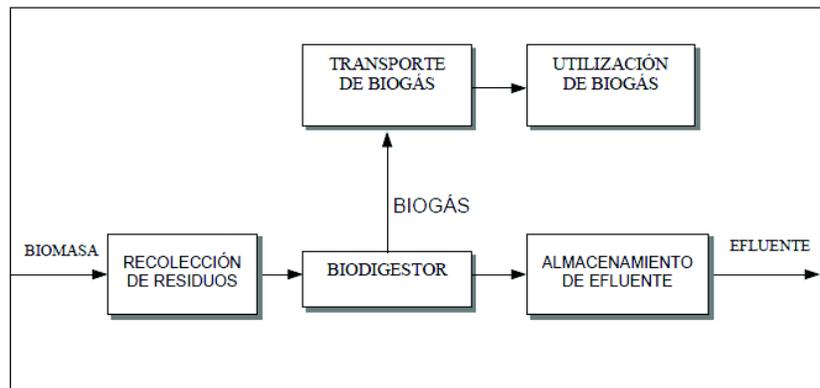


Figura 1. 6 Componentes de un sistema de biogás
(UPME, 2003, p. 13)

Conducción del biogás

El sistema de conducción del biogás consiste en transportar el biogás desde el digestor hasta su lugar de uso. Esto incluye: tubería, bomba de gas o turbina, medidor de gas, regulador de presión y evacuadores del condensado. La Figura 1.7 representa una línea de conducción para una instalación típica, sus dimensiones dependen del flujo de gas a transportar y de la distancia existente entre la planta y el lugar de uso final (variable que sirven para determinar el diámetro de tubería).

Generalmente, las plantas de biogás utilizan manguera o tubería de polietileno (PVC) como líneas de conducción del gas, puesto que, son materiales resistentes a la corrosión. Estas líneas deben distribuirse de manera elevada o bien permanecer recubiertas o enterradas, para evitar su deterioro o posible rompimiento (UPMA, 2003, p.25).

Accesorios en la línea de conducción de biogás

UPMA (2003) menciona que una línea de conducción de biogás consta de los siguientes accesorios (p.26), detallados en la Figura 1.7.

- **Válvulas** (acero inoxidable, polietileno o PVC): se requiere dos válvulas para gas, la principal irá instalada al comienzo de la conducción y sobre el niple de salida. La segunda al final de la línea, en el lugar de uso.
- **Trampas de ácido sulfhídrico:** Representa un recipiente hermético para evitar fugas de gas, relleno con material de hierro (viruta de hierro o esponjas metálicas) a través del cual debe circular el gas, para que el ácido sulfhídrico reaccione con el metal y se deposite en el lecho.
- **Trampas de llama:** La trampa de ácido sulfhídrico actúa también como trampa de llama.
- **Trampas de agua:** Las trampas están provistas de un grifo de purga para evacuar el agua.

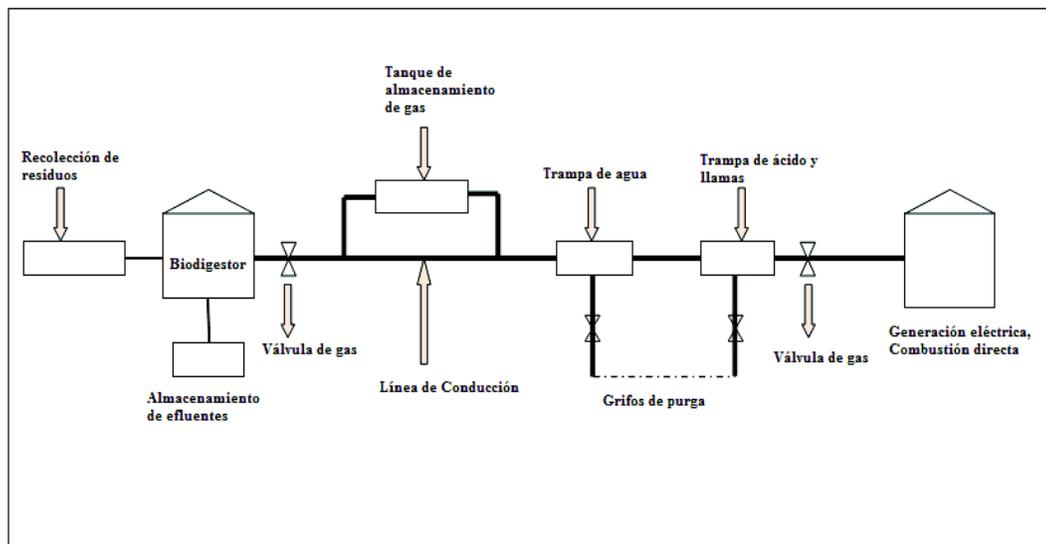


Figura 1. 7 Esquema de la línea de conducción de biogás
(UPME, 2003, p.26)

1.3.4 PARÁMETROS OPERACIONALES DEL DIGESTOR

Carga orgánica

La carga orgánica es un parámetro operacional importante, ya que muestra la cantidad de materia orgánica seca o kg de sólidos volátiles (SV) con la que se va a alimentar al digestor, por volumen y unidad de tiempo (Seadi, et. al., 2008, p. 28). La tasa de carga orgánica se expresa como $\text{kg SV} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$.

Dilución

Si es necesario se debe añadir agua a la materia prima para generar una suspensión homogénea. Ya que partículas demasiado grandes provocan la sedimentación del material dificultando la agitación, y por ende, puede impedir la salida del flujo de gas a la parte superior del digestor. Diferentes sistemas pueden manejar diferentes niveles de densidad de la suspensión, por lo general en el intervalo de 10-25 % de sólidos (Abbasi, Tauseef, y Abbasi, 2012, p.6).

Tiempo de retención hidráulico (TRH)

El TRH es un parámetro importante para dimensionar el digestor de biogás. El TRH es el intervalo de tiempo que el sustrato permanece en el interior del digestor sometido a la acción bacteriana (Gerardi, 2003, p. 87). Según Abbasi, Tauseef, y Abbasi (2012) el TRH se relaciona con el volumen del digestor y el volumen de sustrato alimentado por unidad de tiempo (p. 36), como indica la Ecuación 1.1.

$$TRH = \frac{VR}{C} \quad [1.1]$$

Donde:

THR: tiempo de retención hidráulica [día]

VR: Volumen reactor [m^3]

C: Carga de alimentación al reactor por unidad de tiempo [$\text{m}^3 / \text{día}$]

De acuerdo con la Ecuación 1.1, el aumento de la carga orgánica reduce el TRH. Sin embargo, el tiempo de retención debe ser suficientemente largo para asegurar

que la cantidad de microorganismos patógenos sean eliminados con el efluente (digestato) (Seadi, et. al., 2008, p. 28). La tasa de duplicación de las metanobacterias suele ser > 12 días (Gerardi, 2003, p. 88).

1.3.5 BENEFICIOS AMBIENTALES DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Ford (2007) señala que, entre los principales beneficios ambientales de la digestión anaerobia (DA) están (p. 13):

- La tecnología de la digestión anaerobia permite la recuperación de nutrientes (fertilizante) y energía (metano)
- La DA es una estrategia utilizada en el tratamiento de residuos de origen animal a fin de cumplir con las regulaciones ambientales exigidas por la ley.
- Los residuos (efluente) líquidos y sólidos producto de la digestión anaerobia, se pueden aplicar a los cultivos o sirve como materia prima para la obtención de otros combustibles alternativos como el biodiesel o etanol.
- La DA mitiga una serie de problemas ambientales, por ejemplo el grado de olores indeseables en granjas ganaderas, debido a las emisiones de sólidos y ácidos grasos volátiles contenidas en las excretas.
- La DA también es utilizada en los botaderos municipales para controlar los malos olores producto de la degradación de la materia orgánica.
- DA se utiliza cada vez más para el tratamiento de lodos de depuradora y aguas residuales industriales. Estos abarcan una gran variedad de sectores industriales, incluyendo bebidas, productos químicos, alimentos, carne, leche, pulpa y papel, y productos farmacéuticos.
- El combustible renovable (biogás) que genera es de alta calidad, y ha sido utilizado con éxito.
- Destruye patógenos.

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1 OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar la generación de biogás a partir de excretas porcinas en la granja AGROINPORC y diseñar un biodigestor.

Objetivos Específicos

- Determinar la producción de biogás a escala de laboratorio a 35 °C.
- Determinar la producción de biogás a escala de laboratorio bajo condiciones ambientales dentro de un invernadero.
- Diseñar un biodigestor para la granja AGROINPORC.
- Analizar la relación costo beneficio de la producción de biogás.

2.2 MATERIALES

Se emplearon excretas porcinas generadas en la granja AGROINPORC, situada en la ciudad de Cayambe, provincia de Pichincha. La cual se dedica a la producción porcina de ciclo completo, es decir, a las actividades de cría y ceba (engorde de cerdos) bajo el sistema de confinamiento dentro de galpones.

El sistema de cría comprende el manejo de hembras de reemplazo, gestantes, en periodo de lactancia y vacías, además del reproductor y lechones lactantes. El sistema de ceba maneja lechones machos y hembras para su engorde, dividiéndolos en dos etapas: levante (lechones de 22 - 25 hasta los 40 kg) y ceba (de 40 hasta 90-100 kg). La distribución de la granja porcina se muestra en el Anexo II.

2.3 DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

2.3.1 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE EXCRETAS GENERADAS EN LA GRANJA

Para determinar la cantidad promedio de excretas producidas diariamente en la granja, se recolectaron las excretas en un balde de 20 L, con ayuda de una pala posteriormente se pesaron en la balanza analógica de gancho (TORREY, modelo CRS, EEUU, 500 kg, 0,2 kg). Este pesaje se efectuó en cada sala y corral, una vez al día durante 5 días.

2.3.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO - QUÍMICO DE EXCRETAS

Se recogieron y mezclaron las excretas de los corrales hasta obtener un material homogéneo, del cual se tomó una muestra de 1 kg de estiércol y se depositó en una bolsa plástica hermética para su posterior análisis en el laboratorio. La caracterización física y química se realizó en el laboratorio de suelos y agua de la Universidad Politécnica Salesiana Campus Cayambe.

En la Tabla 2.1 se presentan los análisis físico-químicos realizados en muestras de excretas. Los métodos se describen en el Anexo III.

Tabla 2. 1. Análisis físico-químicos realizados en muestras de estiércol

Análisis	Método
pH	APHA 4500 B
Sólidos totales	GRAVIMÉTRICO
Sólidos volátiles	GRAVIMÉTRICO
Materia orgánica	WALKLEY BLACK
Nitrógeno total	WALKLEY BLACK

La relación carbono nitrógeno (C/N) se obtuvo a partir de la división entre el % de carbono y el nitrógeno. Dados los resultados experimentales de porcentaje de materia orgánica y nitrógeno, mediante la Ecuación 2.1 referida por Feican (2 011) se obtuvo el porcentaje de carbono.

$$\%Materia\ orgánica = \% carbono \times 1,724 \quad [2.1]$$

2.3.3 DESCRIPCIÓN DEL BIODIGESTOR

Como reactor se utilizó un recipiente plástico de 6 L de capacidad, acoplado en su tapa, una bolsa plástica recolectora de 2 000 mL donde se almacenó el biogás, como se muestra en la Figura 2.1. Para esta experimentación se ocupó el 75 % del volumen del reactor sugerido por Ocaña (2011), como volumen total de mezcla agua-estiércol.

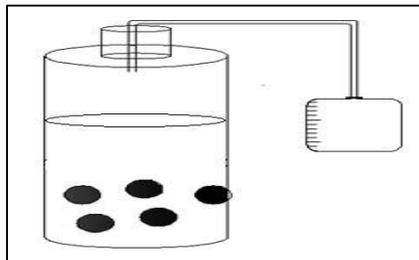


Figura 2. 1 Esquema para recolección y almacenamiento de biogás

La producción diaria de biogás fue medida por el método de desplazamiento líquido (Díaz, Estipia y Molina, 2002, p.110; Magaña, Torres, Martínez, Sandoval y Hernández, 2006, p. 31), como se muestra en la Figura 2.1. Para lo cual, se utilizó una probeta de 1 000 mL conectada mediante una manguera al reactor. Previamente la probeta se llenó con agua y fue colocada dentro de una tina plástica rectangular (25 x 35 cm).

El volumen de biogás producido en el reactor desplazó un volumen igual de líquido en la probeta, por lo tanto, el volumen del líquido desplazado fue equivalente al volumen de biogás generado en el sistema.

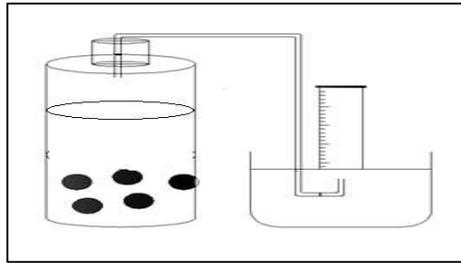


Figura 2. 2 Esquema del método de desplazamiento de líquido

2.3.4 PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Para la recolección de las excretas, se destinó un espacio dentro de las mismas instalaciones de la granja, el cual estaba limpio, seco y libre de contaminantes físicos y químicos. La recolección de excretas de todos los corrales se efectuó en horas de la mañana (7 am), para su posterior acopio y con el uso de una pala se procedió a homogeneizar el material.

Determinación de la concentración de dilución

Con respecto a la concentración de sólidos totales el porcentaje óptimo es de 8 a 12 % (FAO, 2011, p. 37), por ello, el material orgánico se diluyó con agua. En la experimentación se optó por una concentración de sólidos totales del 10 %. Para el cálculo del volumen de agua (necesario para obtener la concentración deseada de sólidos), se utilizó la Ecuación de dilución 2.2 referida por Rosenberg, Epstein y Krieger (2007).

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad [2.2]$$

Donde:

C_1 : concentración inicial de solidos totales (%)

C_2 : concentración final de solidos totales (%)

V_1 : volumen inicial (L)

V_2 : volumen final de mezcla (L)

La concentración inicial (C_1) se obtuvo a partir de los resultados de la caracterización de las excretas.

En una balanza digital (TIGER, 15 kg, 5 g), se pesó las excretas y el agua de acuerdo con la Ecuación 2.2. Posteriormente, se mezcló las excretas y agua en un balde de 10 L de capacidad. La mezcla fue fraccionada manualmente y homogenizada usando una batidora durante cinco minutos.

2.3.5 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA GENERACIÓN DE BIOGÁS

Para el estudio del efecto de la temperatura en la generación de biogás, se trabajó con un diseño experimental de dos grupos; es decir con dos tratamientos, uno a 35 °C y el segundo a temperatura ambiente con dos repeticiones cada uno.

Para mantener la temperatura a 35 °C, el reactor fue introducido en una tina plástica de 75 L de capacidad que contenía 30 L de agua, calentada por una resistencia eléctrica. Mientras que para el segundo tratamiento, el reactor se mantuvo dentro de un invernadero y se midió la temperatura ambiental interna a las 06H00, 12H00 y 18H00 con un termómetro ambiental.

Los datos de la producción diaria de biogás de los dos tratamientos se evaluaron mediante la prueba estadística t student para muestras pareadas (Devore, 2008, pp. 336-341; Sáez, 2012, pp. 158-159) con la ayuda del software Excel 2010.

A los 10 y 30 días de fermentación se tomó una muestra de 2 000 ml biogás de cada tratamiento y se envió al laboratorio de análisis instrumental de la Escuela Politécnica Nacional para el análisis de cromatografía del biogás, según la norma ASTM D1945-03(2010).

2.3.6 PRUEBA FINAL A LAS MEJORES CONDICIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos de los tratamientos evaluados en 2.2.5, se prepararon dos reactores, de los cuales sus productos, tanto el biogás como el biol fueron caracterizados luego de 30 días de fermentación.

Poder calorífico

Para determinar el poder calorífico, se tomó una muestra de 2000 ml biogás de un reactor y se envió al laboratorio de análisis instrumental de la Escuela Politécnica Nacional para efectuar el análisis de cromatografía del biogás y poder calorífico según, la norma ASTM D1945-03(2010).

2.3.6.1 Prueba de inflamabilidad

Del segundo reactor, se recogió el biogás generado durante 30 días de fermentación y se realizó la prueba de inflamabilidad, para la cual, se encendió una fosforera y se la acerco a la válvula de salida de la bolsa, liberando el gas para observar la llama.

2.3.6.2 Caracterización del biol

Finalizado el proceso fermentativo, se tomó una muestra de 100 mL del biol y se envió al laboratorio de suelos y agua de la Universidad Politécnica Salesiana Campus Cayambe donde se analizaron los parámetros detallados en la Tabla 2.2. Los métodos se describen en el Anexo III.

Tabla 2. 2 Análisis químicos de muestra de biol

Análisis	Método
Nitrógeno	Em: NTT4+6
Fósforo	Espectrofotométrico MERCK
Potasio	Fotométrico de flama JENWAY

2.4 DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO

Para el diseño del biodigestor tubular se tomó en cuenta los resultados obtenidos experimentalmente, además del consumo del biogás necesario para el funcionamiento de cuatro lámparas a emplear en las salas de maternidad y cría de levante.

2.4.1 ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO DEL BIODIGESTOR

Requerimiento energético de biogás

Se calculó el requerimiento energético necesario para el funcionamiento de cuatro lámparas, instaladas en la sala de maternidad y cría de levante. Las cuales, operarán 8 horas (desde las 21h00 a 06h00) durante 21 días de periodo de lactancia. Seguidamente, las salas entran a un periodo de desinfección de 15 días, para el posterior ingreso de un nuevo lote de cerdas gestantes que permanecerán 10 días antes del parto. Según FAO (2011) una lámpara requiere 0,07 m³ biogás/h (p. 66).

Disponibilidad de materia orgánica

Se consideró únicamente las excretas generadas diariamente en la sala de cría (42,9 kg), debido a la implementación de un nuevo sistema de manejo (cama profunda) en cerdos destinados al engorde.

Tiempo de retención

El tiempo de retención (T_R) se refiere al tiempo promedio que el material orgánico permanece en el digestor, sometido a la acción de microorganismos (IDAE, 2007, P. 19). Para determinar el T_R según la Ecuación 2.3 referida por UPME (2003) se consideró, la temperatura promedio en la que va a operar el biodigestor (p.36) con base en los resultados experimentales.

$$T_R = (-51,227 \times \ln(T) + 206,72) \quad [2.3]$$

Donde:

T_R : Tiempo de retención (días)

T: Temperatura (°C)

Volumen de biodigestor

Para el cálculo del volumen del biodigestor se consideró la carga de alimentación, la dilución (1:6,38) y el tiempo de retención. De acuerdo con la Ecuación 2.4 (Abbasi, Tauseef, y Abbasi, 2012, p.36) y 2.5 (UPME, 2003, pp. 36,37).

$$V_D = C_i \times T_R \quad [2.4]$$

$$C_i = M_E + M_{H_2O} \quad [2.5]$$

Donde:

V_D : Volumen del digestor (m^3)

C_i : Carga de alimentación del biodigestor (kg/ día)

T_R : Tiempo de retención (días)

M_E : Masa de estiércol (kg/ día)

M_{H_2O} : Masa de agua agregada para disminuir la cantidad de sólidos al 10% (kg/día)

Además, se calculó el volumen del biogás mediante la Ecuación 2.6 (Martí, 2008, p.42), se consideró el potencial de producción de biogás, contenido de sólidos totales y sólidos volátiles, volumen del biodigestor y la carga de estiércol.

$$V_{biogás} = C_i \times \frac{\% ST}{VD} \times \% SV \times P_{biogás} \quad [2.6]$$

Dónde:

C_i : Carga de estiércol porcino (kg)

ST: Contenido de sólidos totales (%)

VD: volumen del digestor (m^3)

SV: Contenido de sólidos volátiles (%)

$P_{biogás}$: Potencial de biogás (m^3 biogás/kg estiércol)

Dimensionamiento de la fosa

Se consideró las dimensiones sugeridas por Avendaño (2010) para un diámetro de 1 m (p.23), una inclinación de la base de la zanja máxima de 5 ° y 45 ° en canales para la tubería de la entrada de la carga y la salida de efluentes (Martí, 2008,p.56).

Dimensionamiento del tanque de carga y tanque de efluentes

El tanque de carga o recolección, tiene como función recolectar el estiércol porcino y agua requerida (relación 1:3) por el biodigestor. Mantilla, Duque y Galeano (2007), sugieren un volumen para el tanque de carga y efluentes de tres veces mayor al volumen de la carga (mezcla), de acuerdo con la Ecuación 2.7, esto con el objetivo de contar con un volumen de almacenamiento suficiente en caso de daños del biodigestor (p.5).

$$V_{tc} = 3 \times V_m \quad [2.7]$$

Donde:

V_{tc} : Volumen del tanque de carga (m^3)

V_m : Volumen de mezcla (m^3)

2.4.2 LOCALIZACIÓN DEL BIODIGESTOR

FAO (2011) señala que el biodigestor tubular se debe instalar de acuerdo con las siguientes recomendaciones (p. 104):

- El biodigestor debe estar cerca del lugar donde se aprovechará el biogás generado. A distancias no mayores de 30 m.
- Debe estar cerca del lugar de recolección del material orgánico (estiércol, desechos vegetales, etc.)
- Debe estar ubicado a una distancia entre 10 y 15 m de cualquier fuente de agua.
- Debe contar con protección contra vientos y en lugar donde reciba la energía solar.

2.5 ANÁLISIS COSTO/ BENEFICIO

Para el análisis costo/beneficio se consideró el costo de la implementación de dos biodigestores tipo tubular que reemplazarán el gasto del gas comercial (GLP) por año para cuatro lámparas que funcionan en la sala de maternidad y cría. La relación de los beneficios obtenidos sobre los costos totales (B/C) determinará si el proyecto es rentable o no. Si se obtiene una relación $B/C > 1$ el proyecto será factible y se cubrirá la necesidad de granja porcina Agroinporc.

Para determinar los costos directos e indirectos, se emplearon proformas de los materiales necesarios para la construcción del biodigestor y para el costo de mano de obra se tomó como referencia el sueldo diario de un jornalero.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Para la determinación de la producción de biogás primero se determinó la cantidad total de excretas de cerdos generados en la granja, se tomó una muestra de estiércol para su caracterización, con base a los resultados de la caracterización se preparó y acondicionó las excretas previo su carga en los reactores, seguidamente se realizó la medición de la producción diaria de biogás a 35 °C y temperatura ambiente (t media de 26 °C).

3.1.1 CANTIDAD DE EXCRETAS GENERADAS EN LA GRANJA

La Tabla 3.1 muestra el resultado del pesaje de las excretas generadas en toda la granja durante 5 días. Se produjo un valor promedio de 175,1 kg de estiércol/día de un total de 163 cerdos, incluidos los lechones de la etapa de maternidad.

Tabla 3. 1 Producción diaria de excretas porcinas

Etapa	# Animales	Promedio peso vivo kg/animal	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	TOTAL (kg)	PROMEDIO Total excretas kg /Día	PROMEDIO Total excretas kg/Día/Animal
			Peso (Kg)							
Cria	*Maternidad	190	23	25	24	25	25	122 ± 0,89	24,4	6,1
	Gestación	180	17	16	16,5	16	16	81,5 ± 0,45	16,3	2,04
Ceba	Reproductor	150	2	2	2,5	2	2,5	11 ± 0,27	2,2	2,2
	Levante	30	38	37	37,5	38	37,5	188 ± 0,42	37,6	0,54
	Engorde	80	95	94	94	95	95	473 ± 0,55	94,6	2,37
TOTAL PROMEDIO (kg)								175,1		

*Maternidad: en cada jaula se encuentra la madre y 10 lechones, por lo tanto en maternidad existen 40 lechones

Debido a que el número de animales en el sistema de ceba es mayor a los del sistema de cría, la producción de excretas es mayor en ceba que en cría.

Dentro del sistema de cría, la producción de excretas fue mayor en la etapa de maternidad con un 56,88 % con respecto a las otras etapas, debido a un mayor consumo de alimento y agua en la dieta diaria de las cerdas, además de un mayor número de animales incluidos los lechones.

En el sistema de ceba, el 54,02 % de la producción de excretas se obtuvo en la etapa de engorde, debido a que, por su peso y edad consumen una mayor cantidad de alimento balanceado y agua.

Braun (2013) y SAC (2002) estimaron la producción diaria de estiércol según la etapa fisiológica de los cerdos, reportaron que, en la etapa de maternidad la producción de estiércol por animal fue de 6,4 kg/día, hembra gestante 3 kg/día, reproductor 2,81 kg/día, engorde 2,3 kg/día y levante 1,22 kg/día.

Los valores reportados por Braun (2013) y SAC (2002), fueron mayores a los obtenidos en el presente estudio, probablemente debido a factores que afectan la producción diaria de excretas, como: número de animales, edad y peso de los cerdos, cantidad y calidad del alimento, volumen del agua consumida, o el clima (INIA, 2 005, p.19).

3.1.2 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOS - QUÍMICOS DE LAS EXCRETAS DE CERDO

La Tabla 3.2 muestra los resultados de los análisis físicos, químicos de las excretas de cerdo.

Tabla 3. 2 Caracterización de excretas porcinas

Parámetros	Unidad	Excreta cerdo		Promedio
		Muestra 1	Muestra 2	
Potencial Hidrógeno	NA	7,51	7,64	7,58
Materia orgánica	%p/p	62,51	59,38	60,95
Nitrógeno total	%p/p	3,13	2,97	3,05
Carbono	%p/p	36,24	34,44	35,35
Sólidos totales	%p/p	72,3	74,73	73,52
Sólidos volátiles	%p/p	90,92	92,73	91,83
Relación C/N	%p/p	11,58	11,59	11,59

El pH promedio fue de 7,58; valores similares a los obtenidos en esta experimentación fueron reportados por Rodríguez, Regueiro, Carballa, Hospido y Lema (2014), con un valor de 7,60; mientras que un estudio realizado por Zarkadas y Pilidis (2011) presentó un valor de pH ligeramente menor de 7,42. Estos valores de pH son característicos en excretas porcinas frescas (INIA, 2005, p. 12).

El valor de pH obtenido está en el rango óptimo requerido para el proceso de digestión anaerobia.

El contenido promedio de la materia orgánica fue de 60,95 %. SEAE (2008), reportó valores mayores de contenido de materia orgánica (68,27 %), posiblemente a causa del metabolismo propio de los cerdos, ya que por cada gramo de proteína consumida solo el 33 % es asimilado por el animal para la formación de carne, y el resto la elimina en las deyecciones (INTA y FAO, 2012, p. 239).

El carbono (C) y el nitrógeno (N) son los nutrientes principales usados por las metanobacterias como fuentes de alimentación (INIA, 2005, p.26). El porcentaje de C y N obtenido fue de 35,33 % y 3,05 %, respectivamente. Huang, Wong, Wu y Nagar (2004), reportaron porcentajes similares de 36,6 % y 3,24 %, correspondientes a C y N.

Según FAO (2011), el rango de contenido de carbono y nitrógeno para residuos de origen porcino está entre el 17 - 46 % y 1,1 - 2,5 % (p.31) respectivamente, por lo tanto, las excretas analizadas presentaron un adecuado contenido de C, sin embargo, se reportó un alto contenido de nitrógeno, lo que significaría una baja asimilación de los nutrientes durante la digestión, posiblemente debido a la formulación del alimento balanceado. Esta diferencia afecta a la relación carbono/nitrógeno.

El valor de la relación carbono/nitrógeno (C/N) en las excretas de cerdo analizadas fue de 11,59 calculado con la fórmula [2.1]. Zarkadas y Pilidis (2011), reportaron valores similares de relación C/N igual a 10,7 (p. 4997). Otros estudios realizados por Huang, et al., (2004) reportaron un una relación C/N del 11,3.

Para un proceso de digestión anaerobia la relación óptima de C/N es 25:1 (Gerardi, 2003, p. 94), mientras que, el reportado en este estudio es muy bajo (11,59), lo que podría generar posiblemente una competencia entre las bacterias fermentativas y las metanobacterias por los nutrientes presentes en la materia orgánica.

Por lo tanto, se inhibe la actividad bacteriana debido a la generación y acumulación excesiva de amonio. Probablemente la producción de biogás podría verse afectada, disminuyendo los valores esperados teóricamente (Abbasi, Tauseef, y Abbasi, 2012, p. 5).

El contenido de sólidos totales (ST) promedio fue de 73,52 %, un valor muy elevado con respecto al 28,03% reportado por Xie, Wu, Lawlor, Frost y Zhan (2012), esto posiblemente debido a la existencia de material fibroso (sémola de

trigo y maíz) observado durante la realización de los análisis de las excretas del presente estudio.

Probablemente este resultado influya en la velocidad de degradación del material orgánico por parte de los microorganismos, afectando directamente la eficiencia en la producción de biogás.

El contenido de sólidos volátiles (SV) promedio fue de 91,83%, este resultado indica, que valores superiores al 90% se convertirán en metano, permitiendo obtener elevadas concentraciones de biogás (FAO, 2011, p. 36).

3.1.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA GENERACIÓN DE BIOGÁS

La Figura 3.1 muestra los resultados de la producción de volumen acumulado (mL) de los dos tratamientos (35 °C) y temperatura ambiente (t media de 26 °C)) durante 30 días.

De acuerdo con Cervantes, Pavlostathis y Van Handel (2006) en la Figura 3.1 se observa una curva de crecimiento microbiano típico para la producción de biogás llevado a cabo en reactores batch (pp. 24-25).

La tendencia de la curva tanto a temperatura controlada como a temperatura ambiental es la misma, incrementa gradualmente hasta los 25 días, a partir del cual, la generación de biogás se atenúa y se vuelve asintótica.

Se observa un comportamiento similar de producción de biogás en ambos tratamientos, aproximadamente, hasta el día seis de fermentación, luego del cual, el tratamiento a temperatura controlada (35 °C) tuvo un máximo de producción de biogás al día 25 y aumentó hasta un valor promedio máximo acumulado de 9 560 mL, por otro lado, el tratamiento efectuado a temperatura ambiente tuvo una producción máxima acumulada de 5 840 mL de biogás.

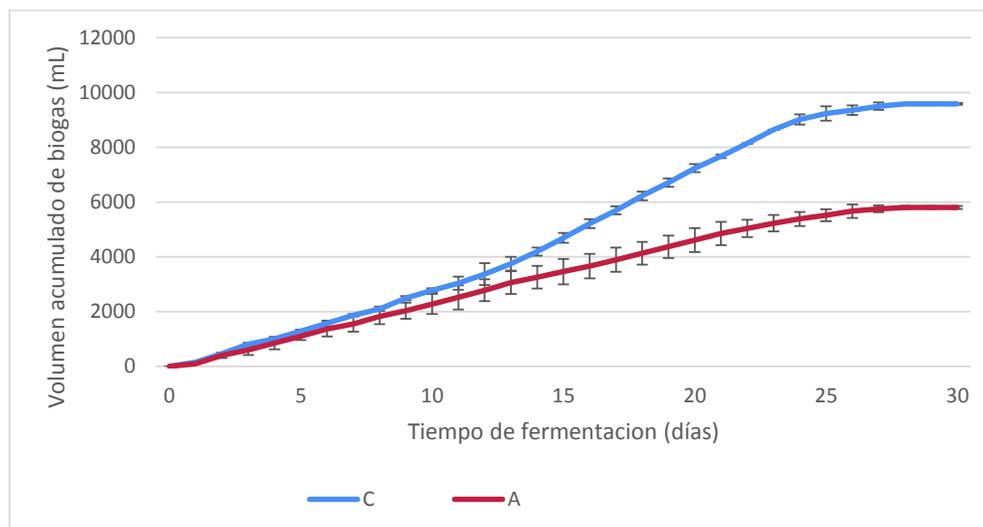


Figura 3. 1 Producción de biogás a partir de excretas de cerdo durante 30 días de retención a C: temperatura controlada 35 °C y A: temperatura ambiente (t media 26 °C)

La producción de biogás acumulado (15,67 L/kg de excreta) en la experimentación a 35 °C fue mínima, en comparación, a los resultados de producción de biogás acumulado (31,89 L/kg de estiércol) reportados por Ojeda y Soto (2008), en un estudio realizado con excretas porcinas de un contenido orgánico del 15 % a condiciones de pH neutro, 31 °C y tiempo de retención de 40 días.

Esta diferencia posiblemente se debe, al elevado contenido de materia orgánica (60,95%) en las excretas empleadas durante la experimentación, las cuales presentaban material fibroso (fibras de cebada, trigo y trazas de maíz) que no fue digerido en el tracto intestinal de los cerdos, por lo tanto, la velocidad de degradación de los compuestos por parte de los microorganismos en la fase de hidrólisis fue lenta, afectando directamente a la disponibilidad de compuestos simples para los microorganismos, como resultado la producción de biogás fue limitada (Gerardi, 2003, p.51).

Según FAO (2011), la velocidad de degradación durante la hidrólisis se ve afectada debido a factores como: alto contenido de sólidos, la composición

bioquímica de la materia orgánica, tamaño de las partículas, temperatura del proceso, etc (pp. 19,21).

La baja relación C/N de 11,59 también pudo afectar la producción de biogás, debido a la posible inhibición bacteriana por el limitado contenido de nutrientes (FAO, 2011, p. 35; FNR, 2010, p. 28)

Se nota claramente que la temperatura del proceso influye directamente en el proceso fermentativo a 35 °C se obtiene mayor cantidad de biogás que a temperatura ambiente.

En la Tabla 3.3 se muestran los valores de los parámetros estadísticos calculados para la producción de biogás durante 30 días.

Tabla 3. 3 Resultados de la Prueba t para la producción de biogás acumulado a temperatura controlada y temperatura ambiente

Parámetro	Temperatura Controlada	Temperatura Ambiente
Media	4 880,33	3 428,33
Varianza	10 853 953,33	3 777 905,74
Observaciones	30	30
Coefficiente de correlación de Pearson	0,98	-
Grados de libertad	29	-
Estadístico t	5,65	Calculado
Valor crítico de t (dos colas)	2,05	Tabular

El análisis de los resultados mediante una prueba t student para muestras pareadas $t_0 > t_{(0,025)}$, expuso que a 35 °C la producción promedio de biogás es mayor con 39,50 % en comparación al tratamiento a temperatura ambiente. De acuerdo al diseño estadístico para muestras pareadas la temperatura influyó en la producción de biogás. El valor del estadístico t calculado es mayor al valor del estadístico t tabular.

Si bien, trabajar a temperatura controlada genera mayor cantidad de biogás, también requiere mayor inversión en la construcción de un reactor con control de temperatura, algo que en ciertas localidades no es factible realizar.

Caracterización del biogás

La caracterización del biogás se muestra en la Tabla 3.4 para las muestras tomadas a los 10 y 30 días de fermentación de los dos tratamientos. Los principales componentes del biogás son el metano y el dióxido de carbono.

Tabla 3. 4 Caracterización de biogás a temperatura controlada (35 °C) y ambiente (t media 26 °C)

COMPONENTE (% peso)	TEMPERATURA CONTROLADA	
	Día 10	Día 30
Metano	43,64	69,04
Dióxido de Carbono	34,77	17,75
Agua	5,685	6,405
Desconocido*	15,91	6,82
COMPONENTE (% peso)	TEMPERATURA AMBIENTAL	
	Día 10	Día 30
Metano	40,61	54,02
Dióxido de Carbono	29,14	24,34
Agua	3,465	13,78
Desconocido*	26,795	7,87

*N/D no detectable

La concentración de metano se encontró entre 50 y 70 % según datos bibliográficos (IDAE, 2007, p. 7). Los resultados obtenidos a 35 °C muestran un incremento del 36,79% en la concentración de metano, mientras que en el tratamiento a temperatura ambiente aumento un 24,82%. La generación de metano probablemente fue debido a que el pH estuvo cercano a la neutralidad lo que favoreció la velocidad de crecimiento de microorganismos, en consecuencia aumentó la producción de biogás (FAO, 2011, p. 38).

Con respecto a la concentración de dióxido de carbono en ambos tratamientos a los 10 y 30 días estuvo dentro de los rangos establecidos de concentración (30 y 40 %) (IDAE, 2007, p. 7). El dióxido de carbono a 35 °C y temperatura ambiente disminuyó el 48,95 % y 16,47 % respectivamente, lo que evidencia una actividad metanogénica al degradar el carbono.

El cromatógrafo de gases registró la presencia de un gas desconocido, lo que impidió reportar valores de poder calórico para estas muestras.

En la Figura 3.2 se muestran las concentraciones de metano y dióxido de carbono a temperatura controlada y ambiente medido a los 10 y 30 días de fermentación. A los 10 días de fermentación las concentraciones promedio de metano fueron similares a temperatura controlada (TC) y ambiente (TA) con valores de 40,61 y 43,64 %, respectivamente. La concentración promedio de metano alcanzó un porcentaje máximo de 69,035 % p/p a 35 °C. Concentraciones similares de 56 % de metano se obtuvieron en un estudio realizado por Regueiro, Carballa, Álvarez y Lema (2012), después de 36 días de fermentación a 35 °C empleando excretas de cerdo.

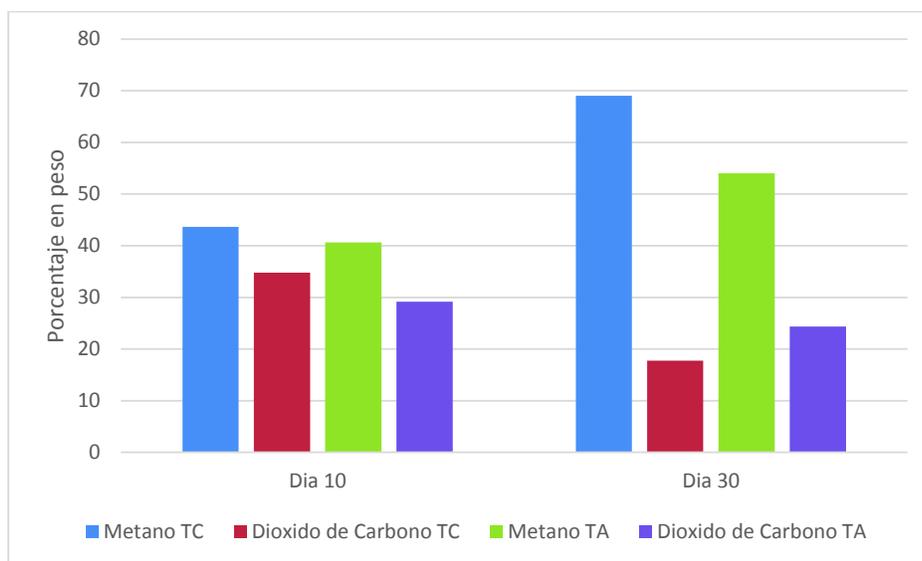


Figura 3. 2 Composición de biogás a temperatura ambiente (t media 26 °C) y controlada (35 °C)

Con respecto al dióxido de carbono se observó que las concentraciones al día 10 fueron mayores que al día 30, debido a la reducción del dióxido de carbono a metano producto de la respiración anaerobia donde los electrones que libera la materia orgánica son aceptados por el dióxido de carbono que se reduce a metano (Choi , 2007, p. 149).

3.1.4 PRUEBA FINAL A LAS MEJORES CONDICIONES

Poder calorífico

La Tabla 3.5 presenta los resultados de la caracterización del biogás y su poder calorífico de una muestra mantenida a temperatura controlada (35 °C), durante 30 días.

Tabla 3. 5 Caracterización de biogás

Componente	% Peso	% Moles
Metano	97,57	97,95
Dióxido de Carbono	0,24	0,09
Agua	2,20	1,96
Densidad Relativa		0,56
Peso molecular promedio (g / gmol)		16,10
Poder calorífico del gas (Btu / pie ³)		990,30

Con base en los resultados de la caracterización, se obtuvo un biogás con una concentración de metano relativamente puro (97,57 %) y poder calorífico de 990,3 (Btu / pie³), de acuerdo a lo señalado por Gerardi (2003), quien especifica que una concentración de metano puro (100 %) posee un valor calórico de 1 000 Btu / pie³.

A medida que este se mezcla con dióxido de carbono su valor calórico disminuirá (p. 73).

3.1.4.1 Prueba de inflamabilidad

La prueba de inflamabilidad se realizó para comprobar que el gas obtenido es capaz de generar llama. Según FAO (2011) a partir de un valor de 45 % de metano se puede obtener llama para las diversas aplicaciones. La Figura 3.3 muestra la llama generada por el biogás.



Figura 3. 3 Prueba de inflamabilidad

Evidenciándose que el biogás puede combustionar, y que puede aplicarse para la calefacción de las salas de maternidad y cría de levante.

3.1.4.2 Caracterización del biol

En la Tabla 3.6 se presenta el resultado de la caracterización del biol después de los 30 días de fermentación.

Tabla 3. 6 Caracterización del biol

Parámetro	Unidad	Resultado
Nitrógeno total	%	0,23
N-NH4	ppm	56
N-NO3	ppm	0
Fosforo	mg/L(P)	350
Potasio	mg/L(K)	570

El porcentaje de nitrógeno total al final de la fermentación disminuyó en 92,46 % con respecto al valor inicial del nitrógeno reportado en la Tabla 3.2. Esto debido a que, en el proceso de degradación anaeróbica el nitrógeno es consumido por los microorganismos como fuente de nutriente (Seadi, et al, 2008, p.24).

La cantidad de nitrógeno en forma de nitrato no se reportó en la muestra al final de la fermentación debido a que el nitrógeno sufrió el proceso de denitrificación dadas las condiciones anóxicas, en este proceso los nitratos se reducen a nitrógeno gaseoso (Choi, 2007, p.87). Sin embargo, se reportó 56 ppm de nitrógeno en forma de amonio. Para que un abono sea completo, se requiere que aporte nitrógeno en forma de nitrato (NO_3^-) o de amonio (NH_4^+) ya que las plantas solo pueden absorberlo si está disponible de esta forma (FAO, 2002, p. 18).

En vista de que el Biol obtenido presenta una baja concentración de nitrógeno, es necesario utilizarlo en combinación con otras fuentes de nutrición orgánica para las plantas.

El valor de fósforo fue de 350 ppm. Un estudio realizado por Choi (2007), reportó valores similares de concentración de fósforo de 515 ppm (p. 20). Este elemento, promueve la rápida formación y crecimiento de las raíces y tallos en las plantas, mejorando su resistencia a enfermedades (FAO, 2002, p. 17; Huayla, 2006, p.3).

El valor de potasio reportado fue de 570 ppm. Este valor es ligeramente menor al valor reportado por Choi (2007) de 762 ppm (p. 20). Según FAO (2002) y Huayla (2006), señalan que, este elemento, está involucrado en la activación de enzimas que regulan las principales reacciones metabólicas de la planta, además, es esencial en la síntesis de proteína y descomposición de carbohidratos. También contribuye a mejorar la tolerancia a heladas y sequias, así como, su resistencia a enfermedades.

Las diferencias en las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio dependen de diversos factores entre los más importantes se mencionan al pH, tiempo de retención, temperatura y la calidad de alimentación de los animales (Gerardi 2003, p. 79).

El biol obtenido de la degradación anaerobia, podría ser aplicado foliarmente de acuerdo con las exigencias nutricionales de cultivos o huertas de hortalizas, debido a, que el contenido de N: P: K están disponibles para la planta, y probablemente ayuden a mejorar el rendimiento en la producción de un cultivo.

Además debido a su alto contenido de fósforo y potasio, podría actuar como un revitalizador en plantas que hayan sufrido enfermedades, ataque de plagas, heladas o sequias (Huayla, 2002, p. 5). También, podría emplearse como un mejorador de suelos (FAO, 2011, p.73), ya que, aumentaría la fertilidad del mismo.

3.2 DISEÑO DE UN BIODIGESTOR

ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO DEL BIODIGESTOR

Requerimiento energético de biogás

Se estimó que las lámparas estarán encendidas durante 21 días por 8 horas al mes, la Tabla 3.7 detalla los meses de funcionamiento de las lámparas para un año. Lo que indica que aproximadamente las lámparas permanecerán encendidas durante 6 meses al año, mientras que el digestor estará en funcionamiento durante todo el año.

Tabla 3. 7 Funcionamiento de lámparas

Meses	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Lámparas	o	x	o	x	o	x	o	x	o	x	o	x	o
Digestor	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

o = encendido, x= apagado, F en funcionamiento

En la Tabla 3.8 se presenta el consumo de biogás diario y mensual para las cuatros lámparas ubicadas en la sala de maternidad y sala de cría de levante.

Tabla 3. 8 Consumo de biogás diario y mensual de las lámparas

Numero de lámparas	Consumo de biogás (m ³)	
	Diario	Mensual
1	0,56	11,76
4	2,24	47,04

Considerando la disponibilidad de 42,9 kg de estiércol y el potencial de producción promedio de biogás de 0,095 m³/kg (Abbasi, Tauseef y Abbasi, 2012, p. 69), se estimó, que se generará 4,08 m³ de biogás por día.

Por lo tanto, esta cantidad es suficiente para reemplazar el GLP utilizado para el funcionamiento de las lámparas.

Con base a los resultados obtenidos del requerimiento energético y la producción estimada de biogás, se planteó diseñar dos biodigestores tubulares con carga de 21,45 kg de estiércol cada uno, a fin de reducir la longitud del digestor.

Tiempo de retención (TR)

El biodigestor trabajará a una temperatura de 35°C, por lo tanto, según la Ecuación 3.1 el TR es de 25 días; tiempo suficiente para asegurar el crecimiento de las metanobacterias, que requieren de al menos 12 días para su formación (Gerardi, 2003, pp. 24,25).

$$T_R = (-51,227 \times \ln(35) + 206,72)$$

[3.1]

$$T_R = 24,59 \text{ días}$$

Donde:

T_R : Tiempo de retención (días)

T: Temperatura (°C)

Volumen de biodigestor

La carga de alimentación calculada con la Ecuación 3.2 con base a la dilución experimental (1:6.38), y una densidad del estiércol porcino de aproximadamente 1 (g/cm³), fue de 0,15 m³/día. El resultado del cálculo del volumen del biodigestor mediante la Ecuación 3.3, fue de 3,69 m³.

$$C_i = M_E + M_{H_2O}$$

[3.2]

$$C_i = 21,45 \text{ kg} + 136,85 \text{ kg} = 158,3 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 0,15 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$V_D = C_i \times T_R$$

[3.3]

$$V_D = 0,15 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 24,59 \text{ días} = 3,69 \text{ m}^3$$

Donde:

V_D : Volumen del digestor (m³)

C_i : Carga de alimentación del biodigestor (kg/ día)

T_R : Tiempo de retención (días)

M_E : Masa de estiércol (kg/ día)

M_{H_2O} : Masa de agua agregada para disminuir la cantidad de solidos al 10% (kg/día)

Volumen de biogás

Para el cálculo de volumen de metano por kg de estiércol, se utilizó la Ecuación 3.4 (Martí, 2008, p.42); se consideró una carga de 21,45 kg de estiércol y un potencial de producción de biogás de 0,095 m³ biogás/kg estiércol.

$$V_{biogás} = C_i \times \frac{\%ST}{VD} \times \%SV \times P_{biogás}$$

[3.4]

$$V_{biogás} = 21,45 \times \frac{0,7352}{3,69} \times 0,9183 \times 0,095$$

$$V_{biogás} = 0,37 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{m}^3 \text{ VD}}$$

Con base en los resultados de la producción diaria de biogás, se estimó que un digester de 3,69 m³ producirá 1,37 m³ de biogás.

Cálculo del volumen real del biodigestor tipo tubular

Para el cálculo del volumen real del digester se consideró la composición de la fase líquida y gaseosa del digester tubular, como se muestra en la Figura 3.4, la fase líquida que corresponde al 75 % del volumen total y el 25% a la fase gaseosa (UPME, 2003, p. 22).

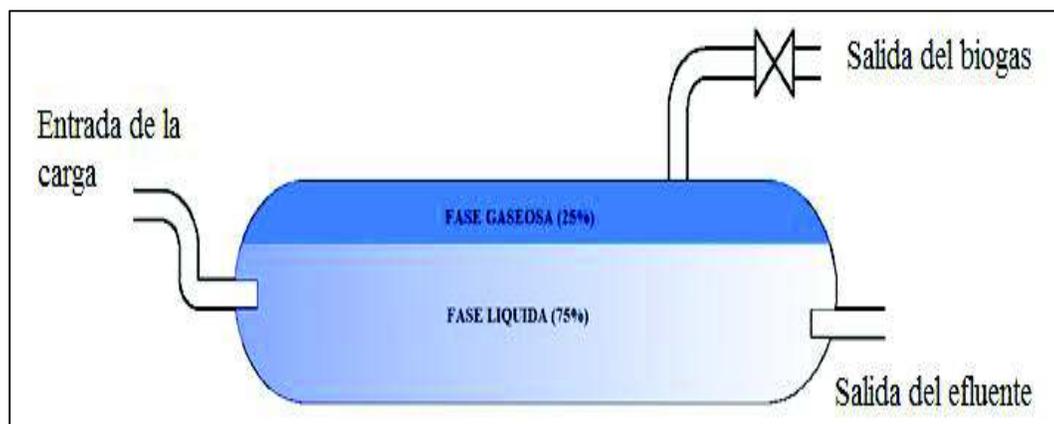


Figura 3. 4 Digestor tubular

El volumen de la campana (25 %) se calculó mediante la Ecuación 3.5 (Campos, 2011, p. 39), la cual considera como el volumen de la base líquida igual al volumen del digestor (V_D) obtenido mediante la Ecuación 3.3.

$$V_C = V_D \times \frac{0,25}{0,75}$$

[3.5]

$$V_C = 3,69 \times \frac{0,25}{0,75}$$

$$V_C = 1,23 m^3$$

El volumen real del digestor se calculó mediante la Ecuación 3.6, que corresponde a la suma del volumen de la campana y al volumen del digestor (Campos, 2011, p. 39):

$$V_{DR} = V_D + V_C$$

[3.6]

$$V_{DR} = 4,92 m^3$$

El volumen total del biodigestor para una carga de 21,45 kg de estiércol con una dilución 1: 6,38 (estiércol: agua) es de 4,92 m³ donde se producirán 1,37 m³ de biogás.

Diámetro y longitud del biodigestor tubular

Para el cálculo de la longitud y altura del digestor se consideró una relación óptima entre la longitud y el diámetro del digestor (L/D) de 7 (Avendaño, 2010, p. 16) y una geometría cilíndrica:

$$V_{DR} = \pi \times \frac{D_d^2}{4} \times L_d$$

[3.7]

Dónde

V_{DR} : Volumen real del digestor (m^3)

D_d : Diámetro del digestor (m)

L_d : Longitud del digestor (m) ($L=7D$)

Con la relación L/D igual a 7, se obtuvo el valor del diámetro y la longitud del digestor para el volumen real calculado anteriormente ($4,92 m^3$):

$$D_d = 0,95 m$$

$$L_d = 6,7 m$$

En la Figura 3.5 se presentan las medidas de longitud total y diámetro del biodigestor, para una producción diaria de biogás por kg de estiércol de $0,17 m^3$. Se consideró una medición adicional en la longitud, de 16 centímetros a cada lado del digestor; debido al espacio que ocupan las tuberías de la entrada de la carga y salida del efluente.

La longitud total del digestor es de 7,97 m.

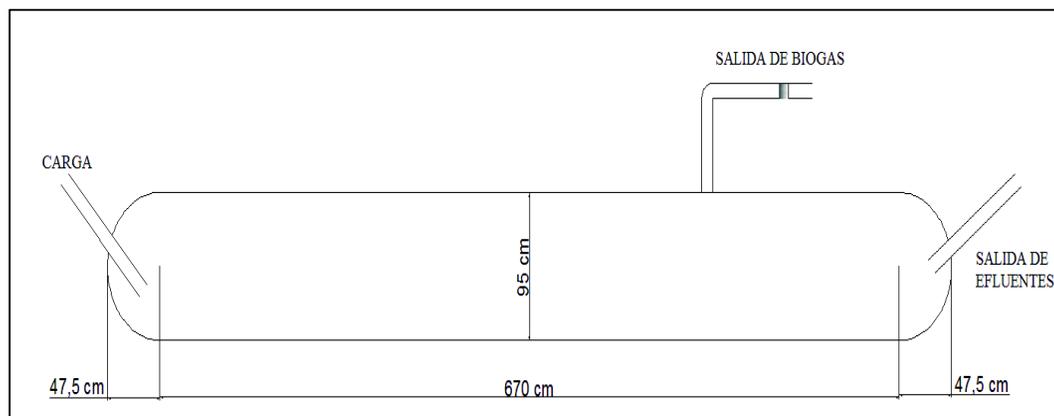


Figura 3. 5 Dimensionamiento del biodigestor tubular

DIMENSIONES DE LA FOSA, TANQUE DE CARGA Y DESCARGA

Dimensionamiento de la fosa

Se consideraron las dimensiones de la fosa sugeridas por Avendaño (2010) para diámetro del biodigestor igual a 1 m. Se calcularon los valores de profundidad, ancho superior e inferior. De tal manera que el 75 % (fase líquida) del biodigestor tubular sea ocupado en la fosa. En la Tabla 3.9 se presenta el dimensionamiento de la fosa para una producción diaria de 21,45 kg de estiércol y un diámetro de 0,95 m:

Tabla 3.9 Parámetros para dimensionar la fosa

Parámetro	Medida Sugerida
Diámetro del biodigestor	1 (m)
Profundidad	0,6 (m)
Ancho Inferior	0,3 (m)
Ancho Superior	0,5 (m)

En las Figuras 3.6 y 3.7 se presentan la vista frontal y lateral de la zanja (Martí, 2008, p.56).

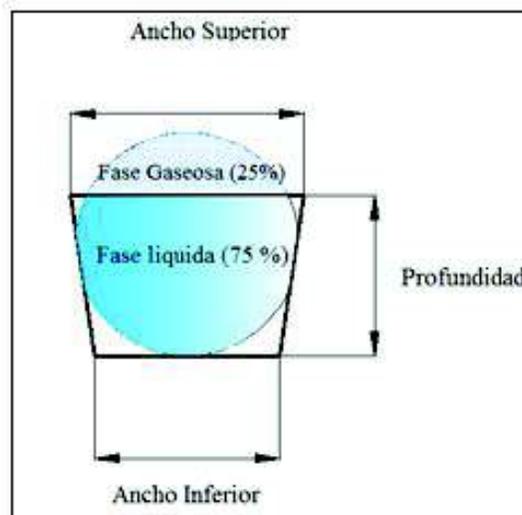


Figura 3.6 Vista frontal de la zanja

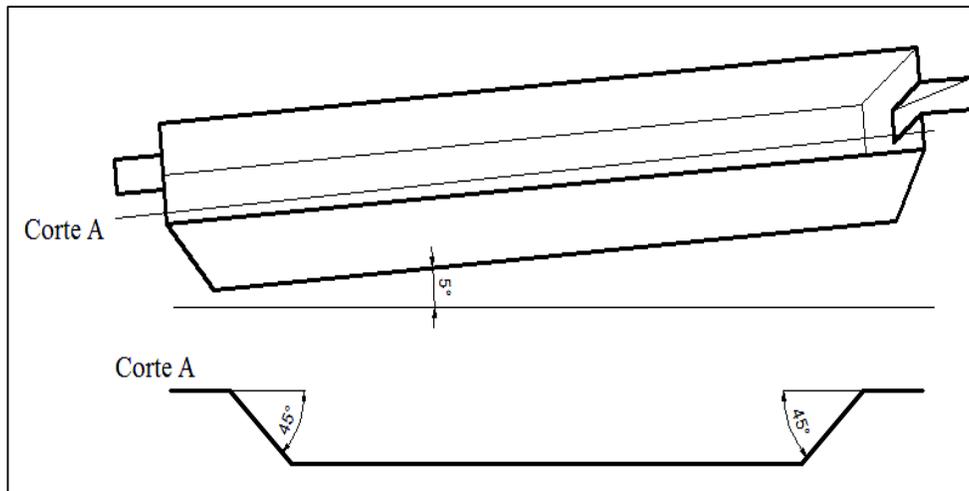


Figura 3. 7 Vista Lateral de la zanja

Presión que ejerce el fluido sobre las paredes de la fosa

Es necesario calcular la presión que ejerce el fluido sobre las paredes de la fosa, para la selección de la geomembrana mediante la resistencia a la tensión, como se muestra en la Figura 3.8. Para ello se calcula la presión que ejerce la mezcla de gas (metano y dióxido de carbono) y la presión del fluido (mezcla de estiércol y agua en relación 1:6.37).

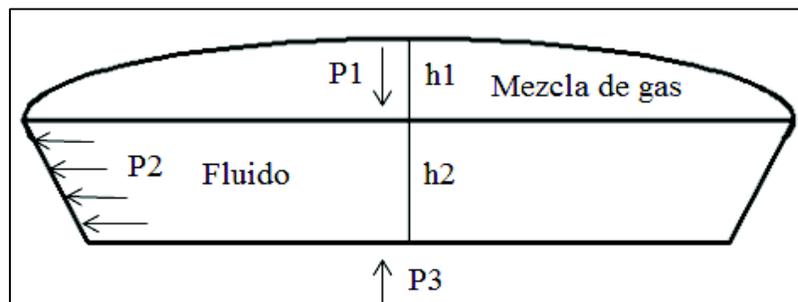


Figura 3. 8 Presiones sobre la fosa del biodigestor

Al considerar que en un fluido está en reposo, la presión que ejerce sobre las paredes es la misma en todos los puntos a una misma altura (Geankoplis, 1998, p. 40). Se calculó la presión con las Ecuaciones 3.8 y 3.9.

$$P_1 = h_1 \rho_1 g$$

[3.8]

$$P_2 = h_2 \rho_2 g + P_1$$

[3.9]

Donde:

P_1 : Presión de la mezcla del gas (Pa)

P_2 : Presión que ejerce el fluido sobre las paredes (Pa)

ρ_1 : densidad promedio del gas (metano y dióxido de carbono) (kg/m^3)

ρ_2 : densidad del fluido (kg/m^3)

h_1 : Altura promedio que ocupa la mezcla de gas (m)

h_2 : Altura del fluido (m)

g : Gravedad (m/s^2)

Si la presión sobre la base de la fosa es igual a la presión que ejerce el fluido sobre las paredes, debido a que se trata del mismo fluido, entonces P_1 y P_2 es:

$$P_1 = h_1 \rho_1 g$$

$$P_1 = 0,35\text{m} \times 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 4,08 \text{ Pa}$$

$$P_2 = h_2 \rho_2 g + P_1$$

$$P_2 = 0,6 \times 1000 \times 9,8 + 4,08$$

$$P_2 = 9,96 \text{ kPa}$$

Dimensionamiento del tanque de carga y efluentes

Para el volumen de mezcla se consideró una carga de $0,15 \text{ m}^3$. Por lo tanto, el volumen del tanque de carga calculado (V_{tc}) mediante la Ecuación 2.7 es de $0,45 \text{ m}^3$. El volumen del tanque de efluentes es igual al volumen del tanque de carga calculado.

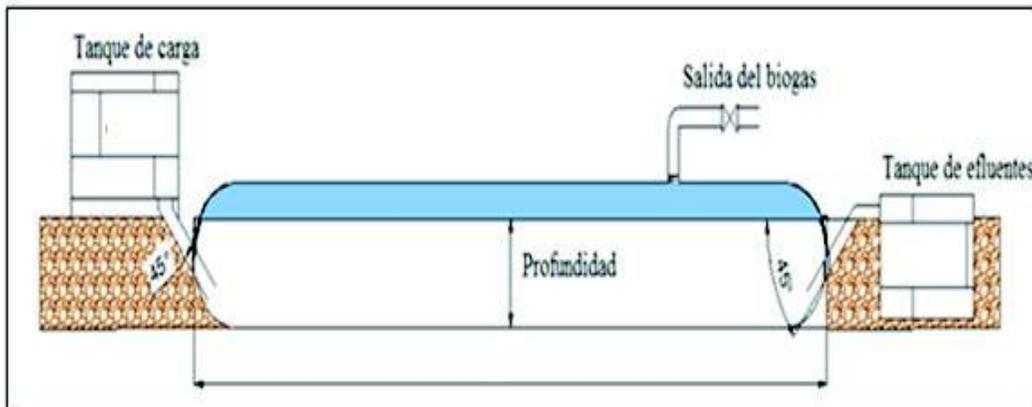


Figura 3. 9 Esquema del biodigestor tubular

El tanque de carga estará ubicado a diferente nivel del biodigestor como se presenta en la Figura 3.9 para facilitar la alimentación. Además en la parte interior del tanque se colocará una malla para evitar que ingresen materiales corto punzantes o sólidos muy grandes que puedan deteriorar el biodigestor (Avendaño, 2010, p. 41).

Según Avendaño (2010) los tanques de carga y descarga tienen forma cilíndrica, por lo tanto, el diámetro se calcula según la Ecuación 3.10 (p.41):

$$V_{te} = \pi \times \frac{D_{te}^2}{4} \times h_{te}$$

[3.10]

Donde:

V_{te} : Volumen del tanque de efluentes (m^3)

D_{te} : Diámetro del tanque (m)

h_{te} : Longitud del tanque (m)

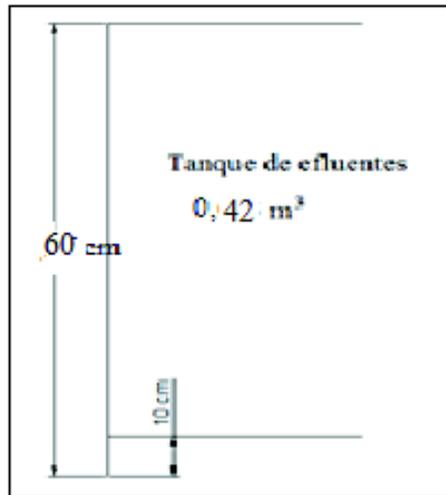


Figura 3. 10 Dimensiones del tanque de efluentes

El tanque de efluentes está por debajo del nivel del digestor tal como se muestra en la Figura 3.10, si la profundidad del digestor es de 0,60 m y el tanque está a 10 cm de la base del digestor; entonces la longitud del tanque h_{te} es:

$$h_{te} = p_d - h_b$$

[3.11]

$$h_{te} = 60 - 10 = 50 \text{ cm}$$

Una vez calculada la altura del tanque, se aplica la Ecuación 3.12 para determinar el diámetro:

$$V_{te} = \pi \times \frac{D_{te}^2}{4} \times h_{te}$$

[3.12]

$$0,42 \text{ m}^3 = \pi \times \frac{D_{te}^2}{4} \times 0,5 \text{ m}$$

$$D_{te} = 1,03 \text{ m}$$

En la Tabla 3.10 se presentan las dimensiones del tanque de carga y tanque de salida de efluentes, para una carga total de estiércol porcino de 21,45 kg.

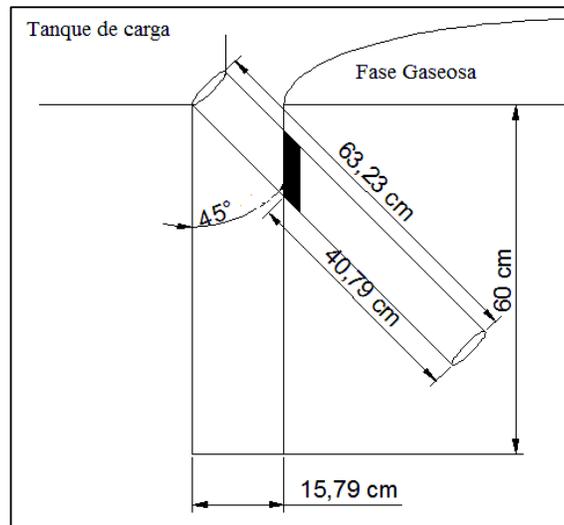
Tabla 3. 10 Dimensiones del tanque de carga y salida de efluentes

Parámetro	Medida
Volumen	0,45 m ³
Diámetro	1,03 m
Altura	0,5 m

TUBERÍAS Y ACCESORIOS

Tubería de carga y salida de efluentes

Se utilizará tubos de PVC de 6" y 1,05 m para la entrada de la carga y salida de los efluentes. Se recomienda que el 80% del tubo este dentro del digestor y el 20% a la vista (Martí, 2008, p. 61). Al considerar, la distancia entre el digestor y el tanque de entrada de 30 cm y un ángulo de inclinación de 45°. En la Figura 3.11 se presenta el dimensionamiento de la tubería de carga.

**Figura 3. 11** Dimensión de la tubería para el tanque de entrada

El tanque de efluentes estará ubicado a 10 cm sobre la base de la fosa y a la misma altura de la fosa. En la Figura 3.12 se presenta un esquema de las dimensiones de la tubería de salida.

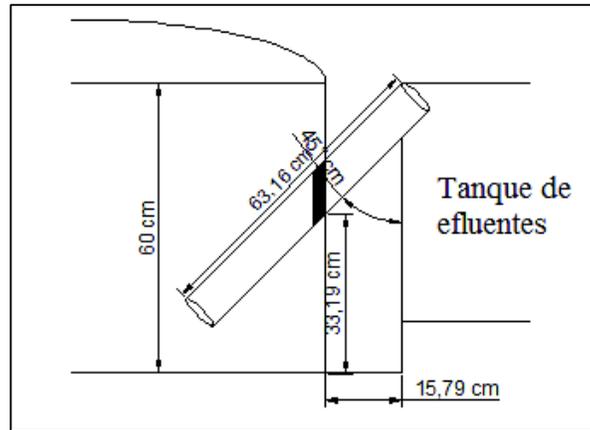


Figura 3. 12 Dimensión de la tubería para el tanque de efluentes

Tuberías de conducción de biogás

Para la salida del biogás, se ajusta un sistema de acoples en el centro del biodigestor para evitar fugas como se indica en la Figura 3.13. Se utilizará un adaptador macho y hembra de PVC de 1 ½”.

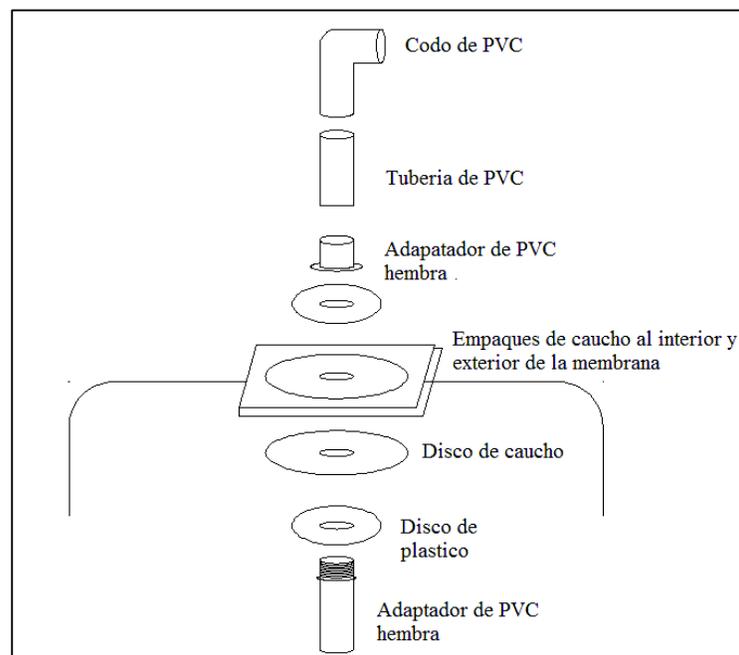


Figura 3. 13 Sistema de acoples para la salida del biogás

Válvula de seguridad

Después de ajustar el sistema de acoples en la membrana, se instala una válvula de seguridad, para el control de la presión dentro del biodigestor.

La válvula de seguridad consiste en la colocación a la salida del biogás, de una botella plástica llena de agua hasta la mitad de su volumen una tubería de PVC de 25 cm, la cual debe sumergirse entre tres y cinco centímetros dentro del agua (IAA, 2005, p.24). En la parte superior de la botella se debe hacer un agujero para llenar con agua cuando esta se vaya evaporando.

A la salida del biogás, se acopla una válvula de bola de 1 ½", para cerrar la salida del biogás, después de la válvula de bola se ajusta una tubería de PVC de 20 cm y se acopla una T de PVC.

En la segunda salida de la T se acopla una tubería de PVC de 20 cm y la botella plástica, en la tercera salida de la T se ajusta una tubería de 20 cm y otra válvula de globo, como se presenta en la Figura 3.14.

Además, para extraer el ácido sulfhídrico que se forma durante el proceso de biodigestión se debe colocar lana de acero dentro de la T de PVC.

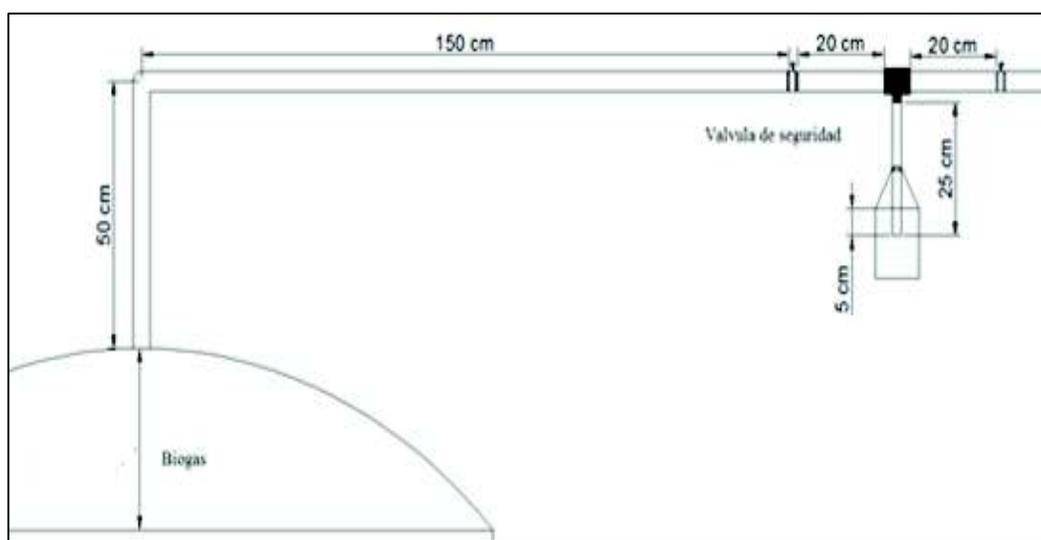


Figura 3. 14 Acople de la válvula de seguridad

Gasómetro

El gasómetro sirve para aumentar la presión en caso de caídas de presión, se utilizará el mismo material que se empleó para la construcción del biodigestor y se acoplarán las mismas adaptaciones para la salida de biogás. Para la capacidad del gasómetro se consideró una producción de biogás de 3 m^3 .

Se coloca una T de PVC de $1 \frac{1}{2}$ ", a la salida del biogás y se acopla una tubería de PVC, a un metro del gasómetro se instala una válvula de bola de PVC de $1 \frac{1}{2}$ " para cerrarla y aislarla en caso de fugas. En la Figura 3.15 se presenta el esquema del gasómetro.

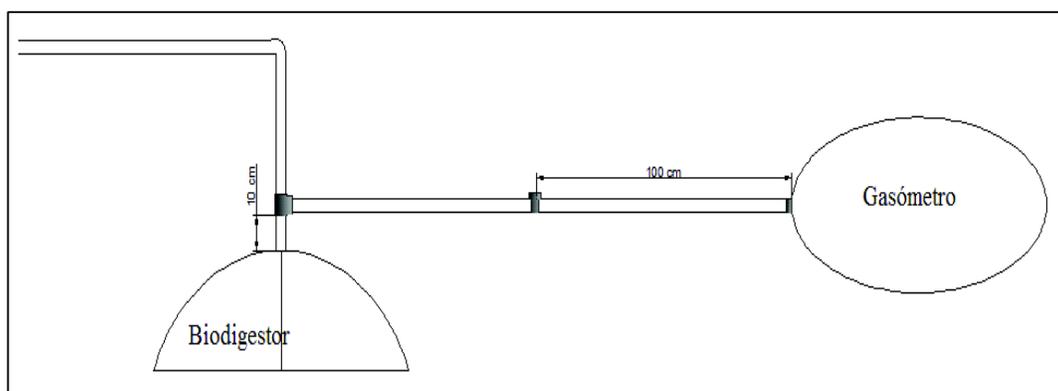


Figura 3. 15 Dimensiones del gasómetro

Distribución del biogás

De acuerdo con la Figura 3.15, en la tubería que queda libre se acoplará una T $1 \frac{1}{2}$ ", la cual permitirá distribuir el biogás tanto a la sala de maternidad como a la de cría. A cada lado de la salida de la T, se acoplará una válvula de bola y se colocará un adaptador de reducción a 1 ", a tuberías de 7 y 8 m respectivamente. Al final de cada conexión se acoplará una válvula de seguridad y un adaptador de reducción a $\frac{1}{2}$ " para 1 m de tubería, una T y un adaptador de reducción $\frac{1}{4}$ ". Al interior de las salas de maternidad y cría, en cada lámpara se acoplará una llave de paso de $\frac{1}{4}$ " y un adaptador de broce $\frac{1}{4}$ ", con el fin de adecuar la manguera de

gas y conectar las lámparas. La distribución de las conexiones se detalla en el Anexo IV.

3.3 ANÁLISIS COSTO/BENEFICIO

Para el análisis costo/ beneficio se consideró una producción diaria de biogás de 2,74 m³; además de la implementación de dos biodigestores tipo tubular en la granja AGROINPORC.

En la implementación del biodigestor tipo tubular se consideraron los siguientes costos:

3.3.1 COSTOS DIRECTOS

Para el cálculo de los costos directos se consideró costo de materiales directos y mano de obra directa, empleado en la instalación del biodigestor.

Costo de materiales directos

Los costos directos de materiales son aquellos que se pueden identificar físicamente como parte de los productos fabricados.

Para la implementación del biodigestor se consideró como materiales directos los empleados para la implementación de la cámara de fermentación, tanques de almacenamiento y efluentes, gasómetro, conexión para lámparas de biogás e invernadero.

En la Tabla 3.11 se presentan el desglose de los costos de materiales.

Tabla 3. 11 Costo de materiales directos para la implementación del biodigestor

Materiales	Número de Unidades	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Cámara de fermentación			
Polietileno de 300 mm (1x7 m)	2	21,42	42,84
Adaptador PCV 1 1/2 "	1	3,20	3,20
Tubería de PVC 1 1/2"	5	2,42	12,10
Codo PVC 1 1/2"	2	3,50	7,00
Válvula de bola PVC 1 1/2"	2	5,90	11,80
Subtotal (USD)			76,94
Tanque de almacenamiento y efluentes			
Tubería de PVC 6"	12	4,50	54,00
Ladrillos	44	0,25	11,00
Cemento	2	8,00	16,00
Arena y ripio	2	1,70	3,40
Subtotal (USD)			84,40
Gasómetro			
Polietileno de 300 mm (1,50x 3)	1	10,11	10,11
Tubería de PVC 1 1/2"	2	2,42	4,84
Tee de PVC 1 1/2"	1	0,80	0,80
Válvula de bola PVC 1 1/2"	1	5,90	5,90
Adaptador PVC 1 1/2 "	1	3,20	3,20
Subtotal (USD)			24,85
Conexión para lámparas de biogás			
Adaptador de bronce 1/4"	4	2,14	8,56
Adaptador de PVC 1 ", 1/2", 1/4"	6	0,74	4,44
Tubería de PVC 1 ", 1/4"	2	4,80	9,60
Tubería de PVC 1/2"	3	6,80	20,40
Llave de paso ¼ "	4	4,80	19,20
Válvulas de bola	4	5,90	23,60
Subtotal (USD)			85,80
TOTAL(USD)			271,99

Costos de mano de obra directa

Los costos de mano de obra directa incluyen los sueldos y salarios que se paga a empleados. Entre los costos de mano de obra directa se consideraron los salarios (jornales) de obreros encargados de limpieza y excavación y acondicionamiento del terreno donde va instalado el biodigestor.

La Tabla 3.12 se presentan los costos de mano de obra directa.

Tabla 3. 12 Costos de mano de obra directa para la implementación de la fosa y el invernadero

Actividad	Número de obreros	Días	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Limpieza del terreno	1	1	20,00	20,00
Excavación del terreno (Excavadora)	1	1	15,00	15,00
Acondicionamiento de la fosa	2	1	20,00	40,00
Total (USD)				75,00

En la Tabla 3.13 se presentan los costos totales directos de los materiales y mano de obra, para la implementación de dos biodigestores de 4,8 m³.

Tabla 3. 13 Costos totales directos

Costos Directos	Unidad	Costo Unitario	Costo Total
Material	2	271,99	543,98
Mano de obra	2	75,00	150,00
TOTAL (USD)			693,98

3.3.2 COSTOS INDIRECTOS

Entre los costos indirectos se consideraron los costos de suministros empleados en la instalación del biodigestor.

Costo de materiales indirectos

Entre los costos de materiales indirectos o suministros se consideraron los materiales que se presentan en la Tabla 3.14:

Tabla 3. 14 Costos de materiales indirectos

Material	Número de unidades	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Pegamento de PVC	3	1,90	5,70
Metro	1	1,50	1,50
Tijeras	2	1,20	2,40
Clavos	2	0,70	1,40
SERRUCHO	1	6,50	6,50
TOTAL (USD)			17,50

Costos de mano de obra indirecta

Se consideró como costo de mano de obra indirecta el salario de un supervisor de la obra durante tres días, detallados en la Tabla 3.15:

Tabla 3. 15 Costo de mano de obra indirecta

Cargo	Número de trabajadores	Días	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Supervisor de la obra	1	3	30,00	90,00
Total				90,00

En la Tabla 3.16 se presentan los costos totales indirectos de los materiales y mano de obra, para la implementación de dos biodigestores de 4,8 m³.

Tabla 3. 16 Costos indirectos totales

Costos Indirectos	Unidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Material	2	17,50	35,00
Mano de obra	1	90	90,00
TOTAL			125,00

El costo total para la implementación de dos biodigestores tipo tubular es de 818,98 dólares.

3.3.3 EGRESO ANUAL

La granja AGROINPORC utiliza gas industrial (45 kg) que puede abastecer a una lámpara que permanece encendida 168 horas al mes. El costo por cilindro de gas industrial es de 50 dólares.

Considerando que las lámparas implementadas en la sala de maternidad y cría permanecerán encendidas durante 8 horas, un cilindro de gas abastecería la calefacción mensual. En la Tabla 3.17 se presenta el gasto anual por compra de cilindros de gas para el funcionamiento de las lámparas:

Tabla 3. 17 Gasto anual por compra de cilindros de gas

Equipo	Unidad	Número de cilindros/año	Costo Unitario	Costo Total
Lámpara	1	6	50	250,00
	4	24	50	1 200,00

3.3.4 SUSTITUCIÓN DE GAS COMERCIAL POR BIOGAS

Se consideró un tiempo de retención o fermentación de 25 días, para una carga de 21,45 kg de estiércol con una dilución estiércol agua de 1: 6,37. Donde la

producción diaria de biogás fue de 1,37 m³ para un biodigestor de 4,83 m³. En la Tabla 3.18 se presenta la producción de biogás total en un biodigestor:

Tabla 3. 18 Producción de biogás total

Unidad	1
Tiempo de retención(días)	25
Producción de biogás/día (m ³)	1,37

Al implementar los dos biodigestores tipo tubular se generarán 493,2 m³ de biogás al año, lo que hace posible el reemplazo de gas comercial por biogás.

Con un ahorro anual de 381,02 dólares en el primer año de implementación y funcionamiento del biodigestor, mientras que a partir de segundo año la granja se ahorrará 1 200 dólares.

Relación beneficio/ costo

El resultado de la relación B/C fue de 1,5, lo que indica que la implementación de un biodigestor tubular es factible para la granja Agroinporc.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. Los análisis físicos químicos reportaron valores de pH y contenido de materia orgánica de 7,58 y 60,95 % p/p respectivamente, estos valores fueron característicos de las excretas porcinas. Sin embargo, el contenido de sólidos totales (60,95%) fue elevado con respecto a otros estudios, esto debido a que las excretas contenían abundante material fibroso (trigo y maíz), relacionado directamente con el tipo de alimentación que recibían los cerdos.
2. El efecto de la temperatura en la producción de biogás para los dos tratamientos influyó significativamente, dado que a temperatura controlada (35 °C) se obtuvo 9 560 mL de biogás y a temperatura ambiental (t media 26°C) 5 840 mL durante 30 días de fermentación.
3. La cantidad de biogás producido (15,67 L biogás/kg estiércol) durante 30 días fue menor a la reportada bibliográficamente en un 80%, probablemente debido al tipo de alimentación que influye directamente en la composición de las excretas de cerdo y a la relación C/N menor a 25:1.
4. De acuerdo a los análisis cromatográficos, los resultados de las muestras de biogás (contenido de metano 69,04 % y dióxido de carbono 17,75%) cumplieron con los rangos establecidos bibliográficamente.
5. La cantidad de excretas que se generan diariamente (42,9 kg) en la granja, pueden suplir las necesidades energéticas de cuatro lámparas utilizadas en sala de maternidad y cría de levante, con la implementación de dos biodigestores tubulares de 7,97 m de largo por 1 m de altura.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio para determinar el efecto de la adición de un inóculo comercial al inicio de la digestión anaerobia, en la producción de biogás.
2. Evaluar la adición de fuentes de carbono en la mezcla agua estiércol, para mejorar la relación C/N y determinar su influencia en la producción de biogás.
3. Evaluar la calidad del biol y del digestato sólido obtenidos en la digestión anaerobia, en la producción de hortalizas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abbasi, T., Tauseef, S., y Abbasi, S. (2012). *Biogas Energy*. (1ra. ed.). New York, USA: Springer.
2. Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD), Asociación de porcicultores de Ecuador (ASPE), Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca (MAGAP). (2013). *Manual aplicación de buenas prácticas porcinas: Manual de alternativas de tratamiento de purines porcinos*. (1ra. ed.). Quito, Ecuador: Mixage.
3. Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD), Ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca (MAGAP). (2013). *Guía de buenas prácticas porcícolas: Inocuidad de los alimentos*. (1ra. ed.). Quito, Ecuador: Ideaz.
4. Avendaño, D. (2010). *Diseño y construcción de un digestor anaerobio de flujo pistón que trate los residuos generados en una explotación ganadera de la localidad de Loja, Ecuador, empleando tecnologías apropiadas*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). Universidad Técnica particular de Loja, Loja, Ecuador.
5. Braun, R., (2013). Eliminación mediante impactos ambientales positivos de estiércoles y purines en las empresas porcinas. *Informe de actualización técnica*, 1 (28), 1-12.
6. Campos, B. (2011). Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*. 20 (2), 37-41.

7. Cervantes, F., Pavlostathis, S. y Van Handel, A. (2006). *Advanced biological treatment processes for industrial wastewaters*. (1ra. ed.). London, England: IWA.
8. Choi, E. (2007). *Piggery waste management*. (1ra. ed.) London, England: IWA.
9. Díaz, M., Estipia, S. y Molina, F. (2002). *Digestión anaerobia*. (1ra ed.). Bogotá, Colombia: UNIBIBIOS.
10. Devore, J. (2008). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. (7ma. ed.). México: CENCAGE Learning.
11. Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC). <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-superficie-y-produccion-agropecuaria/> (Octubre, 2015)
12. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). (2010). *Leitfaden Biogas*. (5ta. ed.). Alemania: FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit.
13. Feican, C. (2011). *Manual de producción de abonos orgánicos*. Recuperado de http://www.iniap.gob.ec/nsite/index.php?option=com_sobipro&pid=57&sid=481:Manual-de-produccion-de-abonos-organicos&Itemid=0 (Junio, 2015)
14. Food Administration Organization (FAO). (2002). *Los fertilizantes y su uso*. (4ta. ed.). Roma, Italia: IFA.
15. Food Administration Organization (FAO). (2011). *Manual de biogás*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf> (Enero, 2015)

16. Ford, A. (2007). *Advances in Biogas*. (1ra. ed.). USA: Pira International Ltd.
17. Forster, T., Isaac, R., Pérez, M. y Schwartz, C. (2012). *Biogas Production: Pretreatment Methods in Anaerobic Digestion*. doi: 10.1002/9781118404089
18. Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. (3ra. ed.). México: Compañía Editorial Continental.
19. Gerardi, M. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. (1ra. ed.). New Jersey, EEUU: Wiley interscience.
20. Huang, G., Wong, J., Wu, Q. y Nagar, B. (2004). Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. *Waste Management*, 24, 805–813.
21. Huayla, R. (2006). Manual de elaboración de abono foliar biol. *Asociación Especializada para el Desarrollo Sostenible (AEDES)*. 1(11), 1-14.
22. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). (2005). *Recomendaciones Técnicas para la Gestión Ambiental en el Manejo de Purines de la Explotación Porcina*. Recuperado de www.asprocer.cl/index/download.asp?tipo=1&carpeta=archivos (Febrero, 2015)
23. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). (2012). *Buenas Prácticas Pecuarias (BPP) para la producción y comercialización porcina familiar*. Recuperado de www.fao.org/3/a-i2094s.pdf (Febrero, 2015)
24. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Recuperado de

www.idae.es/.../documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846 (Enero, 2015)

25. Instituto para una Alternativa Agraria (IAA) y Universidad politécnica de Catalunya (UPC). (2005). *Manual de instalación de un biodigestor familiar tipo manga para zonas alto- andinas*. Perú: Foxit reader.
26. Magaña, R., Torres, E., Martínez, M., Sandoval, C. y Hernández, R. (2006). Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras. *Acta Universitaria*. 16 (2), 27-37.
27. Mantilla, J., Duque, C. y Galeano, C. (2007). Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno. *Revista ingeniería e investigación*, 27 (3), 133-142.
28. Martí, J. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. Recuperado de www.bivica.org/upload/biodigestores-familiares.pdf (Marzo, 2015)
29. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD), Asociación de porcicultores de Ecuador (ASPE). (2010). *Encuesta nacional sanitaria de granjas de ganado porcino*. Recuperado de www.agrocalidad.gob.ec/.../7%20Informe%20Encuesta%20Nacional%20 . (Enero, 2015)
30. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca De La Nación (MAGyP). (2013). Estudio de cadenas pecuarias de Ecuador, recuperado de www.agroindustria.gob.ar/...Estudio%20del%20mercado%20cárnico%20 (Enero, 2015)

31. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2010). *Tecnologías sostenibles para el manejo de remanentes en granjas porcinas*. Recuperado de www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00277.pdf (Enero, 2015)
32. Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2016). Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente (TULSMA). Recuperado de: <http://suia.ambiente.gob.ec/documents/10179/185880/ACUERDO+061+REFORMA+LIBRO+VI+TULSMA++R.O.316+04+DE+MAYO+2015.pdf/3c02e9cb-0074-4fb0-afbe-0626370fa108> (Abril, 2016)
33. Ocaña, J. (2011). *Biodigestor anaerobio de laboratorio* (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
34. Ojeda, T. y Soto, J. (2007). Arranque y operación de un biodigestor anaerobio para tratamiento de excretas porcinas. V Congreso internacional de ingeniería bioquímica. México. Recuperado de http://www.informatica.sip.ipn.mx/colmex/congresos/chiapas/cd/Tecnologia_ambiental%5CExtensos%5C311636.pdf (Mayo, 2015)
35. Regueiro, L., Carballa, M., Alvarez, J. y Lema, J. (2012). Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates. *Bioresource technology*, 123, 507-513.
36. Rodríguez, I., Regueiro, L., Carballa, M., Hospido, A. y Lema, J. (2014). Assessing anaerobic co-digestion of pig manure with agroindustrial wastes: The link between environmental impacts and operational parameters. *Science of the total environment*, 497-498, 475-483.
37. Rosenberg, J., Epstein, L. y Krieger, P. (2007). Química. (9 na. ed.) México: Mc Graw Hill.

38. Sáez, A. (2012). Apuntes de estadística para ingenieros. Recuperado de <http://www4.ujaen.es/~ajsaez/recursos/EstadisticaIngenieros.pdf> (Junio, 2015)
39. Samayoa, S., Bueso, C. y Víquez, J. (2012). *Implementación de sistemas de biodigestión en eco empresas*. (1ra. ed.). Honduras: SNV.
40. Schnürer, A. y Jarvis, A. (2010). *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Canada: Svenskt Gastekniskt Centre AB.
41. Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. y Janssen, R. (2008). *Biogas handbook*. Recuperado de: <http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf> (Diciembre, 2014)
42. Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC). (2002). *Guía ambiental para el subsector porcícola*. Recuperado de: www.siame.gov.co/siame/documentos (Marzo, 2015)
43. Sociedad Española de Agricultura Ecológica (SEAE). (2008). *La fertilización y el balance de nutrientes en sistemas agroecológicos*. Recuperado de www.agroecologia.net/recursos/.../manual-fertilizacion-fpomares.pdf (Abril, 2015)
44. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2003). *Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás*. Recuperado de: http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_ternativas/normalizacion/GUIA_PARA_LA_IMPLEMENTACION_DE_SISTEMAS_DE_PRODUCCION_DE_BIO.pdf (Junio, 2015)
45. Xie, S., Wu, P., Lawlor, J., Frost, P. y Zhan, X. (2012). Methane production from anaerobic co-digestion of the separated solid fraction of pig manure with dried grass silage. *Bioresource technology*, 104, 289-297.

46. Zarkadas, I. y Piidis, A. (2011). Anaerobic Co-Digestion of table olive debittering & washing Effluent, cattle manure and pig manure in batch and high volume laboratory anaerobic digesters: Effect of temperature. *Bioresource technology*, 102 (8), 4995-5003.

ANEXOS

ANEXO I

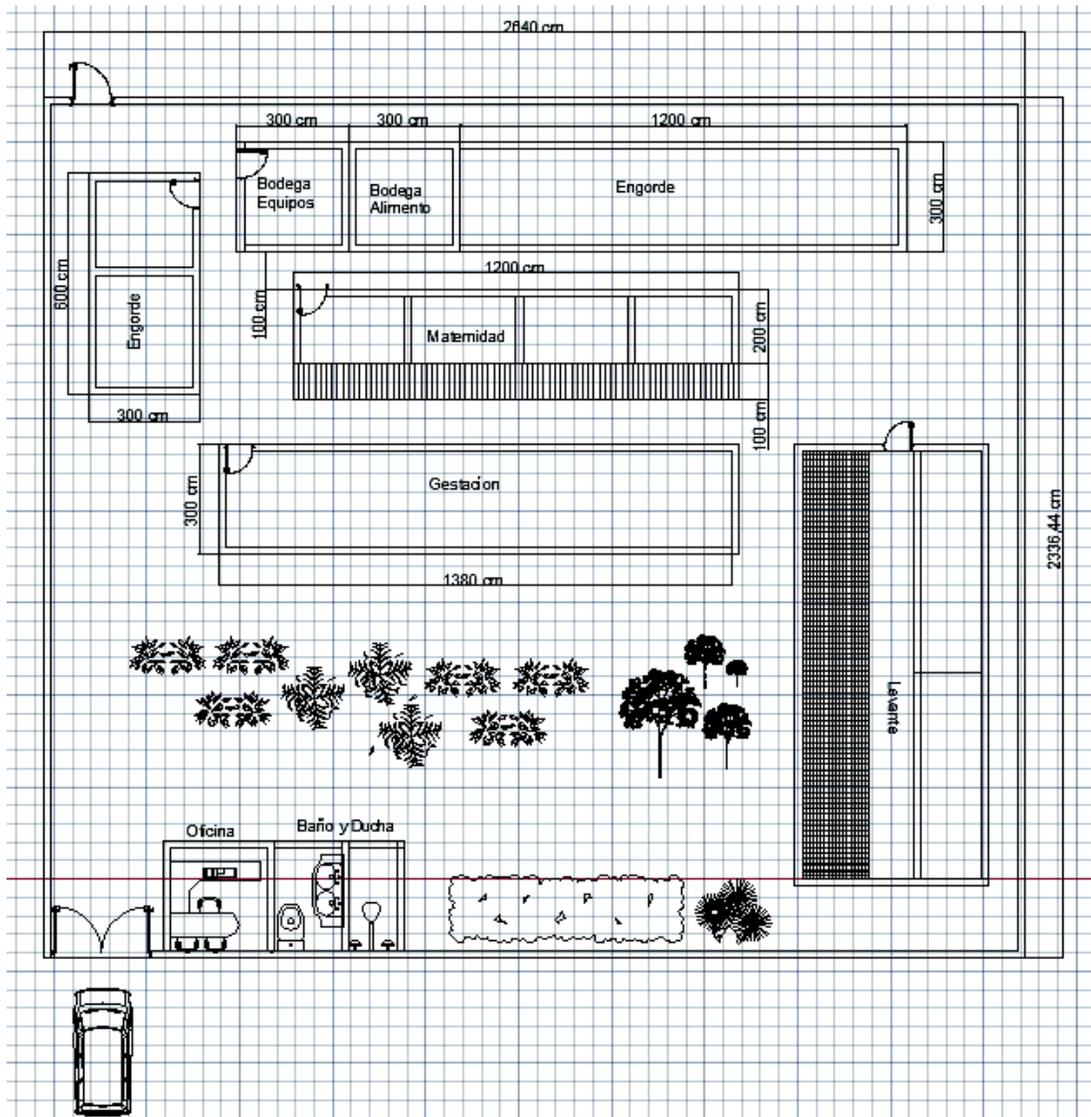
**CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA PERMISIBLES PARA LA
PRESERVACIÓN DE FLORA Y FAUNA**

Parámetros	Expresados como	Unidad	Límite máximo permisible		
			Agua fría dulce	Agua cálida dulce	Agua marina y de estuario
Clorofenoles	Concentración total de PCBs.	mg/l	0,5	0,5	0,5
Bifenilos policlorados/PCBs		mg/l	0,001	0,001	0,001
Oxígeno Disuelto	O.D.	mg/l	No menor al 80% y no menor a 6 mg/l	No menor al 60% y no menor a 5 mg/l	No menor al 60% y no menor a 5 mg/l
Potencial de hidrógeno	pH		6, 5-9	6, 5-9	6, 5-9, 5
Sulfuro de hidrógeno ionizado	H ₂ S	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002
Amoniaco	NH ₃	mg/l	0,02	0,02	0,4
Aluminio	Al	mg/l	0,1	0,1	1,5
Arsénico	As	mg/l	0,05	0,05	0,05
Bario	Ba	mg/l	1,0	1,0	1,0
Berilio	Be	mg/l	0,1	0,1	1,5
Boro	B	mg/l	0,75	0,75	5,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,001	0,001	0,005
Cianuro Libre	CN ⁻	mg/l	0,01	0,01	0,01
Zinc	Zn	mg/l	0,18	0,18	0,17
Cloro residual	Cl	mg/l	0,01	0,01	0,01
Estaño	Sn	mg/l			2,00
Cobalto	Co	mg/l	0,2	0,2	0,2
Plomo	Pb	mg/l			0,01
Cobre	Cu	mg/l	0,02	0,02	0,05
Cromo total	Cr	mg/l	0,05	0,05	0,05
Fenoles monohídricos	Expresado como fenoles	mg/l	0,001	0,001	0,001
Grasas y aceites	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3	0,3	0,3
Hierro	Fe	mg/l	0,3	0,3	0,3
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	0,5	0,5	0,5
Hidrocarburos	Concentración	mg/l	0,0003	0,0003	0,0003

Parámetros	Expresados como	Unidad	Límite máximo permisible		
			Agua fría dulce	Agua cálida dulce	Agua marina y de estuario
aromáticos policíclicos (HAPs)	total de HAPs				
Manganeso	Mn	mg/l	0,1	0,1	0,1
Materia flotante	visible		Ausencia	Ausencia	Ausencia
Coliformes Fecales	nmp/100 ml		200	200	200

ANEXO II

DISTRIBUCIÓN DE LA GRANJA PORCINA AGROINPORC



ANEXO III

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

pH

Pesar, en un vaso de 100 ml, 20 g de suelo con una balanza de precisión.

Agregar 50 ml de agua destilada fresca. Es preferible trabajar si es posible con agua desmineralizada, sino se debe hacer hervir el agua destilada, para eliminar el CO₂ disuelto.

Agitar la mezcla con una varilla de vidrio.

Dejar en reposo durante una hora, agitando cada 15 minutos.

Efectuar la lectura con el potenciómetro. Obtenemos el pH del agua.

MATERIA ORGÁNICA

3.1.1. Principio

La oxidación, en frío, del carbón por un exceso de dicromato de potasio en medio sulfúrico. Después dosificación del dicromato no consumido con la sal de morh.

3.1.2. Materiales

Balanza analítica.
Erlenmeyers de 500 ml.
Buretas de precisión de 25 ml.
Pipetas de diferentes volúmenes.
Probetas.
Vasos.
Cronómetro.

3.1.3. Reactivos

Ácido sulfúrico concentrado.

Ácido ortofosfórico concentrado.

Solución de dicromato de potasio 1N.

Pesar muy precisamente, por medio de una balanza, 49.04 g de dicromato de potasio conservado en un desecador, verter en un balón aforado de 1000 ml, completar y aforar con agua destilada.

Difenilamina (indicador colorado)

Disolver 0.5 g de difenilamina en 100 ml de ácido sulfúrico concentrado, y verter en 20 ml de agua destilada. Conservar en frasco oscuro.

Solución sal de morh 0.5N

Pesar 139.01 g de sulfato de hierro II heptahidratado y agregar alrededor de 500 ml de agua destilada. Añadir 15 ml de ácido sulfúrico concentrado, mezclar y completar con agua destilada hasta 1000 ml.

Para determinar la normalidad de la sal de Morh; medir 5 ml de dicromato de potasio 1N, añadir 100 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico y 5 gotas de difenilamina. Titular con sal de Morh y calcular el factor de corrección de la normalidad.

3.1.4. Procedimiento

La muestra de suelo debe estar molida y libre de raicillas y restos de materia orgánica grandes para el efecto la muestra deberá ser tamizada sobre papel encerado (tamiz de 0.25 mm).

Pesar 0.1 g de suelo cuando existe mucha materia orgánica y 0.5 g cuando el suelo tiene poca materia orgánica.

Agregar 5 ml de dicromato de potasio 1 normal por muestra y añadir 10 ml de ácido sulfúrico concentrado al 97% por muestra.

Agitar muy suavemente durante un minuto a fin de homogenizar, evitando que la muestra se adhiera a las paredes.

Dejar en reposo durante 30 minutos. Luego de ese tiempo agregar en el siguiente orden, 100 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico al 85% y 10 o 15 gotas de difenilamina.

Titular el exceso de dicromato por medio de la solución sal de morh de concentración 0.5 N.

El viraje de color se hace azul hasta verde, anotar el volumen consumido.

Siempre se analizará un blanco siguiendo el mismo procedimiento con la muestra.

3.1.5. Cálculos

Así:

V_0 , volumen gastado en la titulación del blanco.

V , volumen gastado en la titulación del blanco.

N , normalidad exacta del sulfato de hierro.

0.39, peso químico equivalente del carbono.

1.72, constante de conversión de C a MO sobre la hipótesis de la materia orgánica contiene 58% de C en la generalidad de los suelos encontrados en el Ecuador.

1.1, error de conversión de C a MO (10%).

PM , peso de muestra de suelo.

F , factor de corrección de la sal de morh.

Entonces:

$$\frac{(V_0 - V) \times N \times 0.39}{PM} = \% \text{ Carbón total de muestra seca al aire}$$

$$\frac{(V_0 - V) \times N \times 0.39 \times 1.72 \times 1.1}{PM} = \% \text{ Materia orgánica}$$

2.1. Determinación de la humedad

2.2. Objetivo

La determinación de la humedad de un suelo, puede tener mucha utilidad de acuerdo al criterio específico del técnico que realice el trabajo. Además, se debe considerar que los resultados a obtener representan únicamente el contenido de humedad del suelo en el momento del muestreo.

2.2.1. Principio

Secamiento del suelo a la estufa a 105°C y por pesada, determinación del porcentaje de agua contenida

2.2.2. Equipo

- Cápsulas de 20-30 ml de contenido con tapas. De preferencia utilizar cápsulas de diámetro ancho a efecto de facilitar la desecación de la muestra. Que las cápsulas sean de vidrio o metal no importa
- Balanza analítica de precisión.

2.2.3. Procedimiento

Operar sobre las muestras inmediatamente después de llegar al laboratorio.

Verificar que las fundas que contengan las muestras se encuentren herméticamente cerradas. En caso contrario, los resultados encontrados no tendrán ningún valor.

Se debe tener lista una serie de cápsulas taradas y numeradas de manera indeleble (no olvidar numerar también las tapas a fin de evitar eventuales equivocaciones).

Preparar en el cuaderno la lista de las muestras que vamos a procesar, con los números de cápsulas correspondientes.

Instalar las muestras en el mismo orden que en el cuaderno, así como las cápsulas con sus tapas para evitar equivocaciones en las numeraciones.

Abrir la primera funda y con ayuda de una espátula o cuchara, llenar la cápsula con la muestra. Tratar de tomar la muestra en varias tomadas y no de una sola. Cerrar la cápsula inmediatamente con su tapa.

Proceder así toda la serie.

Pesar las cápsulas que contiene las muestras verificando la limpieza de las paredes exteriores. Anotar los pesos en el cuaderno.

Abrir las cápsulas e introducir las en la estufa a 105°C por 24 horas. Cuidar de no perder muestra durante esta manipulación.

Si no disponemos de una estufa ventilada, asegúrese que los orificios de ventilación no estén tapados.

Sacar las cápsulas de la estufa y taponarlas inmediatamente sin perder muestra.

Pasar a un desecador y dejar enfriar por 30 minutos. Pesar sobre la misma balanza y registrar el peso en el cuaderno.

Conservar las muestras en las cápsulas hasta haber terminado los cálculos.

2.2.4. Cálculos

Así:

Pc, peso de la cápsula vacía.

Ph, peso de la cápsula más la muestra húmeda.

Ps, peso de la cápsula más la muestra seca.

Entonces:

$$\frac{(PH - Ps)}{Ps - Pc} \times 100 = \% \text{ humedad a } 105^{\circ}\text{C}$$

SOLIDOS TOTALES, FIJOS Y VOLÁTILES

Método Gravimétrico

1. OBJETIVO

Esta normativa técnica se utiliza para la determinación de sólidos totales, volátiles y fijos en aguas, afluentes industriales y domésticos. El análisis de sólidos volátiles puede ser empleado en el control de las plantas de tratamientos de efluentes porque ofrecen una estimación de la cantidad de materia orgánica presente.

2. DEFINICION

- 2.1 Los sólidos totales son los residuos resultantes luego de la evaporación y secado de la muestra en una estufa a 103-105°C. Los sólidos totales incluyen volátiles y fijos.
- 2.2 Los sólidos fijos son los residuos resultantes luego de calcinar la muestra a 550±50 °C.
- 2.3 Los sólidos volátiles corresponden a los compuestos perdidos durante la calcinación a 550±50 °C. Se determinan por diferencia de peso entre sólidos totales y fijos.

3. MUESTREO Y PRESERVACION DE LA MUESTRA

Recolectar la muestra en envases de vidrio o plástico de 1 L de capacidad. Refrigerar a 4°C. Analizar antes de los 7 días.

4. EQUIPOS Y MATERIALES

- 4.1 Cápsulas de porcelana de 90 mm de diámetro.
- 4.2 Baño de agua, con soporte para las cápsulas
- 4.3 Estufa para operar a 103-105°C.
- 4.4 Mufla para operar a 550 ± 50°C.
- 4.5 Desecador conteniendo un desecante con indicador coloreado de humedad.
- 4.6 Balanza analítica de precisión 0.1 mg.
- 4.7 Probetas

4. EQUIPOS Y MATERIALES

- 4.1 Cápsulas de porcelana de 90 mm de diámetro.
- 4.2 Baño de agua, con soporte para las cápsulas
- 4.3 Estufa para operar a 103-105°C.
- 4.4 Mufla para operar a 550 ± 50°C.
- 4.5 Desecador conteniendo un desecante con indicador coloreado de humedad.
- 4.6 Balanza analítica de precisión 0.1 mg.
- 4.7 Probetas

5. PROCEDIMIENTO

5.1 Preparación de cápsulas:

Colocar las cápsulas en mufla a $550 \pm 50^\circ\text{C}$ durante 1 hora. Dejar enfriar en desecador y pesar antes de su uso.

5.2 Determinación:

a) Tomar un volumen de muestra homogeneizada que de un residuo seco entre 2.5 y 200 mg. Verter el volumen medido en la cápsula preparada y evaporar en el baño de agua a sequedad. Evitar pérdidas de la muestra por ebullición.

b) Secar la muestra en estufa a $103-105^\circ\text{C}$ durante 1 hora. Enfriar en desecador y pesar. Repetir el ciclo de secado, enfriado en desecador y pesado hasta que se obtenga peso constante o que la pérdida de peso sea menor al 4 % que el peso previo o menos de 0.5 mg (el que sea menor).

c) Calcinar la muestra en mufla a $550 \pm 50^\circ\text{C}$ durante 1 hora. Enfriar en desecador y pesar. Repetir el ciclo de secado, enfriado en desecador y pesado hasta que se obtenga peso constante o que la pérdida de peso sea menor al 4 % que el peso previo o menos de 0.5 mg (el que sea menor).

6. CALCULOS Y EXPRESION DE RESULTADOS

$$ST, \text{ mg/L} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V}$$

$$STF, \text{ mg/L} = \frac{(P_3 - P_1) \times 1000}{V}$$

$$STV, \text{ mg/L} = ST - STF$$

donde:

ST = sólidos totales en mg/L

STF = sólidos totales fijos en mg/L

STV = sólidos totales volátiles en mg/L

P1 = peso de la cápsula preparada en mg.

P2 = peso de la cápsula más el residuo seco a $103-105^\circ\text{C}$ en mg.

P3 = peso de la cápsula más el residuo calcinado a 550°C en mg.

V = volumen de muestra tomado en mL.

Nitrógeno total

Para obtener el nitrógeno total en porcentaje, multiplicar el porcentaje de materia orgánica por 0.05, conociendo que el nitrógeno total es el 5% de la materia orgánica como promedio.

$$\%M.O. \times 0.05 = \% \text{ Nitrógeno Total}$$

Nitratos

3.2.1. Principio

El ácido fenol disulfónico produce con los nitratos un complejo amarillo muy estable que puede determinarse por métodos colorimétricos.

3.2.2. Equipos

Agitador rotativo.
Fotómetro Genesys 20.
Matraces de 125 ml y 50 ml.
Pipetas de diferentes volúmenes.
Refrigerador.

3.2.3. Reactivos

Óxido de calcio en polvo.

Ácido fenol disulfónico

Pesar 25 g de fenol en 150 ml de ácido sulfúrico concentrado. Añadir 75 ml de ácido piro-sulfúrico fumeante bajo campana extractora. Mezclar la solución y calentar a baño maría a 100°C por lo menos dos horas (guardar en frasco oscuro y en refrigeración).

Solución de hidróxido de amonio (2:1)

Diluir 2 volúmenes de hidróxido de amonio concentrado en un volumen de agua destilada concentrada.

3.2.4. Procedimiento

Pesar 5 g de suelo en un erlenmeyer de 125 ml. Añadir 0.1 g de CaO (para clarificar la muestra) y 25 ml de agua destilada.

Agitar por 10 minutos a 400 rpm (revoluciones por minuto).

Permitir que se decante 5 minutos y filtrar. Del filtrado tomar 5 ml en un erlenmeyer pequeño de 50 ml y evaporar toda la noche a sequedad a 80°C.

Enfriar y poner 1 ml de ácido fenol sulfónico, agitar vigorosamente y dejar reposar 15 minutos.

Añadir 24 ml de agua destilada y 5 ml de hidróxido de amonio (2:1) y agitar (presenta una coloración amarilla).

Leer en el colorímetro después de 15 minutos a una longitud de onda de 460 nm.

FÓSFORO

3.3.1. Principio

Extracción del fósforo por una solución alcalina (bicarbonato de sodio 0.5N, pH 8.5). Dosificación después por colorimetría a 660 nm con el reactivo sulfo-molibdico.

3.3.2. Equipos

Balanza analítica.
Embudos de papel filtro.
Fotómetro Genesys 20.
Pipetas de diferentes volúmenes.
Erlenmeyer de 50 ml.

3.3.3. Reactivos

Solución de bicarbonato de sodio (CO₃HNa) 0.5N de un pH 8.5.

Para dos litros de solución:

Pesar separadamente 84 g de bicarbonato de sodio PA y 7.44 g de EDTA sobre una balanza de precisión, posteriormente pasarlos a un balón aforado de 2 litros, aforar el balón con agua destilada, ajustar el pH a 8.5 con una solución de sosa concentrada.

Solución sulfo-molibdica

Pesar en la balanza de precisión 25 g de molibdato de amonio PA, pasar a un balón aforado de un litro y completar con una solución de ácido sulfúrico 10N, conservarlo en un frasco oscuro y mantenerlo en la obscuridad.

3.3.4. Procedimiento

Pesar 2.5 g de la muestra tamizada a 0.5 mm, colocar la muestra en matraces de 150 ml para posteriormente agregar 25 ml de la solución extractante (CO₃HNa).

Pasar la muestra a un agitador oscilante por 10 minutos.

Durante este tiempo, instalar el papel filtro sobre los vasos de precipitación 100 ml.

Filtrar la muestra tratando de hacer pasar el máximo de suelo sobre el filtro.

Preparar la solución indicadora de acuerdo a la cantidad de muestras analizadas. A continuación se observa una referencia para su preparación:

Ac. Ascórbico (g)	Molibdato de amonio (ml)	Aforamiento (ml)
0.05	7.5	50
0.10	15.0	100
0.20	30.0	200
0.25	37.5	250
0.50	75.0	500
1.00	150.0	1 000

Fuente: Agrocalidad, 2010

En un erlenmeyer de 50 ml agregamos en el siguiente orden 10 ml de agua, 2 ml de la muestra y 8 ml de la solución molibdato de amonio-ácido ascórbico.

Dejar desarrollar la coloración en el lapso de 20 a 30 minutos. Realizar la lectura en el fotómetro a 660 nm.

3.4. Determinación de Potasio

3.4.1. Principio

La determinación de este método está bien estudiada, existiendo métodos adecuados para su análisis.

La determinación de potasio se realizará utilizando el método de fotometría de llama, cuyas lecturas se efectúan en meq K/l solución.

3.4.2. Equipos

Balones de 1000 ml y 100 ml.

Fotómetro de llama.

Pipetas de diferentes volúmenes.

Vasos de precipitados de 150 ml

Vasos de precipitados plásticos de 50 ml

3.4.3. Reactivos

Solución de bicarbonato de sodio (CO_3HNa) 0.5N de un pH 8.5.

Para dos litros de solución:

Pesar separadamente 84 g de bicarbonato de sodio PA y 7.44 g de EDTA sobre una balanza de precisión, posteriormente pasarlos a un balón aforado de 2 litros, aforar el balón con agua destilada, ajustar el pH a 8.5 con una solución de sosa concentrada.

3.4.4. Procedimiento

Pesar 2.5 g de la muestra tamizada a 0.5 mm, colocar la muestra en matraces de 150 ml para posteriormente agregar 25 ml de la solución extractante (CO_3HNa).

Pasar la muestra a un agitador oscilante por 10 minutos.

Durante este tiempo, instalar el papel filtro sobre los vasos de precipitación 100 ml.

Filtrar la muestra tratando de hacer pasar el máximo de suelo sobre el filtro.

En un vaso de precipitado plástico agregar en el siguiente orden 19 ml de agua destilada, 1 ml de la muestra

A continuación procedemos a leer en el fotómetro de llama.

ANEXO IV

DISTRIBUCIÓN DE BIOGÁS A LAS LÁMPARAS DE
CALEFACCIÓN EN SALA DE MATERNIDAD Y CRÍA