

UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA
DE AMAZONAS

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

105



173 MAY 2013

0120

TESIS

"RENDIMIENTO DEL BIOGAS COMO COMBUSTIBLE PARA COCINA E
ILUMINACIÓN PRODUCIDO EN DIGESTOR TUBULAR EN EL DISTRITO
DE PROVIDENCIA, LUYA - AMAZONAS"

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

AUTOR:

Bach. JÓHMER JULCA NORIEGA

ASESOR:

Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

COASESOR:

Ing. HENRY HUAMÁN CUBAS

CHACHAPOYAS - AMAZONAS

2013

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

**RENDIMIENTO DEL BIOGAS COMO COMBUSTIBLE PARA COCINA E
ILUMINACIÓN PRODUCIDO EN DIGESTOR TUBULAR EN EL DISTRITO DE
PROVIDENCIA, LUYA – AMAZONAS**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

AUTOR : Bach. JÓHMER JULCA NORIEGA

ASESOR : Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

COASESOR : Ing. HENRY HUAMÁN CUBAS

CHACHAPOYAS – AMAZONAS, 2013

DEDICATORIA

Con mucho cariño a mis padres Juan José y Delia. A mis hermanos Reyver, Juanito y Glenis. A todos ellos por su esfuerzo y apoyo incondicional que me brindaron permanentemente y por ser el soporte de mi vida.

AGRADECIMIENTO

- A Dios por darme la vida, por ser él quien alumbra mis pasos en el transcurso de mi vida
- A mis padres por la ayuda económica y moral brindada para la realización de este trabajo de investigación, quienes depositaron en mí su confianza lo cual me permitió hacer realidad una de mis grandes metas, el ser profesional.
- A la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, mi *Alma Mater* porque en sus aulas me formé como profesional.
- A los Docentes de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias de mi *Alma Mater*, por sus conocimientos vertidos en mi preparación profesional y sobre todo a los que creen y apoyan a quienes persiguen su sueño de ser profesional.
- Al Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón, por su gentil colaboración y apoyo constante en el asesoramiento de este trabajo de investigación.
- A mi novia Monika Hellenthal, por su continuo apoyo durante la ejecución de mi tesis y por ser la persona muy importante en mi vida.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

Ph.D. Dr. Hab. VICENTE MARINO CASTAÑEDA CHÁVEZ

Rector

Dr. ROBERTO JOSÉ NERVI CHACÓN

Vicerrector Académico (*e*)

Dr. EVER SALOMÉ LÁZARO BAZÁN

Vicerrector Administrativo (*e*)

Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias

VISTO BUENO DEL ASESOR

El Docente de la UNTRM-A que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la tesis titulada **“RENDIMIENTO DEL BIOGAS COMO COMBUSTIBLE PARA COCINA E ILUMINACIÓN PRODUCIDO EN DIGESTOR TUBULAR EN EL DISTRITO DE PROVIDENCIA, LUYA - AMAZONAS”**, del egresado de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la UNTRM.

Br. Jöhmer, Julca Noriega

El Docente de la UNTRM-A que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión del Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones dadas por el Jurado Evaluador, para su posterior sustentación

Chachapoyas, de 13 febrero del 2013.



Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN
Profesor Principal de la FICA-UNTRM-Amazonas

VISTO BUENO DEL CO-ASESOR

El trabajador Administrativo de la UNTRM-A que suscribe, hace constar que ha co-asesorado la realización de la tesis titulada **“RENDIMIENTO DEL BIOGAS COMO COMBUSTIBLE PARA COCINA E ILUMINACIÓN PRODUCIDO EN DIGESTOR TUBULAR EN EL DISTRITO DE PROVIDENCIA, LUYA - AMAZONAS”**, del egresado de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la UNTRM.

Br. Jöhmer, Julca Noriega

El trabajador administrativo de la UNTRM-A que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión del Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones dadas por el Jurado Evaluador, para su posterior sustentación

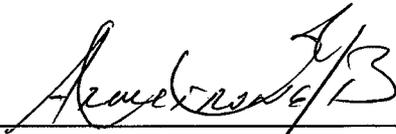
Chachapoyas, de 13 febrero del 2013.



Ing. HENRY HUAMAN CUBAS

CIP N° 120753

JURADO EVALUADOR



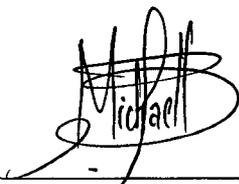
Ing. Ms.C. ARMSTRONG BARNARD FERNÁNDEZ JERI

Presidente



Ing. EFRAÍN MANUELITO CASTRO ALAYO

Secretario



Ing. POLITO MICHAEL HUAYAMA SOPLA

Vocal

TABLA DE CONTENIDOS

Contenido	pág.
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
AUTORIDADES DE LA UNTRM-AMAZONAS.....	iii
VISTO BUENO DEL ASESOR.....	iv
VISTO BUENO DEL COA-SESOR.....	v
JURADO EVALUADOR.....	vi
TABLA DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Estiércol.....	3
1.1.1. Relación carbono/nitrógeno.....	3
1.2. Biodigestor.....	4
1.2.1. Funcionamiento de los biodigestores.....	5
1.2.2. Alimentación de los biodigestores.....	5
1.2.1.1. Relación agua/estiércol.....	5
1.3. Fermentación anaeróbica.....	6

1.3.1. Etapas de la fermentación anaeróbica.....	7
1.3.1.1. Hidrólisis.....	7
1.3.1.2. Acidogénesis.....	7
1.3.1.3. Acetogénesis.....	8
1.3.1.4. Metanogénesis.....	8
1.3.2. Factores que influyen en la fermentación anaeróbica.....	9
1.3.2.1. Temperatura.....	9
1.3.2.2. Efecto del pH.....	10
1.4. Beneficio de los biodigestores.....	10
1.5. Biogas.....	12
1.5.1. Consumo de biogas.....	14
1.5.2. Biogas como fuente de energía térmica.....	14
1.5.3. Lámpara a biogas.....	15
II. MATERIAL Y MÉTODOS.....	17
2.1. Material.....	17
2.2. Métodos.....	17
2.2.1. Biodigestor.....	17
2.2.2. Caja de alimentación.....	18
2.2.3. Caja de descarga.....	19
2.2.4. Conducción de biogas.....	19
2.2.5. Cartucho para eliminar el H ₂ S.....	20
2.2.6. Válvula de seguridad.....	21
2.2.7. Manómetro.....	22

2.2.8. Gasómetro.....	23
2.2.9. Cocina a biogas.....	24
2.2.10. Lámpara a biogas.....	24
2.2.11. Determinación del rendimiento del biogas para cocina e iluminación.....	25
III. RESULTADOS.....	26
3.1. Cálculo de composición de la mezcla estiércol-agua	26
3.2. Determinación de la cantidad de fierro para eliminar el H ₂ S.....	28
3.3. Cálculo de la alimentación diaria del biodigestor	29
3.4. Evaluación de potencial energético y de saneamiento ambiental de la producción de biogas	30
3.5. Rendimiento de biogas para cocina.....	34
3.6. Rendimiento de biogas para lámpara.....	37
IV. DISCUSIÓN.....	39
V. CONCLUSIONES.....	42
VI. RECOMENDACIONES.....	43
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
ANEXOS.....	47

ÍNDICE DE ANEXO

ANEXO 1: Secuencia fotográfica para la construcción de la casa y la zanja donde se instalará el biodigestor.....	48
ANEXO 2: Instalación del biodigestor con el Asesor, Coa-sesor y la Ing. Monika Hellenthal de la HAWK Alemania.....	49
ANEXO 3: Alimentación del biodigestor y producción de biogas.....	52
ANEXO 4: Instalación de la tubería para conducir el biogas hasta la vivienda.....	53
ANEXO 5: Preparación de alimentos para el consumo de una familia y funcionamiento de la lámpara a biogas.....	55
ANEXO 6: Aplicación de biol producido en el digestor.....	57
1. Bioabono.....	57
1.1. Uso del biol.....	57
1.2. Aplicaciones del fertilizante.....	60
1.3. Cultivo de café.....	60
1.3.1. Instalación de parcelas de café.....	60
1.3.2. Efecto del biol sobre las plantas de café.....	61
ANEXO 7: Secuencia fotográfica de la instalación de parcelas de café.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación carbono/nitrógeno de algunos residuos de interés.....	4
Tabla 2. Valores promedio de producción de estiércol de acuerdo al tipo de especie animal.....	6
Tabla 3. Rango de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.....	9
Tabla 4. Composición química del biogas.....	13
Tabla 5. Equivalencia energética del biogas.....	15
Tabla 6. Formato de registro diario de tiempo de cocción de alimentos en la cocina a biogas.....	35
Tabla 7. Formato de registro diario de tiempo de iluminación con lámpara a biogas.....	37
Tabla 8. Composición química del biol, proveniente de estiércol (BE).....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Combustibles empleados para cocinar en la Región de Amazonas.....	2
Figura 2. Tiempo diario de cocción de alimentos.....	36
Figura 3. Tiempo de iluminación (horas) por día, con lámpara a biogas.....	38

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Caja de alimentación y descarga de biosol del biodigestor.....	18
Fotografía 2. Cartucho para eliminar el H ₂ S del biogas.....	20
Fotografía 3. Llenado del manómetro con agua.....	22
Fotografía 4. Gasómetro instalado en el sistema de producción de biogas.....	23
Fotografía 5. Cocina a biogas.....	24
Fotografía 6. Lámpara a biogas.....	25
Fotografía 7. Preparación de la alimentación del biodigestor.....	27
Fotografía 8. Lugar donde se instaló el biodigestor.....	48
Fotografía 9. Trazo de la zanja donde se instaló el biodigestor.....	48
Fotografía 10. Ubicación de los postes que soportarán el techo.....	48
Fotografía 11. Excavación de la zanja de forma trapezoidal invertida.....	48
Fotografía 12. Techo de calamina para la protección de la luz solar directa.....	48
Fotografía 13. Techo y zanja de tipo trapezoidal terminada.....	48
Fotografía 14. Colocación de la manta en los laterales y aserrín en el piso.....	49
Fotografía 15. Colocación del biodigestor en la zanja.....	49
Fotografía 16. Conexión del biodigestor a la boca de carga. Similar se hizo en la descarga.....	49
Fotografía 17. Llave de paso de 2" para sacar el biosol del fondo del biodigestor.....	49
Fotografía 18. Conexión de la boca de descarga una llave de paso para sacar el biol.....	49
Fotografía 19. Conexión al biodigestor de la llave de salida del biogas.....	49
Fotografía 20. Armado de los cartuchos o filtros de 2" para eliminar el H ₂ S.....	50
Fotografía 21. Colocación de esponja de fierro en el extremo del cartucho de 2".....	50
Fotografía 22. Cerrado del cartucho con reducción de 2" a 1/2".....	50

Fotografía 23. Fijación de los cartuchos en un bastidor de madera.....	50
Fotografía 24. Controlador de presión hecho de botella descartable y agua. La rama de la tubería está sumergida 10 cm.....	50
Fotografía 25. Construcción de un manómetro para medir la presión.....	50
Fotografía 26. Construcción del altillo para colocar el gasómetro.....	51
Fotografía 27. Protección del altillo con una manta para colocar el gasómetro.....	51
Fotografía 28. Gasómetro colocado en el altillo de madera.....	51
Fotografía 29. Cartuchos y manómetro instalados en el bastidor.....	51
Fotografía 30. Recolección de estiércol de ganado vacuno.....	52
Fotografía 31. Preparación de la mezcla estiércol-agua (1:5).....	52
Fotografía 32. Alimentación del biodigestor con la mezcla estiércol-agua.....	52
Fotografía 33. Biodigestor lleno hasta el 75% de su volumen con mezcla estiércol-agua.....	52
Fotografía 34. Producción de biogas en el biodigestor a los 14 días.....	52
Fotografía 35. Biodigestor lleno de biogas a los 20 días.....	52
Fotografía 36. Salida del biogas.....	53
Fotografía 37. Cartucho o filtro con clavos de fierro para eliminar el H ₂ S.....	53
Fotografía 38. Manómetro con agua que sirve para medir la presión del sistema.....	53
Fotografía 39. Conexión de la llave de paso que conduce el biogas hacia el gasómetro.....	53
Fotografía 40. Gasómetro lleno con biogas.....	53
Fotografía 41. Llave de paso en la tubería que conduce el biogas hacia la vivienda.....	53
Fotografía 42. Conducción del biogas por tubería de PVC de 1/2" hasta la vivienda.....	54
Fotografía 43. Cocina con quemadores industriales que funcionarán con biogas.....	54
Fotografía 44. Cocina instalada.....	54

Fotografía 45. Instalación de la lámpara que funcionará con biogas.....	54
Fotografía 46. Pesado de los alimentos.....	55
Fotografía 47. Llama azul de la combustión del biogas.....	55
Fotografía 48. Bajando el arroz cocinado con biogas.....	55
Fotografía 49. Cocción de la papa con biogas.....	55
Fotografía 50. Cocción de plátano con biogas.....	55
Fotografía 51. Lenteja cocinado con biogas.....	55
Fotografía 52. Almuerzo preparado con biogas.....	56
Fotografía 53. Plantas de café de 2 meses de aplicación de biol.....	56
Fotografía 54. Plantas de café después de cuatro meses de aplicación de biol.....	56
Fotografía 55. Funcionamiento de la lámpara de camisola a biogas.....	62
Fotografía 56. Alumbrado de una vivienda con lámpara a biogas.....	62
Fotografía 57. Parcelas experimentales de café.....	63
Fotografía 58. Recolección del biol.....	63
Fotografía 59. Parcela 1, testigo de café, no se le aplicó biol.....	63
Fotografía 60. Parcela 2 de café a la que se le aplicó biol.....	63
Fotografía 61. Resultado de la parcela 1, después de 4 meses sin biol.....	63
Fotografía 62. Parcela 2, después de 4 meses de tratamiento con biol.....	63

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación fue determinar el rendimiento de biogas como combustible para cocina e iluminación producido en digestor tubular, en el distrito de Providencia, provincia de Luya, Departamento de Amazonas, ubicado a 1700 msnm, con una temperatura ambiente promedio de 20°C; para lo cual se instaló un biodigestor tubular de geomembrana de PVC de 6,70 m de largo por 1,27 m de diámetro, cargado hasta el 75% de su volumen con mezcla estiércol de ganado vacuno y agua en relación de 1:5. El biogas producido alcanzó una presión de 12 cm de agua a un tiempo de retención hidráulica de 20 días. Este biodigestor se conectó a un balón de almacenamiento del mismo material de 1,27 m de diámetro y 2 m de largo, para tener mayor volumen de biogas disponible, que se empleó como combustible para la cocción de 6 tipos de alimentos (arroz, papa, plátano, lenteja, carne guisada y sopa) en una cocina de dos hornillas durante un tiempo promedio de 4,5 horas, además el biogas se utilizó para e iluminación mediante una lámpara tipo petromax de camisola durante un tiempo promedio de 5,5 horas. La evaluación de la cocina y de la lámpara se realizó durante 5 días para cada una. La llama del biogas en la cocina fue azul, indicando combustión total sin producir humos irritantes, ni tizne en ollas ni paredes de la vivienda. Para mantener la producción de biogas y bioabonos, a partir del día 20 se alimentó diariamente el biodigestor con 320 L de mezcla estiércol-agua (1:5). El efluente del biodigestor fue el biol, fertilizante orgánico del que se aplicó 0,5 L directamente al follaje de cada planta de café y 0,5 L al suelo de cada planta, dos veces al mes, durante cuatro meses. El biol incrementó en 20% el desarrollo de las plantas de café con respecto al testigo.

Palabras clave: energía renovable, combustible ecológico, fertilización orgánica.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the yield of biogas as a fuel for cooking and lighting produced in a tubular digester. For this purpose a tubular biodigester of geomembrane of PVC with a length of 6.70 m and a diameter of 1.27 m was installed in the district of Providencia, the province of Luya, the department of Amazonas, located at 1700 meters above sea level, with an average ambient temperature of 20 ° C. It was loaded to 75 % of its volume with a mixture of cattle manure and water in a ratio of 1:5. The produced biogas reached a pressure of 12 cm of water column in a hydraulic retention time of 20 days. This digester was connected to a storage balloon of the same PVC-material with a diameter of 1.27 m and 2 m long, to have a bigger volume of biogas available, which is used as a fuel to cook 6 types of food (rice, potatoes, bananas, lentils, beef stew and soup) in a stove with two cooktops during an average time of 4.5 hours; the biogas was also used to light a lamp of the type Petromax during an average time of 5.5 hours. The evaluation of the kitchen and lamp was made for 5 days each. The flame of biogas in the kitchen was blue, indicating complete combustion without producing irritating smokes or soot on pots or walls of the house. To maintain the production of biogas and biofertilizers, the digester was fed daily with 320 L of the mixture of manure-water (1:5) since day 20. The effluent from the digester is called biol. Twice a month, during four months, 0.5 L of this organic fertilizer was applied directly to the foliage of each coffee plant and 0.5 L to the ground of each plant. The biol increased the development of the coffee plants by 20 % compared to the control plants.

Keywords: renewable energy, ecological fuel, organic fertilizer.

INTRODUCCIÓN

En la década de los 70 hubo un esfuerzo tangible para extender el uso de biodigestores en el medio rural. En ese momento, los tipos de reactores que más se construyeron fueron los hechos de ladrillos y concreto. Hasta 1982, se habían instalado más de siete millones de biodigestores en China, se emplean para producir energía como sustituto de combustible doméstico, en la iluminación, para generar electricidad, así como para obtener un fertilizante económico que beneficia a la familias (Kristoferson y Bokhalders, 1991).

Según el censo realizado a los hogares del Perú el año 2007, 3 751 930 (55,6%) hogares usan gas y 2 036 901 (30,2%) hogares usan leña, de los cuales en el área urbana 71,4% usan gas y solo el 15,2% usan leña en el área rural solo el 5,6% usan gas, el 77,4% usan leña y un 14,5% utilizan estiércol para producir energía. En la Región Amazonas de 90 645 hogares: 186 cocinan con electricidad, 20 741 cocinan con gas, 194 cocinan con kerosene, 416 cocinan con carbón, 65 711 hogares cocinan con leña, 30 hogares cocinan con estiércol, 21 hogares utilizan otras formas de energía y 3 346 hogares no cocinan y se muestran en la (Figura 1) (INEI, 2007).

Existen serios problemas ambientales asociados con la producción ganadera en condiciones de explotación intensiva, debido al problema de disposición de los residuales o excretas, entendiendo por las mismas, las heces fecales y la orina, que generalmente se mezcla también con el agua de limpieza y con residuos de comida (Vásquez, 2000).

En términos generales, la implementación de los biodigestores tubulares flexibles de polietileno ha surgido como alternativa para la producción de biogas a bajo costo. (Hernández, 1990). Otra alternativa es emplear biodigestores de geomembrana de PVC.

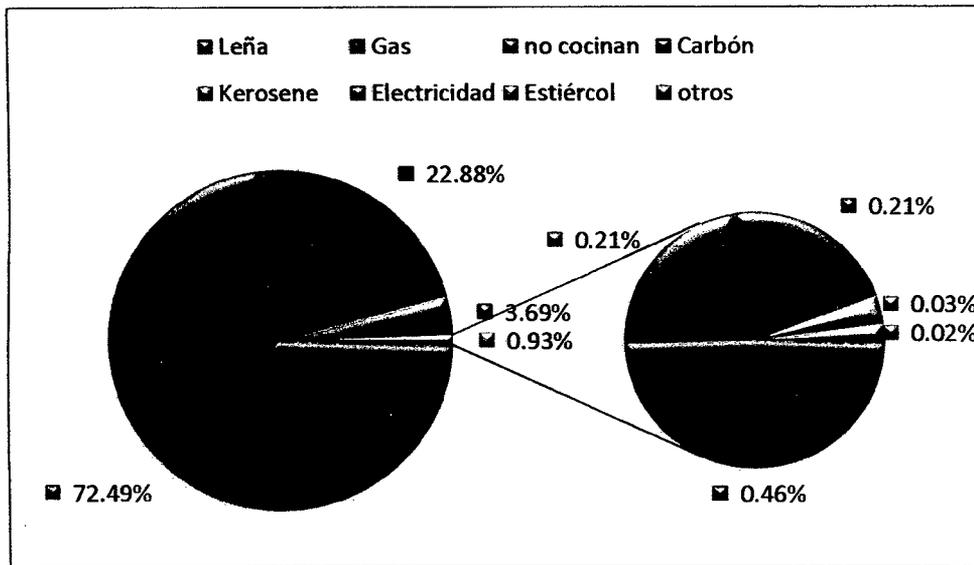


Figura 1. Combustibles empleados para cocinar en la Región de Amazonas.

Algunas de las ventajas de los biodigestores plásticos residen que se pueden construir con materiales locales y no son sofisticados. Por otra parte la construcción y el mantenimiento de estos digestores es fácil, rápida y sencilla, por lo que no requieren ningún adiestramiento especial. El uso de los biodigestores plásticos se ha extendido rápidamente en muchos países tropicales sobre todo a nivel experimental. (Chamy y Pizarro, 2004).

Hay dos tendencias para el tratamiento de excretas de animales, el aeróbico y el anaeróbico; ambos de naturaleza biológica. En el primero, el tratamiento ocurre en presencia de oxígeno y es un proceso oxidativo. En el segundo caso, el proceso es reductivo, y tiene lugar en ausencia de oxígeno (Fenlon y Robinson, 1977).

Por ello el objetivo principal de este trabajo de investigación es determinar el rendimiento de biogas como combustible para cocina e iluminación producido en digestor tubular, en el distrito de Providencia, provincia de Luya, Departamento de Amazonas y proponer un

medio para mejorar la calidad de vida de los agricultores aplicando una tecnología adecuada para reducir la contaminación ambiental a causa del estiércol.

1.1. Estiércol

Los estiércoles son evacuaciones del tracto intestinal de los animales producto de la digestión de sus alimentos. Se incorporan al suelo, bien directamente o después de algún tipo de procesamiento como el que se aplica al estiércol de los animales de granja y a los purines.

1.1.1. Relación carbono/nitrógeno

La relación carbono/nitrógeno constituye un aspecto de gran importancia en la fermentación anaeróbica. Las materias primas ricas en carbono producen más biogas que las ricas en nitrógeno; sin embargo, es más rápida la producción de biogas a partir de materias nitrogenadas (excretas) que las ricas en carbono (pajas y tallos). Por tanto, para obtener a la vez un alto rendimiento de producción de biogas y una velocidad de generación constante, es necesario partir de materias primas con una relación C/N adecuada, una relación de 20:1 hasta 30:1 resulta ideal. El carbono reducido actúa como fuente de energía y es utilizado para el crecimiento celular. El nitrógeno es importante por dos razones, se incorpora a la célula en forma de proteína, y actúa en forma libre para controlar el pH a través de su incorporación con el sistema buffer del carbonato (Guardado, 2008).

Tabla 1. Relación carbono/nitrógeno de algunos residuos de interés.

Residuos	Relación carbono/nitrógeno
Estiércol de vacuno	25
Estiércol de búfalo	20
Estiércol de porcino	13
Excreta humana	8
Estiércol avícola	5

Fuente: (Guardado, 2008).

1.2. Biodigestor

El biodigestor o simplemente digestor, consiste en una cámara cerrada, hermética e impermeable, que proporciona condiciones anaeróbicas para la fermentación del sustrato (excretas animales y humanas, desechos vegetales u otros) compuesto de agua, materia orgánica y minerales disueltos, para la producción de biogas (Coto y Maldonado, 2005).

El biodigestor debe permanecer preferentemente a una temperatura constante, de 35°C, que es la óptima para que las bacterias anaerobias vivan y realicen su trabajo eficientemente. El proceso tendrá una duración aproximada de 20 a 60 días, dependiendo de la temperatura a la cual se trabaje, mientras más cerca de los 35°C, más rápida será la producción de biogas (Chamy y Pizarro, 2004).

1.2.1. Funcionamiento de los biodigestores

Los biodigestores pueden hacerse funcionar adicionando materia orgánica como estiércol de animales, excremento humano u otros desperdicios de la producción ganadera y mataderos, así como desperdicios agrícolas.

Los residuos orgánicos como basura de cocina, restos vegetales y animales, aguas hervidas, aserrines, virutas y excremento son adecuados para ser fermentados anaeróbicamente.

1.2.2. Alimentación de los biodigestores

Una vez instalado el biodigestor se debe alimentar con estiércol y agua diariamente, para garantizar la producción diaria de biogas y bioabonos, lo que puede darse entre 20 a 60 días dependiendo de las condiciones climáticas, de la cantidad y el tipo de estiércol adicionado (Chamy y Pizarro, 2004).

1.2.2.1. Relación agua/estiércol

La proporción de agua y estiércol que se recomienda es de cuatro partes por una parte de estiércol (relación 4:1). La proporción puede ser hasta de 10 partes de agua por 1 de estiércol, dependiendo del número de animales y de la especie. La cantidad y composición de estiércol producido por diferentes especies del animal varía con el peso del animal, la cantidad y la calidad del alimento que consume (Martí, 2008).

Tabla 2. Valores promedio de producción de estiércol de acuerdo al tipo de especie animal.

Especie animal	Estiércol producido (kg/100 kg de peso vivo)
Bovino para carne o doble propósito	6
Bovino lecheros	8
Equino, mular o asnal	7
Oveja y cabra	4
Cerdo	4
Conejo o cuy	3

Fuente: (CVC y GTZ, 1987).

El estiércol del ganado bovino requiere mayor cantidad de agua por kilogramo de material para que las bacterias trabajen mejor y evitar que el material no se solidifique dentro del biodigestor. Por el contrario el estiércol del cerdo requiere menor cantidad de agua ya que es más metanogénico y las bacterias trabajan o procesan más rápido el material.

1.3. Fermentación anaeróbica

La fermentación o digestión anaeróbica es uno de los procesos más antiguos y tradicionales para tratar los lodos de desagüe. Es importante debido a su capacidad para producir metano a partir de este lodo, que se constituye en una fuente alternativa de energía limpia frente a los limitados combustibles fósiles. Generalmente, cuatro

etapas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) están comprendidas en la digestión anaeróbica; siendo la hidrólisis la etapa limitante de velocidad. Esto se debe a que la hidrólisis de la biomasa del lodo es limitada por la accesibilidad restringida de las enzimas extracelulares de las bacterias hidrolizantes, a los materiales poliméricos, los cuales están protegidos por las membranas celulares (Rong y Deokjin, 2006).

1.3.1. Etapas de la fermentación anaeróbica

1.3.1.1. Hidrólisis

Las bacterias por lo general solo tienen la habilidad de metabolizar material orgánico que es licuado o solubilizado a polímeros o monómeros de bajo peso molecular. Esta licuefacción ocurre a través de la acción de las exo-enzimas de las bacterias hidrolíticas. Estas bacterias pueden ser clasificadas en lipolíticas, proteolíticas y celulolíticas. La velocidad de licuefacción está determinada por la biodegradabilidad del sustrato (composición química) y la naturaleza física (tamaño de las partículas, la accesibilidad por las enzimas y también la temperatura) (Guardado, 2008).

1.3.1.2. Acidogénesis

Durante la acidogénesis los productos de la hidrólisis (ácidos grasos de cadenas largas, azúcares y alcoholes) son metabolizados intracelularmente por bacterias hidrolíticas y no hidrolíticas. Los

productos principales son acetato, propionato, butirato, H_2/CO_2 . Otros subproductos en menor cantidad son por ejemplo lactato, metanol y etanol. Debido a que los ácidos grasos volátiles son el mayor producto de la fermentación de estas bacterias ellas son denominadas bacterias acidificantes o acidogénicas. Estas bacterias son resistentes a pH bajo lo que hace posible la formación de ácidos a un pH como 4 (Guardado, 2008).

1.3.1.3. Acetogénesis

Las bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno son responsables o necesarias para la oxidación de los productos finales de la acidogénesis a sustratos hábiles para la metanogénesis. Las bacterias acetogénicas deben estar obligatoriamente acopladas a bacterias que utilicen el hidrógeno, tales como las metanógenas o sulfato reductoras, de manera que entre ellas existe una asociación sintrófica (Guardado, 2008).

1.3.1.4. Metanogénesis

En la etapa final de la fermentación anaeróbica, las bacterias metanogénicas producen metano y CO_2 . Estas bacterias pueden ser clasificadas en dos grupos: las bacterias llamadas acetoclásticas convierten el acetato, y las otras bacterias que utilizan hidrógeno se llaman hidrogenofilicas. Generalmente, 70-80% del metano formado a partir de los materiales orgánicos son originados a partir del

acetato. El resto es mayormente derivado a partir del H₂ y CO₂ (Guardado, 2008).

1.3.2. Factores que influyen en la fermentación anaeróbica

1.3.2.1. Temperatura

El efecto de la temperatura es de gran importancia en el proceso de digestión anaeróbica, ya que altera la actividad de las enzimas y por tanto, varía la velocidad de crecimiento de los microorganismos. La gama de temperatura para el proceso de digestión varía entre 10 y 60°C. Sin embargo, las dos temperaturas óptimas son la mesófila (30 y 45°C) y la termófila (45 - 60°C). Casi todos los digestores funcionan dentro de los límites de temperatura mesófila, siendo 35°C la óptima para la digestión, si la temperatura está por debajo de 20°C, habrá una disminución en el biogas. (Gunnerson y Estuckey, 1986).

Tabla 3. Rango de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.

Fermentación	Mínimo	Optimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrofílica	4-10	15-18	25-30	> 100 días
Mesofílica	15-20	28-33	35-45	30-60 días
Termofílica	25-45	50-60	75-80	10-15-días

Fuente: (OEKOTOP, 1987).

1.3.2.2. Efecto del pH

El pH óptimo para la digestión está entre 6,8 y 7,6, lográndose mantener el equilibrio ecológico requerido. Valores inferiores a 6,5 representan el comienzo de la inhibición y a menores de 4,5 se detiene el proceso fermentativo. Cuando el pH está por debajo de 6,5 se puede aplicar hidróxido de calcio (cal apagada) para aumentar el pH y crear un ambiente más favorable en el interior del biodigestor (Obando y Cabezas, 1991).

1.4. Beneficio de los biodigestores

Entre los más importantes beneficios al utilizar biogas tenemos (CIPAV, 1995 y Guardado, 2008).

- Tratar totalmente los desechos orgánicos o residuales contaminantes, por lo que se elimina su efecto perjudicial para la salud, los malos olores y la contaminación del entorno.
- Emplear el biogas en las necesidades energéticas para la cocción de alimentos, en el hogar o en comedores, y eliminar así el empleo de kerosene (luz brillante), petróleo, leña o cualquier combustible que se use comúnmente.
- Aprovechar el biogas para el alumbrado de viviendas que requieren iluminación nocturna, lo que sustituye el empleo de energía eléctrica.

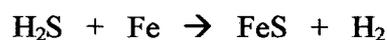
- La digestión anaerobia reduce la viscosidad del estiércol lo que facilita su manejo y aplicación como fertilizante orgánico. Aumenta su velocidad de infiltración reduciendo pérdidas de nutrientes durante la aplicación.
- La digestión anaerobia del estiércol convierte un 70% de su fracción orgánica en CH₄ y CO₂. Esto disminuye su relación C: N mejorando su calidad como fertilizante.
- Emplear el biogas producido para combustible en equipos que posean motores de combustión interna.
- Incrementar en 25% el rendimiento de las cosechas o huertas, con el empleo del material o lodo que se extrae del biodigestor (bioabonos), después de la fermentación y producción del biogas.
- Recuperación inmediata de las condiciones del medio ambiente, con un evidente beneficio ecológico.
- Durante la digestión anaerobia, las semillas de malezas serán degradadas en gran porcentaje, lo que reducirá el uso de herbicidas, si se aplica el residuo de la digestión anaerobia como fertilizante orgánico.
- Ahorro al disminuir la aplicación de fertilizantes minerales en agricultura.

Entre los beneficios comparativos más comúnmente reconocidos se encuentran los siguientes (Beteta, 1996).

- Los costos de instalación de los biodigestores plásticos son mucho menores que de otros tipos de biodigestores, como los de concreto.
- Son más eficientes que los biodigestores de cemento, ya que requieren menor volumen líquido para producir una unidad de gas.
- Una vez instalados los biodigestores plásticos son de muy fácil manejo y mantenimiento lo que garantiza una larga vida útil. Según la experiencia, la vida útil es de 10 años.
- Promueve una mayor integración de la mujer a las labores productivas.

1.5. Biogas

El biogas es una mezcla gaseosa formada por metano (CH₄) en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono (CO₂), junto a pequeñas proporciones de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H₂S), hidrógeno (H₂) y amoníaco (Chamy y Pizarro, 2004). El H₂S le da al biogas un olor a desagüe, por lo que debe eliminarse por reacción química con viruta de fierro; para ello se hace pasar la corriente de biogas por un cartucho lleno de viruta de fierro:



El FeS queda en el cartucho y el H₂ que también es combustible sale con la corriente de biogas. El metano producido, llamado también gas natural, es una de las llamadas bioenergías; la mezcla de este gas con el oxígeno del aire es combustible, arde con llama azul y no tizna, puesto que los productos de esta combustión son CO₂ y agua.

Tabla 4. Composición química del biogas.

Componentes	Fórmula	%
Metano	CH ₄	50 - 70
Dióxido de carbono	CO ₂	30 - 50
Hidrógeno	H ₂	0,1
Nitrógeno	N ₂	0,5 - 0,3
Monóxido de carbono	CO	0,1
Oxígeno	O ₂	0,1
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	0,1-1

Fuente: (Guardado, 2008).

El biogas es un combustible ecológico por lo siguiente: se obtiene en biodigestores por fermentación anaeróbica del estiércol de herbívoros; luego, cuando se quema el biogas en la cocina, se produce CO₂ y agua; el CO₂ sale a la atmósfera, de donde es captado por las plantas para producir carbohidratos mediante la fotosíntesis, que los utilizarán para su crecimiento; estas plantas servirán de alimento a los herbívoros, cuyo estiércol se alimentará al biodigestor, de esta manera se completa el ciclo del CO₂. La aplicación de este bioproceso contribuirá a reducir la emisión de gases de efecto invernadero y por ende del calentamiento global, teniendo en cuenta que una molécula de metano causa un impacto similar al que harían 24 moléculas de CO₂.

1.5.1. Consumo de biogas

El biogas se emplea normalmente como sustituto a la leña, estiércol seco, o gas licuado de petróleo para cocinar. El poder calorífico de biogas es menor al del butano o propano, e implica que se tarde más tiempo en cocer los alimentos que cuando se hace con gas natural o licuado de petróleo. El consumo de una cocina doméstica normal se puede estimar entre 130-170 litros por hora (Martí, 2008).

1.5.2. Biogas como fuente de energía térmica

La aplicación de biogas como fuente de energía térmica consiste en usar el biogas para la cocción de alimentos, calefacción, estufas radiantes, incubación, entre otros.

El biogas que producen los biodigestores también pueden ser utilizados en la unidad de producción para la calefacción de las crías recién nacidas de cerdos y aves, ahorrando de esta manera energía eléctrica y/o combustibles fósiles que se utilizan para que funcionen los generadores eléctricos. Otra aplicación del biogas está en el secado del café, este aspecto es de particular importancia para las zonas cafetaleras.

Uno de los usos más importante del biogas en el hogar es para cocinar o preparar los alimentos. Con esto se ahorra leña o bien dinero directamente al no comprar otro tipo de combustible para ello. Dependiendo del volumen de producción, el gas puede utilizarse hasta 12 horas diarias. Para hervir un litro

de agua se consume 0,04 m³ de biogas en un tiempo de 10 minutos (Beteta y Preston, 1996).

Tabla 5. Equivalencia energética del biogas.

Equivalencia energética del biogas	
100 litros de biogas equivalen a:	
Madera	1,3 kg
Bosta seca	1,2 kg
Alcohol	1,1 litros
Gasolina	0,8 litros
Gas-oil	0,65 litros
Gas natural	0,76 litros
Carbón	1,5 litros
Electricidad	2,2 kW/h

Fuente: (Martí, 2008).

1.5.3. Lámpara a biogas

El biogas también se emplea para iluminación en lámparas de gas comerciales. El consumo de esta lámpara varía según el fabricante pero se puede considerar un consumo de 90 a 130 litros por hora.

También en el hogar se puede utilizar el biogas como combustible para un grupo electrógeno con motor de combustión interna para producir energía eléctrica, ahorrando así al no hacer uso de otro tipo de energéticos, mejorando

de esta manera las condiciones de vida en el campo, principalmente en países como el nuestro que normalmente carece de este servicio público en las áreas rurales (Beteta, 1996).

Por lo general, es recomendable que las lámparas funcionen a presión constante. Las lámparas a biogas poseen un bajo rendimiento por eso se calientan extremadamente. Si se cuelgan muy cerca del techo se corre el peligro de incendio, ya que los mecheros o camisas incandescentes no duran mucho.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Material

Se empleó estiércol fresco de ganado vacuno recolectado de las chacras de pastoreo en el distrito de Providencia, provincia de Luya, Región Amazonas; también se usó estiércol de cuy y como inóculo se empleó rumen, recolectado del ganado que es sacrificado para comercializar su carne; en el rumen se encuentran las bacterias metanogénicas que necesitan un pH neutro.

2.2. Métodos

Se instaló un sistema de digestión anaeróbica para el material descrito en la sección anterior del presente trabajo de investigación, cuyos componentes son los siguientes:

2.2.1. Biodigestor

El biodigestor está hecho de geomembrana de PVC de 0,6 mm de espesor con protección contra la radiación ultravioleta (UV), de 6,70 m de largo y 1,27 m de diámetro. Se instaló en una zanja de sección trapezoidal excavada en el suelo de 6,70 m de largo, de 0,90 m de profundidad, con 0,90 m de ancho a nivel del suelo y 0,70 m en el fondo. El biodigestor tiene tres bocas, una en el centro de la tapa de un extremo, conectada a una caja cúbica de 0,5 m de arista, hecha de ladrillo y cemento que viene a ser la caja de carga o de alimentación; y dos bocas en la tapa del otro extremo, la central conectada a la caja de descarga de biol, similar a la de alimentación, la del fondo se conectó a un tubo de PVC de 4" x 3 m en cuyo extremo se colocó, con una reducción,

una llave de paso de 2" para retirar el biosol (lodo de fondo). En el lomo de este biodigestor tubular hay un conducto de 3/4" que permitirá la salida del biogas que será utilizado para cocina e iluminación.

Para proteger el biodigestor de la radiación solar directa, se instaló bajo un techo de calamina soportado por 4 pilares de madera en cada lado. Este techo está a lo largo de la trayectoria del sol (ver Anexo 1, 2 y 3).



Fotografía 1. Caja de alimentación y descarga de biosol del biodigestor.

2.2.2. Caja de alimentación

En un extremo del biodigestor se construyó una caja de alimentación hecha de ladrillo y cemento de 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m, tarrajada interiormente con

cemento por donde se alimentó diariamente una mezcla de estiércol-agua en la relación 1:5. Esta caja se conectó a la boca de alimentación del biodigestor mediante un tubo de PVC de 4" y se muestra en la (Fotografía 1) (ver Anexo 2).

2.2.3. Caja de descarga

En el otro extremo del biodigestor, se construyó una caja de descarga hecha de ladrillo y cemento de 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m, tarrajada interiormente con cemento, por donde se retiró diariamente el biol apto para aplicar a la parcela experimental de café. Esta caja se conectó a la manga de descarga de biol del biodigestor mediante un tubo de PVC de 4". En el fondo de esta caja se colocó un tubo de PVC de 2" que terminó en una llave de paso de 2" para facilitar el retiro del biol. A nivel del fondo de la poza del biodigestor y por debajo de la caja de descarga se instaló el tubo para retiro del biosol y se muestra en la (Fotografía 1), esta actividad se realizará cada 6 meses. Tanto la cámara de alimentación y la de descarga se construyeron al mismo nivel y su borde al ras del suelo (ver Anexo 2).

2.2.4. Conducción de biogas

El biogas generado en el biodigestor fue conducido por tubería de PVC de 1/2", hasta el gasómetro para su almacenamiento y desde allí hasta la cocina o la lámpara con tubería y accesorios del mismo tipo.

2.2.5. Cartucho para eliminar el H₂S

Se hizo de tubo de PVC pesado de 2"x 0,50 m, en un extremo se colocó una esponja de fierro para lavar ollas, una reducción de PVC 2" a ½" a la que se unió un adaptador de PVC de ½", enseguida se llenó con 2 kg de clavos de fierro de 2", sobre éstos se colocó otra esponja de fierro y se tapó con una reducción de PVC de 2" a ½" que también tenía un adaptador de PVC de ½". Se hicieron dos cartuchos de este tipo. Ambos cartuchos servirán para eliminar el ácido sulfhídrico (H₂S) causante del olor a desagüe del biogas, de esta manera se tendrá un gas inodoro para utilizar en la cocina. Los cartuchos se instalaron entre el biodigestor y el gasómetro y se muestran en la (Fotografía 2) (ver Anexo 2).



Fotografía 2. Cartucho para eliminar el H₂S del biogas.

El biogas se conducirá por tubería de PVC de ½” hacia la parte superior del primer cartucho, por el que fluyó de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba por el segundo cartucho, en la tubería que los unió se colocó una llave de paso de ½” para drenar el vapor de agua que condense en la conducción.

2.2.6. Válvula de seguridad

Se ubicó a continuación de los cartuchos para eliminar el H₂S. Sirve para prefijar la presión de todo el sistema de producción de biogás, que funcionará también como una trampa para evitar que una llama se propague por la tubería de conducción. Esta válvula se hizo con una botella descartable de gaseosa de 1,5 L, con cuatro agujeros de 1 cm de diámetro a la altura de su hombro, la cual contenía un litro de agua. En esta botella se introdujo la rama vertical de una te de 30 cm de largo, de la tubería de conducción de biogas; esta rama tiene ranuras hechas con sierra cada centímetro, en un tramo de 15 cm. La botella se amarró de su cuello y se la colgó de una cinta del techo que protege el biodigestor, de manera que queden 10 cm de la rama bajo el nivel de agua en la botella y se muestran en la (Fotografía 2). Cuando la presión del biogas en todo el sistema supere los 10 cm de agua, empezará a burbujear en el agua de la botella y saldrá por los agujeros hechos en la parte superior de la botella por donde escapará al medio ambiente, manteniendo como límite máximo de presión 10 cm de agua. (Ver Anexo 2).

2.2.7. Manómetro

Se empleó para medir la presión del sistema de producción de biogas en cualquier momento. De la tubería que conduce el biogas, mediante una te de $\frac{1}{2}$ " se sacó una ramificación, se colocó una llave de paso de $\frac{1}{2}$ " que se redujo a $\frac{1}{4}$ " para conectar una manguera de plástico de $\frac{1}{4}$ " x 1 m doblada en U, fijada sobre una tabla, que constituyó el manómetro y se muestran en la (Fotografía 2). La rama conectada a la tubería de conducción de biogas fue de 0,50 m, la distancia entre las ramas fue de 0,10 m, la otra rama fue de 0,35 m que terminó con un tramo de 0,05 m doblado a 90° con respecto a esta rama, abierta al medio ambiente. Se colocó agua hasta la mitad de la altura de ambas ramas y se muestran en la (Fotografía 3) y una wincha metálica para facilitar la lectura de la diferencia de altura del agua entre las ramas, la cual será la presión a la que se encuentre el sistema expresada en cm de agua. (Ver Anexo 2 y 4).



Fotografía 3. Llenado del manómetro con agua.

2.2.8. Gasómetro

Se ubicó en un altillo de madera de 2 m de largo por 1 m de ancho, sobre la poza del biodigestor. El biogas producido en el biodigestor fue conducido hacia los cartuchos para eliminar el H_2S , sigue por la tubería a la que está conectada la válvula de seguridad y el manómetro, para llegar al gasómetro hecho de geomembrana de PVC de 0,6 mm de espesor con protección anti UV de 2 m de largo x 1,27 m de diámetro lo que hace un volumen de $2,53 \text{ m}^3$. El gasómetro se emplea para almacenar biogas, de manera que se tenga una mayor cantidad disponible para la cocina o la lámpara. Sólo en una de sus tapas tiene un accesorio de entrada/salida de biogas de $\frac{3}{4}$ ", en la que se colocó una llave de plástico de $\frac{1}{2}$ ", desde aquí se conducirá el biogas para su uso como combustible hasta la cocina o la lámpara y se muestra en la (Fotografía 4) (ver Anexo 2 y 4).



Fotografía 4. Gasómetro instalado en el sistema de producción de biogas.

2.2.9. Cocina a biogas

Mediante tubería de PVC de ½”, en cuyo primer tramo y cerca del gasómetro se colocó una segunda llave de paso similar a la anterior por seguridad para labores de mantenimiento, se condujo el biogas hacia la cocina ubicada en la casa a 50 m desde donde se ubicó el biodigestor. La estructura de la cocina a biogas se hizo de varilla de fierro de ½”, a la que se le acondicionó dos quemadores industriales de gas propano, cada uno con un niple de fierro galvanizado de ½” x 15 cm de largo, a través de ellos llegará el biogas regulado por una llave de paso de PVC de ½”, desde la tubería que conduce el biogas del sistema de producción y se muestra en la (Fotografía 5) (ver Anexo 4 y 5).

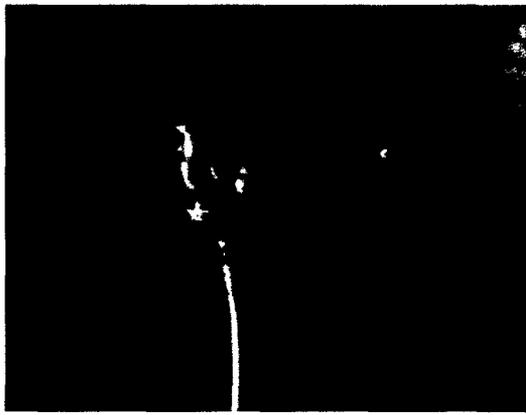


Fotografía 5. Cocina a biogas.

2.2.10. Lámpara a biogas

En la tubería de PVC de ½”, cerca de la cocina se colocó una te para tener una ramificación que abastezca con biogas a la lámpara, regulada con una

llave de paso de plástico de $\frac{1}{2}$ ". La lámpara se ensambló con accesorios de lámpara tipo petromax y se muestran en la (Fotografía 6). El biogas se condujo desde la llave de paso con una manguera de $\frac{1}{4}$ " a un tubo de cobre de $\frac{1}{4}$ " y 30 cm de largo, que llevará el biogas hasta la camisa de la lámpara (ver Anexo 4 y 5).



Fotografía 6. Lámpara a biogas.

2.2.11. Determinación del rendimiento del biogas para cocina e iluminación

El rendimiento de biogas se evaluó en una cocina de dos hornillas y en una lámpara de petromax con camisa para iluminación de la vivienda, mediante el número de horas por día de funcionamiento con biogas durante cinco días.

III. RESULTADOS

3.1. Composición de la mezcla estiércol – agua

Se empleó una relación estiércol-agua de 1:5 lo que equivale a 6 partes en total. Una parte de estiércol y las cinco partes restantes agua. Los cálculos realizados en esta etapa se muestran a continuación.

- Volumen del biodigestor:

$$V = \pi \cdot D^2 \cdot L / 4$$

Si: $L = 6,70 \text{ m}$ y $D = 1,27 \text{ m}$

$$V = 8,49 \text{ m}^3$$

- Volumen de la mezcla: $VM = 75\%$ del volumen del biodigestor :

$$VM = 6,37 \text{ m}^3$$

- Cantidad de estiércol = $6,37 \text{ m}^3 / 6 = 1,06 \text{ m}^3 = 1060 \text{ kg}$
- Cantidad de agua = $6,37 \text{ m}^3 - 1,06 \text{ m}^3 = 5,31 \text{ m}^3 = 5310 \text{ L}$

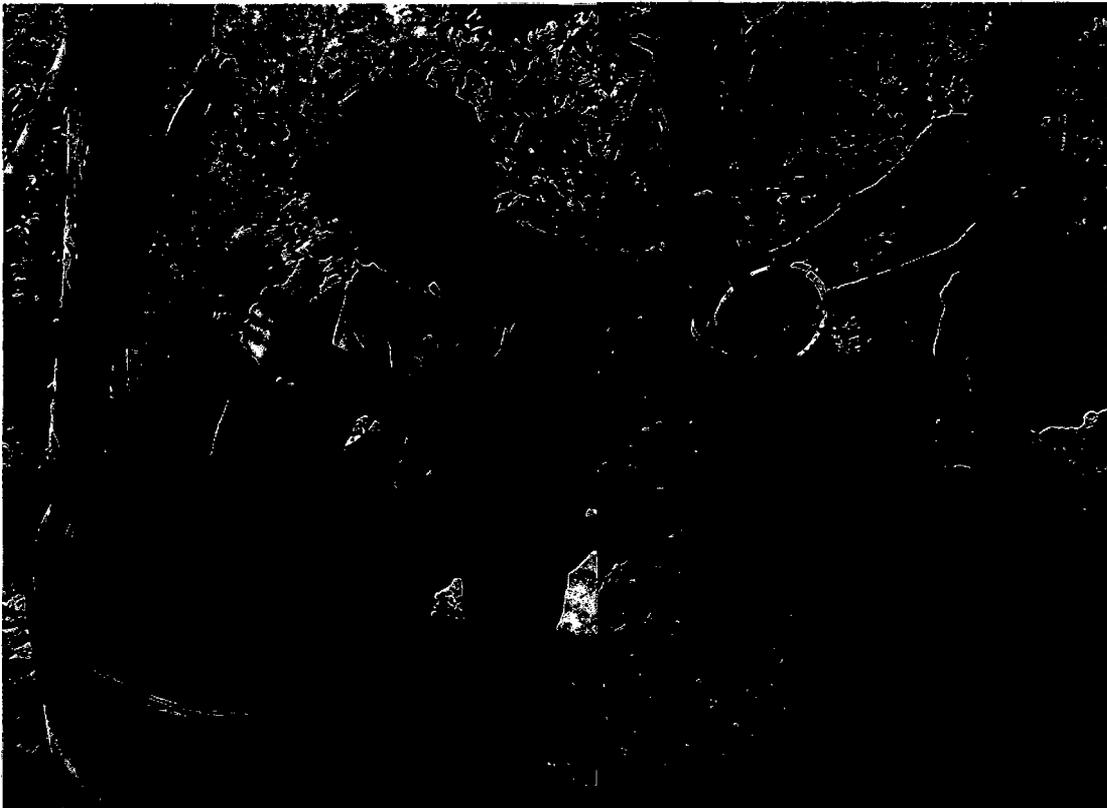
La mezcla estiércol – agua se preparó en un cilindro de plástico de 200 litros.

- Estiércol = $200 \text{ L} / 6 = 33,33 \text{ L} = 33,33 \text{ kg}$ de estiércol para cada cilindro de mezcla.

Se midió el estiércol con un balde de plástico y se vació en el cilindro de 200 L, se le hizo una marca al cilindro en la altura que alcanzaba el total de estiércol necesario, para que en adelante se adicione el estiércol directamente al cilindro hasta la marca. Enseguida, se adicionó agua hasta llenarlo y se agitó con una vara para homogenizar la mezcla estiércol – agua y luego se retiró la parte sólida para que no forme costra en el interior del biodigestor; finalmente, con esta mezcla se alimentó el biodigestor. Se necesitaron 32 cilindros de esta mezcla para completar los 6,37 m³ que debe contener el biodigestor. Se empleó como inóculo una panza de ganado vacuno sacrificado en el camal de Providencia, para lograr la producción de biogas en menor tiempo

Homogenización de la mezcla estiércol-agua

Separación de los solidos



Fotografía 7. Preparación de la alimentación del biodigestor.

3.2. Determinación de la cantidad de fierro para eliminar el H₂S

- Producción diaria estimada de biogas: 35% de la mezcla estiércol – agua:

$$0,35 \times 6,37 = 2,23 \text{ m}^3 \text{ de biogas}$$

- H₂S producido = 0,1 % (v/v) del biogas producido (Tabla 4).

$$\text{H}_2\text{S} = (0,1 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{S}/100 \text{ m}^3 \text{ biogas}) \times 2,23 \text{ m}^3 \text{ biogas/día}$$

$$\text{H}_2\text{S} = 2,23 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{H}_2\text{S} = 2,23 \text{ L/día}$$

- Para dos años de operación = 730 días

$$2,23 \text{ L H}_2\text{S /día} \times 730 \text{ días} = 1628 \text{ L H}_2\text{S}$$

$$V = 1628 \text{ L H}_2\text{S}$$

$$P.V = n.R.T$$

$$n = P.V / (R.T)$$

$$R = 0,082 \text{ L.atm/mol.K}$$

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$T = 20^\circ\text{C} + 273 \text{ K} = 293 \text{ K}$$

$$n = \frac{1 \text{ atm} \times 1628 \text{ L H}_2\text{S}}{0,082 \text{ L} \frac{\text{atm}}{\text{mol.K}} \times 293 \text{ K}}$$

$$n = 67,76 \text{ mol de H}_2\text{S}$$



$$67,76 \text{ mol H}_2\text{S} \times (1(56) \text{ g Fe} / 1 \text{ mol H}_2\text{S})$$

$$= 3794,56 \text{ g Fe} = 3,7 \text{ kg Fe}$$

Se requirió 4 kg de fierro en forma de clavos de 2", colocando 2 kg en cada uno de los dos cartuchos que se emplearon.

3.3. Cálculo de la alimentación diaria del biodigestor

- A partir del día en que se alcanzó la máxima producción de biogas con la mezcla estiércol-agua en el biodigestor al inicio (día cero), se deberá alimentar diariamente el biodigestor (Anexo 3).
- Asumiendo un tiempo de retención hidráulico de 20 días, debido a que en el distrito de Providencia la temperatura ambiente es de 20°C, se calculó la cantidad de mezcla estiércol-agua que se debe alimentar diariamente al biodigestor a partir del día 21.

$$6,37 \text{ m}^3 / 20 \text{ días} = 0,32 \text{ m}^3 / \text{día} = 320 \text{ L} = 2 \text{ cilindros de } 160 \text{ L} / \text{día}$$

- La mezcla estiércol-agua (1:5) para alimentar diariamente el biodigestor, se preparó en 2 cilindros de plástico de 160 L, siendo necesario 27 kg de estiércol para cada uno y el resto fue agua.

3.4. Evaluación del potencial energético y de saneamiento ambiental de la producción de biogas

Para demostrar la factibilidad del empleo de digestores para producir biogas, se precisa contar con las herramientas que permitan determinar las potencialidades de su productividad energética y saneamiento ambiental lo más objetivamente posible. La primera pregunta que surge es:

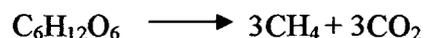
¿Qué cantidad de biogas y de energía se puede esperar de un determinado número de vacas?

La oxidación de la glucosa se expresa como:



La ecuación indica que para oxidar totalmente un mol (180 g) de glucosa se necesita 6 moles de oxígeno, es decir, $6 \times 32 = 192$ g de oxígeno.

La ecuación que describe el proceso de descomposición anaeróbica para producir metano a partir de glucosa, se expresa de la manera siguiente:



Peso atómico: C = 12; H = 1; O = 16

Peso molecular de la glucosa: $12 \times 6 + 1 \times 12 + 16 \times 6 = 180 \text{ g}$

La ecuación señala que un mol (180 g) de glucosa al descomponerse totalmente produce 3 mol de metano, es decir: $3 \times 22,4 \times 10^3 \text{ mL}$ de metano.

Como la demanda química de oxígeno (DQO) de 180 g de glucosa es 192 g, ello indica que la producción de metano de 1 g DQO es:

$$3 \times 22,4 \times 10^3 / 192 = 350 \text{ mL a } 0^\circ\text{C y a } 1 \text{ atm.}$$

Si el análisis se hace a 20°C (293K) y a 1 atm, que son las condiciones promedio del clima del distrito de Providencia, con la ley del gas ideal, se calcula el volumen de metano a esa temperatura y presión:

$$P.V = n.R.T \quad ; \quad V = n.R.T/P$$

Considerando 1 mol de metano (CH_4):

$$V = ((1,0 \text{ mol} \times (0,082 \text{ L. atm/K.mol}) \times (293\text{K})) / 1 \text{ atm}$$

$$V = 24,026 \text{ L}$$

Entonces, 1 g de DQO reporta $3 \times 24,026 / 192 = 375,41 \text{ mL}$ de metano, a una temperatura de 20°C y 1 atm de presión.

1 kg de DQO reporta 375,41 litros de metano; pero el biogas es metano más otros gases, si consideramos el biogas como 60% de metano y 40% de CO_2 , entonces podemos afirmar que por cada kg de DQO destruido en el digestor, se formarán:

$(375,41 \text{ L metano/kg DQO}) \times (100 \text{ L biogas/60 L de metano}) = 619 \text{ litros de biogas/kg DQO.}$

La alimentación, las condiciones de cría y otros aspectos pueden hacer variar considerablemente las características de las excretas y su magnitud, pero la experiencia induce a escoger los siguientes parámetros: (Díaz, 2010).

- Peso de excreta más orines: 5% del peso vivo de una vaca.
- DQO: 60 g/L

Consideramos que un litro de excreta = 1 kg; entonces, si tenemos 10 vacas en el corral y en su conjunto pesan 4000 kg: $4000 \times 0,05 = 200 \text{ kg o } 200 \text{ L de excreta.}$

¿Cuál será la carga contaminante en términos de DQO y expresada en kg?

$(200 \text{ L excreta} \times 60 \text{ g/L})/1000 \text{ g/kg de DQO} = 12 \text{ kg DQO}$

Es decir, las vacas (10 animales con un peso vivo de 4000 kg), vierten al medio ambiente todo los días el equivalente a 12 kg de DQO, si consideramos 60% de eficiencia en la fermentación anaeróbica dentro del digestor, un régimen mesófilo (unos 25°C) con digestión no controlada; en condiciones termófilas esto puede variar o llegar incluso a 85% y más (Díaz, 2010). Entonces la expresión propuesta para definir la posible producción de biogas es:

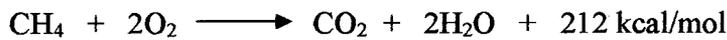
$((\text{DQO (en kg)} \times 619 \text{ L biogas/kg DQO})/(1000 \text{ L/m}^3)) \times 0,60 = \text{m}^3 \text{ de biogas producido.}$

Si evaluamos la posible producción de biogas de las 10 vacas, estaría en el orden de:

$$((12 \text{ kg DQO} \times 619 \text{ L biogas/kg DQO}) / (1000 \text{ L/m}^3)) \times 0,60 = 4,46 \text{ m}^3 \text{ de biogas/día}$$

Ahora nos preguntamos: ¿de cuánto de energía estamos hablando?

Consideremos la combustión de metano: (Díaz, 2010).



- 1 mol de metano = 24,03 L (a 20°C)
- 1 m³ = 1000 L
- 1 m³ de metano = 40,98 mol de metano

$$212 \text{ kcal/mol} \times 40,98 \text{ mol/m}^3 = 8687,76 \text{ kcal/m}^3$$

Como estamos considerando un biogas de 60% de metano y 40% de CO₂:

$$8687,76 \text{ kcal/m}^3 \times 0,60 = 5212,66 \text{ kcal/m}^3 \text{ de metano, como: } 1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$$

$$(5212,66 \text{ kcal/m}^3) / (860 \text{ kcal/1 kWh}) = 6,06 \text{ kWh}$$

Entonces 1 m³ de biogas (60% de CH₄ y 40% de CO₂) tiene una energía de 6,06 kWh.

Por lo general, la eficiencia se ve afectada al convertirla, por lo que se suele utilizar para la energía eléctrica 30% y térmica 50% (Díaz, 2010). Entonces:

- Energía eléctrica de 1 m³ de biogas = 6,06 kWh x 0,30 = 1,82 kWh
- Energía térmica de 1 m³ de biogas = 6,26 kWh x 0,50 = 3,03 kWh

Evaluando las 10 vacas (4000 kg de peso vivo):

Biogas a producir = 4,46 m³ de biogas/día

Energía esperada:

- Eléctrica = 4,46 m³/día x 1,82 kWh/m³ = 8,12 kWh/día
- Térmica = 4,46 m³/día x 3,03 kWh/m³ = 13,51 kWh/día

Eliminación de DQO:

$(4,46 \text{ m}^3 \text{ de biogas/día}) / (619 \text{ L biogas/kg DQO} / (1000 \text{ L/ m}^3)) = 7,21 \text{ kg DQO/día}$

De esta manera se puede evaluar con más precisión el impacto de la digestión anaeróbica y tomar decisiones económicas para su introducción en forma segura, así como la composición de biogas.

3.5. Rendimiento de biogas para cocina

A los 20 días de cargado el biodigestor, el biogas producido alcanzó una presión de 12 cm de agua en el manómetro. A partir de ese día se empezó a usar el biogas en la cocina de dos hornillas, para preparar seis tipos de alimentos para el almuerzo de la familia integrada por 5 personas y se evaluó por 5 días. Se empleó una sola hornilla de la cocina para mantener una buena llama.

A partir del día en que se utilizó el biogas para cocina, se comenzó a alimentar diariamente al biodigestor con un total de 320 L de mezcla estiércol-agua, luego por la caja de descarga se procedió a sacar 320 L de biol para ser aplicado a las parcelas

experimentales de café el formato de registro diario de tiempo de cocción de alimentos a biogas se muestra en la tabla 6 y la evolución del tiempo en la figura 2 (ver Anexo 5).

Tabla 6. Formato de registro diario de tiempo de cocción de alimentos en la cocina a biogas.

Tipo de alimento	Tiempo de cocción (minutos)					Tiempo promedio (minutos)
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	
Arroz	47	41	37	30	32	37,4
Papa	50	45	47	37	37	43,2
Plátano	60	63	56	56	58	58,6
Lenteja	52	60	48	40	38	47,6
Carne guisada	71	65	66	59	57	63,6
Sopa	73	69	65	74	67	69,6

Fuente: Elaboración propia.

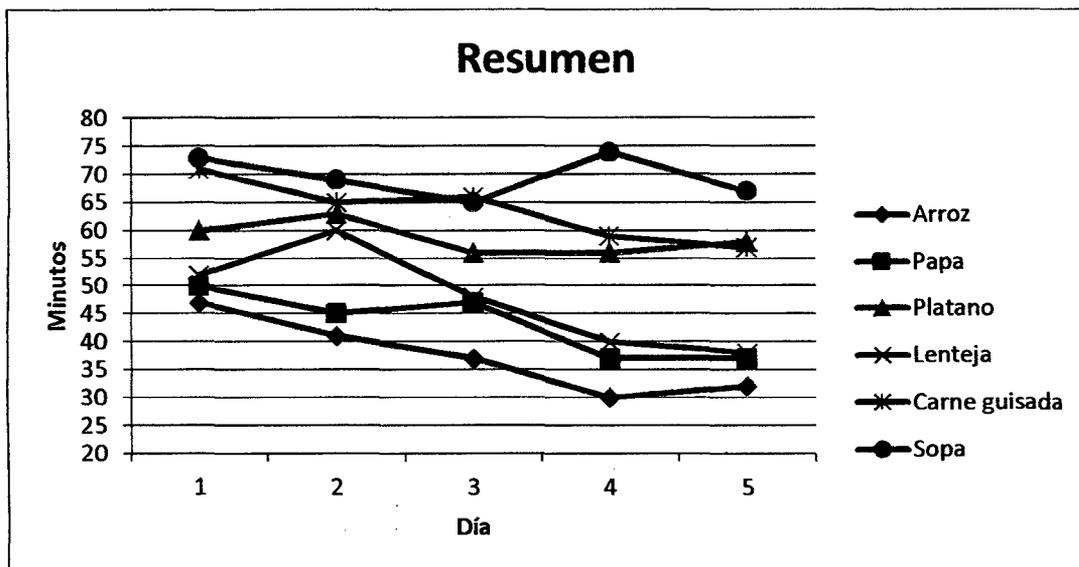


Figura 2. Tiempo diario de cocción de alimentos.

En la Figura 2 se observa que durante los cuatro primeros días para la cocción del arroz el tiempo va disminuyendo porque la presión del biogas fue de 12 cm; en el día cinco el tiempo de cocción subió porque la presión bajó a 10 cm. Durante los tres primeros días para la cocción de la papa el tiempo varió porque no se tuvo una presión constante, en los días cuatro y cinco el tiempo de cocción fue constante porque la presión del biogas se mantuvo en 12 cm de agua en el gasómetro, debido a que se colocó sobre éste una alforja con piedras para mantener la presión en ese valor, teniendo en cuenta que la conducción del biogas hacia la vivienda tenía una distancia de 60 m. En los dos primeros días para la cocción del plátano el tiempo varió porque no se trabajó a presión constante, en los días cuatro y cinco la presión fue de 12 cm. En el segundo día para la cocción de la lenteja el tiempo fue de 60 minutos porque la presión estuvo en 10 cm y del día tres al cinco la presión fue de 12 cm. El tiempo para preparar carne guisada disminuyó porque la presión fue de 12 cm. Durante los tres primeros días el tiempo de cocción de la sopa disminuyó, en el cuarto día aumentó y

en el quinto día disminuyó, debido a variaciones en la presión del sistema de producción de biogas entre 12 y 10 cm.

El tiempo promedio para la cocción de los alimentos para el almuerzo de una familia de 6 personas fue de 4 horas con 20 minutos, por día con una hornilla de la cocina a biogas. Al cabo de ese tiempo se observó que el gasómetro se desinfló en un promedio de 75 %.

3.6. Rendimiento de biogas para lámpara

Una vez terminada la parte experimental para la cocción de los alimentos, se procedió a realizar la parte experimental de la iluminación con lámpara a biogas durante 5 días. Al cabo de cada día de evaluación se observó que el gasómetro se desinfló en promedio un 75 % el formato de registro diario de tiempo de iluminación se muestra en la tabla 7 y la evolución del tiempo en la figura 3 (ver Anexo 5).

Tabla 7. Formato de registro diario de tiempo de iluminación con lámpara a biogas.

Día	Tiempo de iluminación
1	5 h 10 min
2	5 h 16 min
3	5 h 20 min
4	5 h 25 min
5	5 h 38 min

Fuente: Elaboración propia.

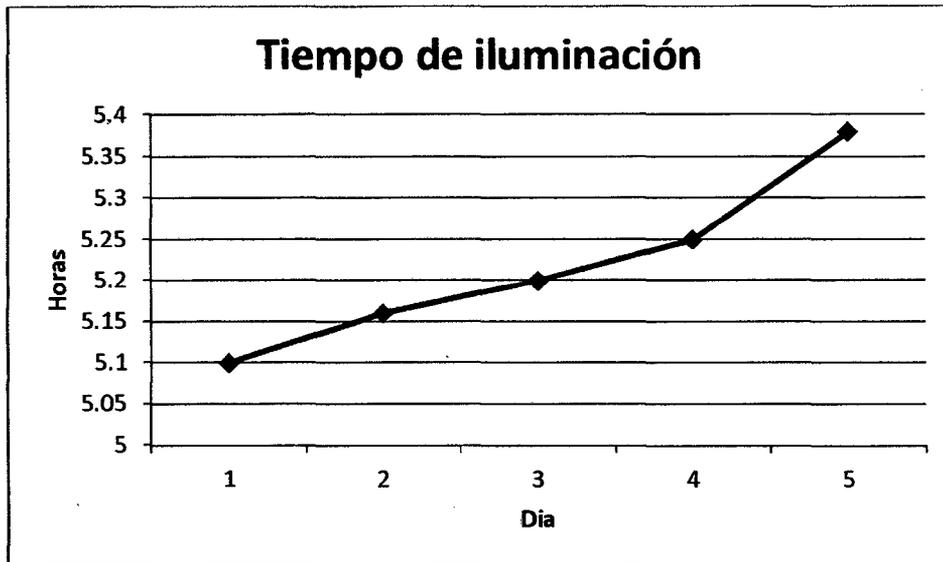


Figura 3. Tiempo de iluminación (horas) por día, con lámpara a biogas.

En la Figura 3 se muestra que el tiempo de iluminación con la lámpara a biogas, tuvo una variación máxima de 18 minutos durante los cinco días de evaluación porque se trabajó a una presión de 12 cm. Al cabo de ese tiempo se observó que el gasómetro se desinfló en promedio un 75%.

IV. DISCUSION

Barrena y otros (2010), reportan que en climas fríos (15°C y a 2700 msnm), un biodigestor tubular de 8 m de largo y 1,27 m de diámetro, alimentado con mezcla estiércol-agua en la relación de 1:5, produjo biogas y alcanzó una presión de 10 cm de agua en 42 días; mientras que en climas cálidos, se reduce el tiempo de producción de biogas. Esta tendencia se cumplió en el presente trabajo de investigación realizado con un biodigestor similar en Providencia, cuya temperatura ambiente fue de 20°C y se ubica a 1700 msnm, empleando la misma composición de la mezcla alimentada al biodigestor, el biogas producido alcanzó una presión de 12 cm de agua a los 20 días, de lo que se deduce que la temperatura ambiente influye en la producción de biogas.

Debido a las condiciones climáticas de Providencia, en las noches no hace frío, por lo que no fue necesario construir una habitación para albergar el biodigestor, el que se instaló en una zanja que contenía un 75% del biodigestor y sobre esta zanja se colocó un techo para protegerlo de la lluvia y de la luz solar directa. El calor ganado por el suelo durante el día fue suficiente para mantener abrigado al biodigestor. Este tipo de instalación permite reducir costos de aplicación de esta tecnología, sin afectar los resultados.

Según Botero y Preston (1987), el ácido sulfhídrico se encuentra en concentraciones próximas al 1% en el biogas, pero ésta baja concentración es suficiente para que pueda ocasionar daños graves a los equipos. Por tal razón, para la utilización del biogas en motores, se debe tratar de disminuir su concentración de H₂S, por medio de filtros o sustancias que puedan atraparlo. Si el uso del biogas es para cocina, también debe ser eliminado el ácido sulfhídrico debido al mal olor que tiene y a su alto poder corrosivo sobre

las tuberías de metal. Para ello, en el presente trabajo de investigación se construyó dos cartuchos de tubo de PVC de 2" rellenos con 4 Kg de clavos de fierro; este metal reacciona con el H_2S y se produce FeS , eliminándose de esta manera el H_2S de la corriente de biogas y con ello el olor a huevos podridos que tiene dicho ácido. Después de pasar por estos cartuchos, el biogas queda inodoro y listo para ser usado como fuente de energía para la cocción de alimentos e iluminación de una vivienda con una lámpara con camisola.

Según Decara y col. (2004), para garantizar el funcionamiento de una cocina durante 6 horas por día, se obtiene $2,4 m^3$ de biogas/día, que permitiría obtener $1,68 m^3$ de metano, lo que equivale a 1,45 kg de propano-butano. En la presente investigación se ha obtenido resultados muy cercanos a estos mencionados; el biogas producido alcanzó una presión de 12 cm de agua en todo el sistema (biodigestor, gasómetros y tuberías de conducción); se almacenó $2,53 m^3$ de biogas en el gasómetro, debido a que se colocó sobre el gasómetro una alforja con piedra para mantener la presión en ese valor, teniendo en cuenta que la conducción del biogas hacia la vivienda fue de 60 cm, con lo que se consiguió hacer funcionar la cocina para la cocción de los alimentos un promedio de 4 horas con 27 minutos por día, quedando aún biogas en el gasómetro. Con el mismo volumen y presión de biogas, se pudo hacer funcionar una lámpara de camisola durante 5 horas con 22 minutos.

En base al tiempo de cocción de los diferentes alimentos evaluados en esta investigación, podemos afirmar que el biogas es una fuente de energía renovable que cubre el requerimiento diario para preparar el almuerzo de una familia de seis integrantes. Asimismo, se dispone de biogas para una lámpara de camisola que brinda iluminación a la vivienda. Ambas actividades permiten mejorar la calidad de vida de la familia, debido a que el biogas durante su combustión no humea, no tizna y tampoco genera olor; características

que no posee la leña que generalmente se emplea como combustible en el área rural, cuyos humos son irritantes y nocivos para la salud sobre todo de la madre de familia que se encarga de las tareas domésticas, además de apoyar en tareas de campo.

La instalación de sistemas de producción de biogas y bioabonos como he realizado en el marco de la presente investigación, le permitirá al poblador rural disponer de una fuente de energía limpia, renovable y barata para cocina o iluminación en vez de leña o de combustibles fósiles altamente contaminantes; y con un volumen de bioabonos suficiente para aplicar a sus cultivos con la finalidad de incrementar su producción. De esta manera estará contribuyendo a reducir la contaminación ambiental y hará sostenible su actividad agrícola puesto que dependerá menos de fertilizantes sintéticos que a la larga causan salinidad en los suelos.

V. CONCLUSIONES

1. Se comprobó que la temperatura ambiente es el único parámetro ambiental que influye en la producción de biogas. A mayor temperatura ambiente, menor tiempo de producción de biogas.
2. Los cartuchos llenos con clavos de fierro son efectivos para eliminar el H₂S de la corriente de biogas, permitiendo obtener un gas libre de olores desagradables.
3. Un biodigestor de geomembrana de PVC de 0,5 mm de espesor de 6,7 m de largo por 1,27 m de diámetro, cargado hasta el 75% de su volumen con mezcla estiércol agua en la proporción 1:5, conectado a un gasómetro del mismo material de 2 m de largo por 1,27 m de diámetro; permite producir y almacenar biogas suficiente para preparar los alimentos de cada día de una familia de 6 miembros, lo que requirió un tiempo promedio de 4 horas con 27 minutos.
4. El biogas como combustible para una lámpara de camisola permitió iluminar una habitación de la vivienda durante un promedio de 5 horas con 22 minutos.
5. La presente investigación da las bases para dar un manejo orgánico y sustentable a la agricultura en Providencia y en otras zonas rurales de la Región Amazonas, además es una alternativa viable para reducir la contaminación ambiental.

VI. RECOMENDACIONES

1. Mejorar el diseño del biodigestor de geomembrana de PVC colocando agitadores en el interior para tener mayor producción de biogas.
2. Instalar el biodigestor cerca del lugar de uso del biogas para tener menor pérdida de presión.
3. Difundir esta tecnología para producir biogas y bioabonos en zonas rurales porque contribuye a proteger el medio ambiente y mejorará la calidad de vida de los campesinos.
4. Hacer la caracterización fisicoquímica del biol para su mejor dosificación y posible comercialización.
5. Determinar la dosificación y frecuencia de aplicación de biol al cafeto y a otros cultivos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRENA G., M.A., GAMARRA T., O.A. y MAICELO Q., J.L. 2012. Producción de biogas en laboratorio a partir de residuos domésticos y ganaderos y su escalamiento. Aporte Santiaguino, Revista Oficial de la UNASAM; 3(1):86-92. ISSN 2070-836X. Huaraz-Perú.
- BETETA HERRERA, T. 1996. Experiences of recycling manure in Colombia. Thesis M.Sc. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Animal Nutrition and Management. Uppsala. Sweden.
- BETETA H, T.; PRESTON, T. R. AND SOLARTE, A. 1996. Manure management in two zones in the Cauca Valley of Colombia. (Manuscript).
- BETETA HERRERA, T. y GONZALES SOBALVARRO, J. 2005. Construcción y uso de biodigestores tubulares plásticos. Nicaragua.
- CVC y GTZ. 1987. Difusión de la tecnología del biogas en Colombia, documentación del proyecto. Cali: ultratextos. 139 p.
- CIPAV. 1995. Biodigestor plástico de flujo continuo, generador de gas y bioabono a partir de aguas servidas. Cali. Colombia.
- CICAFFE. 2011. Guía técnica para el cultivo de café. Impreso por Litografía e Imprenta LIL, S.A.San José, Costa Rica.
- COTO RODRÍGUEZ, J.E.; MALDONADO MALDONADO, J.J. 2005. Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en EARTH. Tesis Lic. Ing. Agr. Guácimo, CR, Universidad EARTH. 62 p.

- CHAMY M., R. y PIZARRO T., C. 2004. Biogas: energía limpia a partir de la basura. Laboratorio de Biotecnología Ambiental, Escuela de Ingeniería Bioquímica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- DECARA, LORENA; SANDOVAL, GABRIELA; FUNES, CLAUDIO. 2004. Uso de biodigestores en sistemas caprinos de la Provincia de Córdoba. Universidad Nacional Río Cuarto. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Departamento de Economía Agraria.
- DIAZ PIÑÓN, M. 2010. Cómo evaluar los digestores de biogas – Energía y Tú, pág. 29.
- DUICELA GUAMBI, LUIS ALBERTO.; CORRAL CASTILLO, R; ZAMBRANO AZÚ, LUIS. 2003. Efecto del biol sobre la Productividad del Café Arábigo. Desarrollo de Tecnologías para la Producción de Café Arábigo Orgánico (IG-CT-034)
- FENLON, D.R. y ROBINSON, K. 1977. Denitrification of aerobically stabilised pig waste. Water Resources.
- GUNNERSON, Charles G. y STUCKEY, David. 1988. Anaerobic digestion: Principles and practices for biogas systems. Washington, D.C., EE.UU.
- GUARDADO CHACÓN, J. 2008. Biogas como fuente de energía.
- HERNÁNDEZ, C. 1990. Segundo Forum Nacional de Energía: Biogas. La Habana.
- INSTITUCIÓN NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI). 2007. Censos Nacionales del Perú. XI de Población y VI de Vivienda. Lima.
- KRISTTOFERSON, L.A. Y BOCKHAALDERS, V. 1991. Renewable Energy Technologies: their Applications in Developing Countries. Intermediate Technology Publications. London, p 112 – 117.
- MARTÍ HERRERO, J. 2008. Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares. GTZ PROAGRO. Bolivia.

- OBANDO CABEZAS, R. 1991. Biogas, alternativa energética en explotaciones porcinas. Tesis Lic. Ing. Agr. San José, CR, UCR. 74 p.
- PROYECTO GTZ-CVC-OEKOTOP (1987). Difusión de la tecnología del biogás en Colombia. Documentación del Proyecto. Cali.
- RONG CUI & DEOKJIN JAHNG. 2006. Enhanced methane production from anaerobic digestion of disintegrated and deproteinized excess sludge. *Biotechnology Letters*.
- SUQUILANDA VALDIVIESO, MANUEL B. 1995. Agricultura orgánica. Aya Editing (Quito-Ecuador). Ediciones UPS. p, 152-248.
- VÁZQUEZ DURAÑONA, O. 2000. Planta de biogás de pequeñas dimensiones para fincas lecheras. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*.

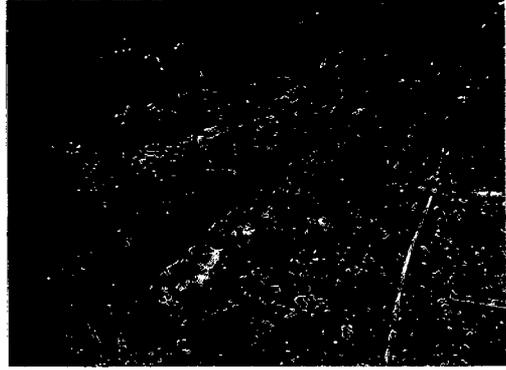
ANEXOS

ANEXO 1

SECUENCIA FOTOGRÁFICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CASA Y LA ZANJA DONDE SE INSTALARÁ EL BIODIGESTOR



Fotografía 8. Lugar donde se instaló el biodigestor.



Fotografía 9. Trazo de la zanja donde se instaló el biodigestor.



Fotografía 10. Ubicación de los postes que soportarán el techo.



Fotografía 11. Excavación de la zanja de forma trapezoidal invertida.



Fotografía 12. Techo de calamina para la protección de la luz solar directa.



Fotografía 13. Techo y zanja de tipo trapezoidal terminada.

ANEXO 2

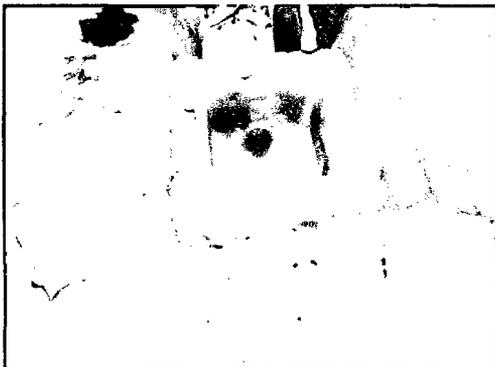
INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR CON EL ASESOR, COASESOR Y LA ING MONIKA HELLENTHAL DE LA HAWK ALEMANIA



Fotografía 14. Colocación de la manta en los laterales y aserrín en el piso.



Fotografía 15. Colocación del biodigestor en la zanja.



Fotografía 16. Conexión del biodigestor a la boca de alimentación. Similar se hizo en la descarga.



Fotografía 17. Llave de paso de 2" para sacar el biosol del fondo del biodigestor.



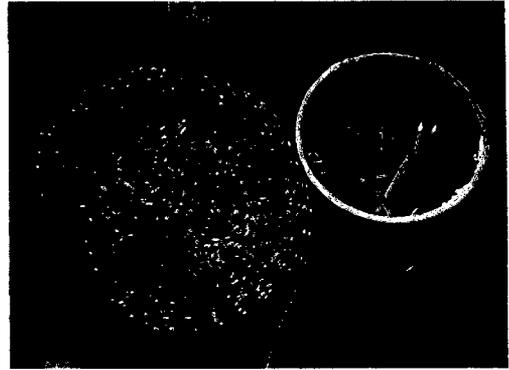
Fotografía 18. Conexión de la boca de descarga una llave de paso para sacar el biol.



Fotografía 19. Conexión al biodigestor de la llave de salida del biogas.



Fotografía 20. Armado de los cartuchos o filtros de 2" para eliminar el H₂S.



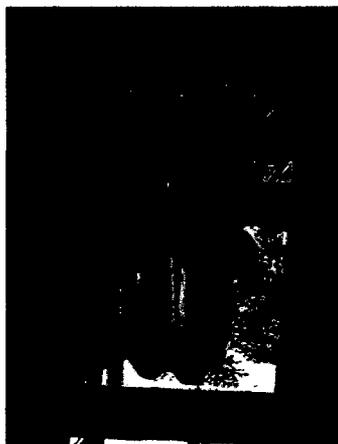
Fotografía 21. Colocación de esponja de hierro en el extremo del cartucho de 2".



Fotografía 22. Cerrado del cartucho con reducción de 2" a 1/2".



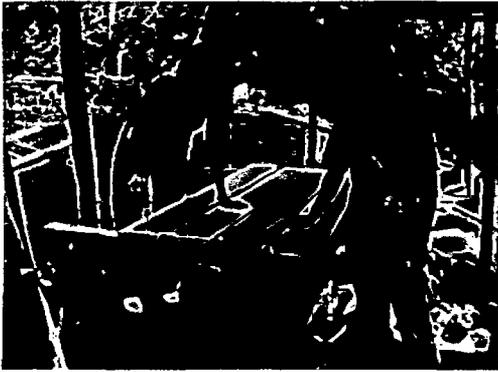
Fotografía 23. Fijación de los cartuchos en un bastidor de madera.



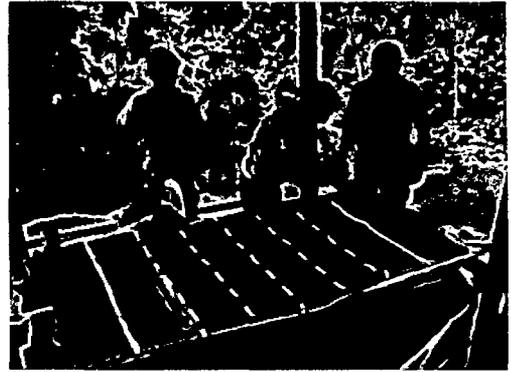
Fotografía 24. Controlador de presión hecho de botella descartable y agua. La rama de la tubería está sumergida 10 cm.



Fotografía 25. Construcción de un manómetro para medir la presión.



Fotografía 26. Construcción del altillo para colocar el gasómetro.



Fotografía 27. Protección del altillo con una manta para colocar el gasómetro.



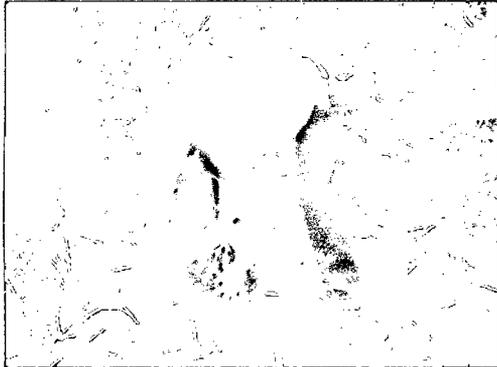
Fotografía 28. Gasómetro colocado en el altillo de madera.



Fotografía 29. Cartuchos y manómetro instalados en el bastidor.

ANEXO 3

ALIMENTACIÓN DEL BIODIGESTOR Y PRODUCCIÓN DE BIOGAS



Fotografía 30. Recolección de estiércol de ganado vacuno.



Fotografía 31. Preparación de la mezcla estiércol-agua (1:5).



Fotografía 32. Alimentación del biodigestor con la mezcla estiércol-agua.



Fotografía 33. Biodigestor lleno hasta el 75% de su volumen con mezcla estiércol-agua.



Fotografía 34. Producción de biogas en el biodigestor a los 14 días.



Fotografía 35. Biodigestor lleno de biogas a los 20 días.

ANEXO 4

INSTALACIÓN DE LA TUBERÍA PARA CONducIR EL BIOGAS HASTA LA VIVIENDA



Fotografía 36. Salida del biogas.



Fotografía 37. Cartucho o filtro con clavos de fierro para eliminar el H_2S .



Fotografía 38. Manometro con agua que sirve para medir la presión del sistema.



Fotografía 39. Conexión de la llave de paso que conduce el biogas hacia el gasómetro.



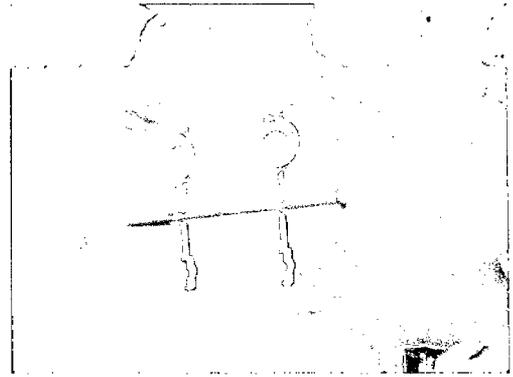
Fotografía 40. Gasómetro lleno con biogas.



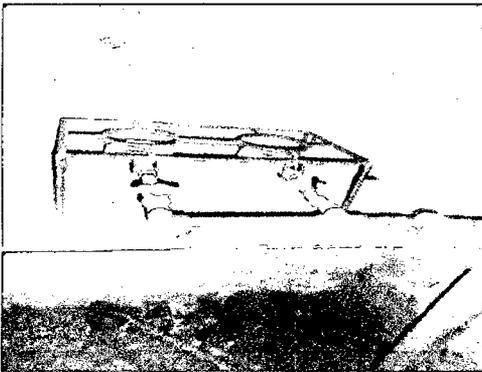
Fotografía 41. Llave de paso en la tubería que conduce el biogas hacia la vivienda.



Fotografía 42. Conducción del biogas por tubería de PVC de 1/2" hasta la vivienda.



Fotografía 43. Cocina con quemadores industriales que funcionarán con biogas.



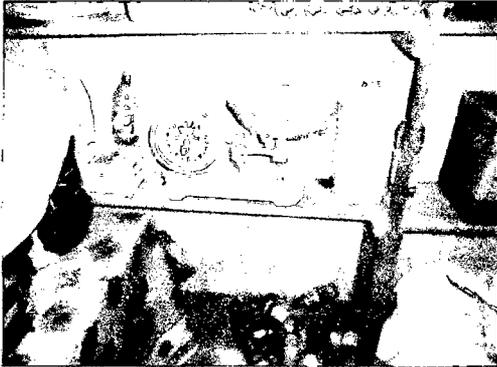
Fotografía 44. Cocina instalada.



Fotografía 45. Instalación de la lámpara que funcionará con biogas.

ANEXO 5

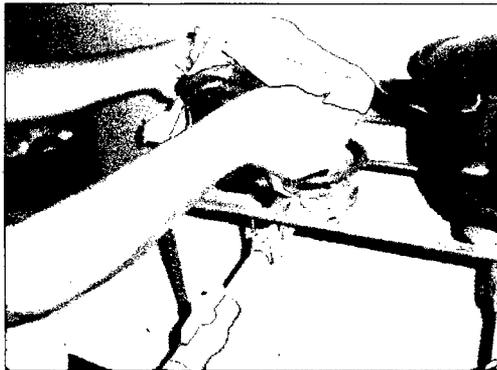
PREPARACIÓN DE ALIMENTOS PARA EL CONSUMO DE UNA FAMILIA Y FUNCIONAMIENTO DE LA LÁMPARA A BIOGAS



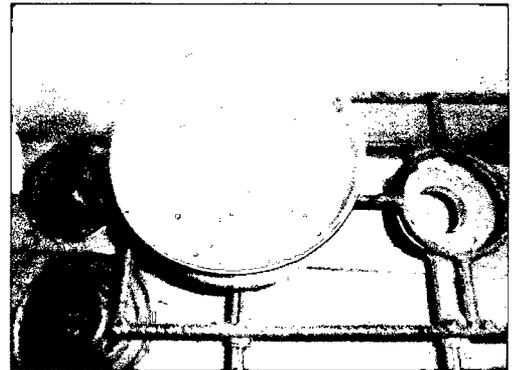
Fotografía 46. Pesado de los alimentos.



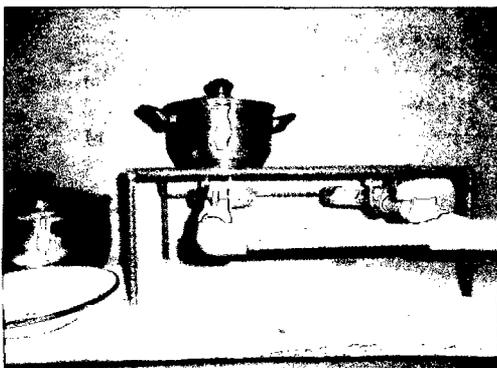
Fotografía 47. Llama azul de la combustión del biogas.



Fotografía 48. Bajando el arroz cocinado con biogas.



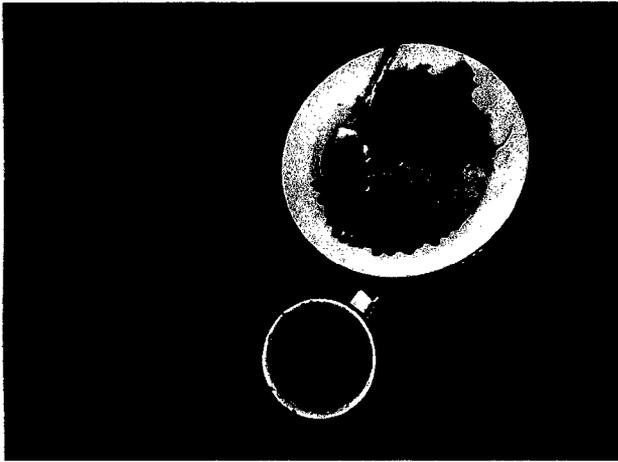
Fotografía 49. Cocción de la papa con biogas.



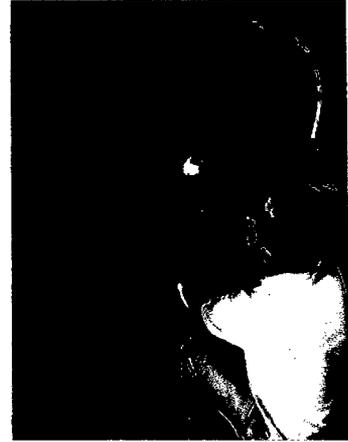
Fotografía 50. Cocción de plátano con biogas.



Fotografía 51. Lenteja cocinado con biogas.



Fotografía 52. Almuerzo preparado con biogas.



Fotografía 53. Funcionamiento de la lámpara de camisola a biogas.



Fotografía 54. Alumbrado de una vivienda con lámpara a biogas.

ANEXO 6

APLICACIÓN DE BIOL PRODUCIDO EN EL DIGESTOR

1. Bioabono

El efluente del biodigestor es un abono de excelente calidad para el agro, además, todos los patógenos iniciales habrán muerto, reduciéndose así el riesgo de contaminar las fuentes de agua y causar enfermedades; de otro lado, las semillas que estuvieron presentes en el estiércol habrán perdido su viabilidad, lo que reduce la diseminación de malezas en los pastizales. Si se deja sedimentar el efluente del biodigestor, se tendrá una parte sólida y otra líquida. La parte sólida se llama biosol, abono que se aplica directamente al campo; la parte líquida se podrá emplear como abono foliar y se denomina biol.

1.1. Uso del biol

El biol puede ser utilizado en una gran variedad de plantas, sean de ciclo corto, anuales, bianuales o perennes, gramíneas, forrajeras, leguminosas, frutales, hortalizas, raíces, tubérculos y ornamentales, con aplicaciones dirigidas al follaje, al suelo, a la semilla y/o a la raíz. Existen diferentes experiencias en el uso del biol producido en un biodigestor de acuerdo a los tiempos de los cultivos (Martí, 2008).

- Inicialmente, cuando el terreno se ara, se puede usar el fertilizante recién salido del biodigestor para regar cada surco.

- El día antes de sembrar, se pueden introducir las semillas o grano en una mezcla de 1 a 1 de biol con agua por un tiempo de 4 o 5 horas.

- Una vez en crecimiento la planta, se puede filtrar el fertilizante y fumigar (uso como fertilizante foliar) las plantas con una mezcla de 1 parte de fertilizante y 4 de agua. Funciona muy bien fumigar tras una helada, así como cuando ya comienza a aparecer el fruto, pero nunca durante la floración, ya que podría llegar a quemar la planta.

Tabla 8. Composición química del biol, proveniente de estiércol (BE).

Componentes	Unidad	BE
Solidos totales	%	5,6
Materia orgánica	%	3,0
Fibra	%	20,0
Nitrógeno	%	1,6
Fósforo	%	0,2
Potasio	%	1,5
Calcio	%	0,2
Azufre	%	0,2
Ácido indol acético	ng/g	12,0
Giberelina	ng/g	9,7
Purinas	ng/g	9,3
Tiamina(B1)	ng/g	187,5
Riboflabina(B2)	ng/g	83,3
Piroxena(B6)	ng/g	33,1
Ácido nicotínico	ng/g	10,
Ácido fólico	ng/g	14,2
Cisteína	ng/g	9,2
Triptofano	ng/g	56,6

Fuente: (Suquilanda, 1995).

1.2. Aplicaciones del fertilizante

La aplicación del biol, tanto al suelo como al follaje de los cafetos es una práctica de nutrición vegetal, que se está generalizando en las fincas cafetaleras orgánicas, para favorecer el desarrollo vegetativo y el incremento de la producción del café. El rendimiento de los cafetos tiende a ser mayor a medida que se incrementa la dosis de biol al follaje (Duicela y col, 2003). El fertilizante producido tiene un contenido en nitrógeno de 2 a 3%, fósforo de 1 a 2%, potasio entorno al 1% y alrededor de 85% de materia orgánica, con un pH de 7,5 (Martí, 2008).

1.3. Cultivo de café

El café es un cultivo permanente, producido por el árbol del cafeto. Estos arbustos requieren una temperatura entre 20° a 25°C y una humedad atmosférica importante. Es una planta de semi-sombra, que hay que proteger de los vientos y de las temperaturas bajas. La altitud óptima para el cultivo de café está entre los 500 y 1700 msnm. Por encima de este nivel altitudinal se presentan fuertes limitaciones en relación con el desarrollo de la planta (CICAFE, 2011).

1.3.1. Instalación de parcelas de café

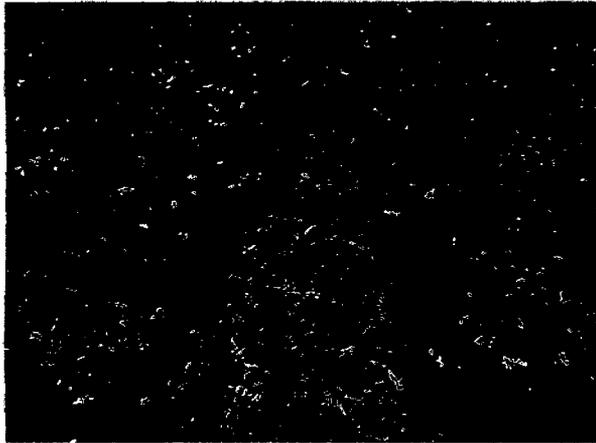
Se instaló dos parcelas experimentales con cultivos de café a las que se aplicó el efluente líquido (biol) del biodigestor y se determinó los beneficios que produce en el desarrollo del café.

- Parcela 1: Testigo: con 20 plantas de café, de 25 cm de altura, sembrado en surcos. No se le aplicó biol.
- Parcela 2: con 20 plantas de café, de 25 cm de altura, sembrado en surcos. Se aplicó biol en época de verano (ausencia de lluvias).

Para evaluar el crecimiento y desarrollo de la planta de café se roció medio litro de biol puro al follaje y medio litro de biol puro al suelo de la planta (alrededor del tallo). Se hizo dos aplicaciones por mes, distanciadas siete días entre ellas, a los 30 días se repitió esta frecuencia, hasta completar los cuatro meses de evaluación; al cabo de este tiempo se determinó el efecto del biol sobre el desarrollo del cafeto, comparándolo con el testigo (ver Anexo 7).

1.3.2. Efecto del biol sobre las plantas de café

Sólo a las plantas de café de la Parcela 2 se les aplicó biol tanto al follaje de los cafetos como al suelo de los cafetales. Se comprobó que el biol es un fertilizante muy bueno para incrementar el desarrollo vegetativo del café, pues los cafetos de la Parcela 2, en cuatro meses de aplicación y seguimiento del crecimiento alcanzaron una altura promedio de 1 m y se muestran en la (Fotografía 8), con respecto al testigo, que en el mismo periodo alcanzó en promedio los 0,80 m. (ver Anexo 7).



Fotografía 55. Plantas de café de 2 meses de aplicación de biol



Fotografía 56. Plantas de café de cuatro meses de aplicación de biol

Asimismo, la aplicación de biol a las plantas de café permitió eliminar la plaga conocida como “cochinilla”, que forma queresas en las hojas del cafeto retardando su crecimiento. De esta manera, el biol contribuye a un manejo orgánico de la plantación.

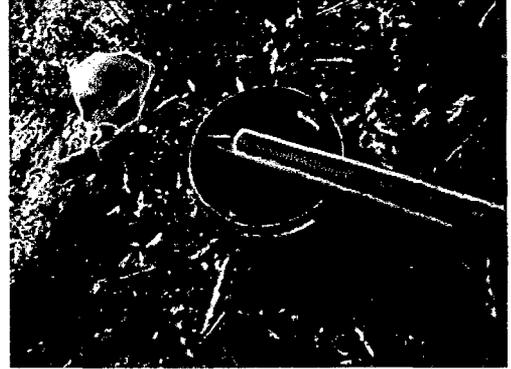
El biol es un excelente fertilizante orgánico para las plantas de café puesto que propició su desarrollo vegetativo notable, con un 20% en promedio de mayor altura que el testigo que no recibió ningún tipo de fertilizante. Además, su aplicación como abono foliar a las plantas de café permitió eliminar los insectos plaga conocidos como “cochinilla” que retardan el crecimiento del cafeto. En consecuencia, el empleo del biol es una alternativa viable para fertilización y manejo orgánico de una plantación de café, lo que contribuirá a incrementar su producción y la calidad del grano, esto a su vez permitirá generar mayores ingresos económicos a los caficultores. Por ser un fertilizante orgánico, una dosis alta de biol no afecta a la planta.

ANEXO 7

SECUENCIA FOTOGRÁFICA DE LA INSTALACIÓN DE PARCELAS DE CAFÉ



Fotografía 57. Parcelas experimentales de café.



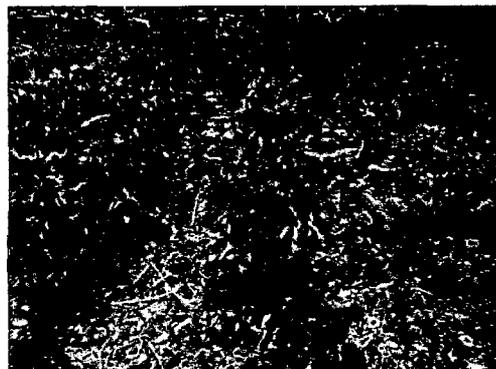
Fotografía 58. Recolección del biol.



Fotografía 59. Parcela 1, testigo de café, no se le aplicó biol.



Fotografía 60. Parcela 2 de café a la que se le aplicó biol.



Fotografía 61. Resultado de la parcela 1, después de 4 meses sin biol.



Fotografía 62. Parcela 2, después de 4 meses de tratamiento con biol.