

BIODIGESTOR DE BAJO COSTO PARA LA PRODUCCION DE
COMBUSTIBLE Y FERTILIZANTE A PARTIR DE EXCRETAS

" MANUAL PARA SU INSTALACION, OPERACION Y UTILIZACION "

Raúl Botero Botero y Thomas R. Preston

Edición
1987

BIODIGESTOR DE BAJO COSTO PARA LA PRODUCCION DE COMBUSTIBLE Y FERTILIZANTE A PARTIR DE EXCRETAS

Raúl Botero Botero¹ y Thomas R. Preston²

RESUMEN

Se resume la experiencia adquirida por los autores durante la instalación y puesta en funcionamiento de biodigestores del tipo Taiwán (flujo continuo) Estos se encuentran operando en varios países tropicales entre 0 y 2000 m.s.n.m. Todos los materiales son fabricados localmente con materiales de fácil consecución. Las obras de adecuación requieren de tres a cinco jornales dependiendo del tamaño del biodigestor. El montaje, del Biodigestor entre dos personas, toma tres horas y la producción estable de biogás y abono orgánico se obtiene 30 días después de la instalación. Un biodigestor de siete metros de longitud y cuatro metros de circunferencia produce continuamente biogás para ocho horas diarias de cocción y permite la preparación de los alimentos consumidos a diario por una familia. El biodigestor requiere para su funcionamiento de las excretas producidas diariamente por una vaca, un caballo o cinco cerdas de cría confinados. El costo total de los jornales para las obras de adecuación y de los materiales necesarios para su instalación equivale a US\$ 200. Las dimensiones pueden ser incrementadas a escala, hasta un nivel agroindustrial, dependiendo de la cantidad de excretas disponibles y del volumen diario de biogás y de abono orgánico requeridos. La bolsa de polietileno del biodigestor tipo Taiwán tiene una vida útil promedio de diez años.

Palabras claves: BIODIGESTOR / BIOGÁS / EXCRETAS / ABONO ORGÁNICO / DESARROLLO RURAL INTEGRAL / SISTEMAS AGROPECUARIOS SOSTENIBLES/

1/ MVZ. MSc. Facilitador del Aprendizaje, Investigador y Consultor Internacional en Producción Animal Tropical Sostenible. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda - Universidad EARTH - Apartado 4442-1000 San José - Costa Rica. E-mail: rbotero@earth.ac.cr

2/ PhD. DSc. Livestock-based Agricultural Development. Consultant in Sustainable. University of Agriculture and Forestry. Thu Duc, Ho Chi Minh City - VIETNAM.

1. Introducción

Para procurarse su alimento y vivienda, nuestros antepasados talaron y quemaron áreas de bosque con el fin de limpiar el suelo para cultivarlo, atraer al mismo tiempo a los animales silvestres para darles caza, así como también, obtener madera para combustible, construcción de refugios y fabricación de las herramientas necesarias en las labores de supervivencia. Con baja población humana era factible la regeneración del bosque nativo pero, durante la última mitad del siglo, se ha presentado un aumento considerable de la población mundial y esto ha ocurrido principalmente en las naciones en vía de desarrollo y con menores recursos.

Tanto la agricultura y la ganadería en pequeña y gran escala, como la tala de los bosques nativos y la baja escala de reforestación están afectando el suministro de leña; fuente energética de la cual depende más de una tercera parte de la población rural de bajos ingresos en todo el mundo (CATIE, 1984)

El aumento de la población es superior al crecimiento de los árboles plantados actualmente, ya que el usuario rural quema en promedio una tonelada de leña por año. Los resultados son un alza vertiginosa en los precios de dicho combustible, con su consecuente efecto detrimental sobre los bajos ingresos, un aumento en el tiempo y la mano de obra requeridos para satisfacer las necesidades básicas de combustible en el medio rural y la aparición, cada vez mayor, de paisajes sin árboles creando un fenómeno ecológicamente desastroso y potencialmente irreversible.

Los costos crecientes y la disponibilidad limitada de las fuentes minerales de energía, adicionados a la dificultad de su distribución en el medio rural y los altos costos de los fertilizantes químicos hacen necesario desarrollar métodos más eficientes y de bajo costo para el reciclaje de las excretas y la producción de combustible y fertilizante en los sistemas agropecuarios.

2. Utilización de Biodigestores

Por las anteriores razones el desarrollo y utilización de biodigestores ha sido llamado "**la tecnología milagrosa**". Sin embargo, aún hoy, muchos años después de que los biodigestores y su utilización rural han sido desarrollados, solamente una proporción relativamente pequeña de campesinos los emplean, tanto en países desarrollados como en vía de desarrollo. La limitada utilización de biodigestores es debida a que los beneficios, particularmente económicos, no son claramente justificados si se comparan con la mano de obra y los costos involucrados en la construcción, funcionamiento y nivel de producción de biogás y fertilizante por cada unidad de materia orgánica utilizada en los biodigestores tradicionales de alto costo.

a) Biodigestión

Es la fermentación realizada por bacterias anaeróbicas sobre la materia orgánica, componente de un 80% de las excretas, y posee las ventajas de:

- Proporcionar combustible (biogás) para suplir las principales necesidades energéticas rurales.
- Reducir la contaminación ambiental al convertir las excretas, que hacen proliferar microorganismos patógenos, larvas e insectos, en residuos útiles.
- Producir abono orgánico (bioabono), con un contenido mineral similar al de las excretas frescas e igualmente útil para los suelos, los cultivos y para el desarrollo del fitoplancton y del zooplancton utilizados por algunas especies acuáticas en su alimentación.
- Mediante la digestión por bacterias anaeróbicas se destruyen microorganismos, huevos de parásitos y semillas de malezas contenidos en las excretas frescas, quedando el fertilizante residual libre de tales gérmenes y plantas indeseables.

Según datos tomados en China y publicados por McGARRY y STAINFORTH (1978), una de las ventajas de la biodigestión anaeróbica sobre las excretas, antes de aplicarlas como fertilizantes, es la reducción del riesgo en la transmisión de enfermedades. Debido al reciclaje conjunto de las excretas animales y humanas en biodigestores operando a rangos de temperatura interna entre 30°C y 35°C, es posible destruir hasta el 95% de los huevos de parásitos y casi todas las bacterias y protozoarios causantes de disentería.

b) Composición del biogás

El biogás lo constituye una mezcla de gases y su composición (CUADRO 1) depende del tipo de residuo orgánico utilizado para su producción y de las condiciones en que se procesa.

La mezcla debe purificarse, si va a ser utilizada como combustible en motores de explosión. Se eliminan: el gas carbónico haciendo burbujear el biogás a través de agua, el ácido sulfhídrico haciéndolo burbujear a través de una solución de soda cáustica en agua que contiene sulfato de cobre disuelto o pasándolo por una trampa de limadura de hierro (esponjilla de alambre), o con la introducción de pequeñas cantidades de aire (3% a 5% del volumen del depósito para el biogás) reduciendo así hasta en un 95% el ácido sulfhídrico producido. La humedad se elimina circulando el biogás entre cloruro de calcio o sílica gel.

CUADRO 1

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BIOGÁS		
Componentes	Fórmula Química	Porcent aje
Metano	CH ₄	60-70
Gas carbónico	CO ₂	30-40
Hidrógeno	H ₂	1.0
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Ácido sulfídrico	H ₂ S	0.1

Fuente: adaptado del Instituto de Investigaciones Eléctricas de México 1980

3. Materiales Necesarios para la Construcción del Biodigestor de Bajo Costo

- 32 metros de tubular en polietileno transparente, calibre* 6 u 8, de 2 metros de ancho (4 metros de circunferencia).
- 6 a 8 baldes circulares plásticos usados, con capacidad para 5 galones ó 2 canecas o estañones circulares plásticos de 15 galones, a los cuales se les quitan completamente las tapas superior e inferior (quedando a manera de tubos), o en su reemplazo, 2 tubos en concreto o en gress de 12 a 18 pulgadas de diámetro por un metro de longitud.
- 3 metros de manguera plástica flexible de jardín en vinilo transparente de 1 1/4 pulgadas de diámetro.
- 1 adaptador macho en PVC de media pulgada de diámetro.
- 1 adaptador macho en PVC de una pulgada de diámetro.
- 1 adaptador hembra en PVC de una pulgada de diámetro.
- 1 tee en PVC de una pulgada de diámetro.
- 2 reducciones no roscadas (bujes), en PVC de una a media pulgada de diámetro.
- 3 codos de 90 grados en tubería gris en PVC de una pulgada de diámetro.
- 1 tapón cementado (liso) en PVC para una pulgada.
- 50 centímetros de tubería gris (de presión) en PVC de media pulgada de diámetro.
- 60 centímetros (o seis niples de 10cm c/u) de tubería gris (de presión) en PVC de una pulgada de diámetro.
- Tubería **conduit**** en PVC de una pulgada de diámetro, o en su reemplazo, manguera negra en polietileno de 1 1/4 pulgadas de diámetro, en longitud suficiente para llegar desde el sitio del biodigestor hasta el sitio de colocación del quemador para el biogás (cocina).
- 1 frasco de limpiador y un frasco de pegante (soldadura) para PVC.
- 50 centímetros de tubería galvanizada de media pulgada de diámetro, roscada en ambos extremos.

- 1 codo en tubería galvanizada de media pulgada de diámetro.
- 1 niple de 10 a 12 cm en tubería galvanizada de media pulgada de diámetro, roscado en ambos extremos.
- 4 abrazaderas metálicas de cremallera con ajuste desde 1 hasta 1 1/2 pulgadas.
- 1 llave de paso en bronce o de balín de media pulgada.
- 2 arandelas, preferiblemente en acrílico, madera, fibra de vidrio, material sintético firme o en último caso metálicas, cuyo agujero central permita el ingreso en toda su longitud de la rosca del macho en PVC de una pulgada, su diámetro total no sea menor de 10 centímetros y su grosor individual no sea mayor de 4 milímetros.
- 1 lápiz marcador de tinta en color oscuro (marcador indeleble industrial a gasolina) o lápiz vidriograf.
- 1 frasco en plástico transparente, sin tapa, de 3 a 4 litros de capacidad (de aceite de cocina desocupado).
- 1 lata usada, redonda y sin el fondo, de galletas o leche en polvo, de medio galón de capacidad.
- 2 empaques en neumático usado, de 20 x 20 centímetros, en forma de ruana, ambos con un agujero central que permita la entrada ajustada de la rosca del macho en PVC de una pulgada.
- 6 correas en neumático usado, de aproximadamente 5 centímetros de ancho por 2 metros de largo cada una.
- 8 sacos usados de 40 kg de capacidad, en polipropileno.
- 2 ladrillos, bloques o adobes en barro cocido
- 1 esponjilla o alambrina metálica de lavar ollas.

* Calibre dado comercialmente en milésimas de pulgada.

** Tubería comercial en PVC, utilizada para la conducción de redes eléctricas.

4. Instalación del Biodigestor

a) Localización de la fosa para alojar el biodigestor

Con el fin de utilizarse como aislante térmico y protección para los materiales constituyentes del biodigestor, se excava una fosa sobre suelo firme y en forma tal que sus paredes de tierra no se derrumben y no queden con piedras cortantes o raíces salientes.

En áreas con topografía quebrada, la fosa para alojar el biodigestor debe ser excavada al través de la pendiente, para poder lograr que el piso del fondo de la fosa quede sin desnivel y permitir así el llenado y autovaciado diarios y por gravedad del biodigestor.

La fosa debe situarse en inmediaciones de las instalaciones destinadas al alojamiento o manejo de bovinos, ovinos, caprinos, equinos, cerdos, conejos, cuyes o letrinas humanas y cercana a una fuente permanente de agua. Esto con el fin de que las excretas resultantes (heces y orina), de una o varias especies animales y de humanos, puedan ser conducidas diariamente con el agua del lavado, mediante un canal o tubería y por

gravedad, hacia el biodigestor.

Es conveniente además, que el efluente o residuo que sale del biodigestor se pueda conducir y distribuir por gravedad para utilizarlo como fertilizante en los cultivos o en estanques poblados con especies acuícolas.

No se promueve la utilización de las excretas de aves de corral, para la alimentación del biodigestor, por su alto precio de venta y por considerar que éstas tienen mayor valor en utilización directa para la alimentación de rumiantes o como fertilizante.

b) Dimensiones de la fosa

Las dimensiones de la fosa, para este caso específico, son de 70 centímetros de ancho exterior por 70 centímetros de profundidad y 10 metros de longitud, con las paredes laterales en leve talud del 10% (64 centímetros de ancho en el fondo) para evitar su derrumbamiento y con el piso sin desnivel [FIGURA 01](#) (Fosa excavada sobre el suelo para el alojamiento y protección del Biodigestor)

En ambos extremos de la fosa deben excavarse, localizados en el centro de cada pared, huecos oblicuos hasta el fondo de la fosa, con 1.0 a 1.25 metros de longitud externa (25% mayor que la longitud de las canecas o tubos terminales) y en el mismo ancho del diámetro de las canecas o de los tubos disponibles [FIGURA 02](#) (Excavación en las paredes de los extremos de la fosa para el alojamiento ajustado de las canecas o los tubos colocados en cada extremo de la bolsa del Biodigestor)

c) Preparación de la bolsa para el biodigestor

El tubular de 28 metros en polietileno se extiende sobre un piso seco, firme y sin piedras u objetos que puedan romperlo y se dobla longitudinalmente, a la mitad, para proceder a cortarlo, convirtiéndolo en dos tubulares de 14 metros de longitud cada uno.

Sobre uno de los tubulares, ya cortado, se señala en toda su extensión uno de sus quiebres, con un lápiz marcador de tinta oscura. Una vez eliminadas las arrugas que se forman, se procede a enrollar o doblar a lo ancho esta estructura.

Seguidamente uno de los extremos de la estructura, ya enrollada, es tomado firmemente por una persona que se introduce, sin zapatos, dentro del segundo tubular en polietileno que está extendido sobre el suelo seco, firme y limpio, y a medida que un colaborador, desde el exterior, va desenrollando o desdoblado el primer tubular, la persona se pasa de un extremo al otro por dentro del segundo tubular, dejando así un tubular dentro del otro [FIGURA 03](#) (Visualización de los tubulares interno y externo en polietileno)

Se procede entonces a eliminar las arrugas que se forman durante todo el proceso y constatar que no existe torsión en el tubular interno.

d) Colocación de la salida para el biogás

Sobre la parte superior de la bolsa, a cuatro metros de uno cualquiera de los extremos y centrado sobre el quiebre del tubular externo, se coloca uno de los empaques en neumático de 20 x 20 centímetros y se procede a marcar con el lápiz para luego perforar la bolsa en el sitio demarcado por el agujero central de una pulgada del empaque en neumático, retirando las dos secciones circulares cortadas, una a cada uno, de los tubulares de polietileno [FIGURA 04](#). (Localización de un empaque en neumático de 20x20 centímetros sobre la bolsa externa)

Se introduce entonces, de dentro hacia afuera de la bolsa, la rosca del macho en PVC de una pulgada, a la cual se le han insertado previamente y en orden, la arandela en acrílico, madera, fibra de vidrio, pasta dura o metálica y posteriormente el segundo empaque en neumático de 20x20 centímetros. Este empaque se coloca con el fin de que la arandela interna y sus bordes no entren en contacto directo con la cara interna de la bolsa, puesto que podrían cortar u oxidar el polietileno y llegar a romper la bolsa.

Una vez salida la rosca al exterior, a través del agujero central del empaque externo en neumático, se le inserta la otra arandela (de igual tamaño que la interna) y se procede a enroscar la hembra sobre la rosca del macho en PVC de una pulgada, dándole el mayor ajuste manual posible, sin romper las estructuras en PVC.

Con una tela limpia y seca se aplica el limpiador para PVC en la parte interna del acople de la hembra (no roscado) y posteriormente se le adiciona el pegante (soldadura) para PVC, con el fin de fijar una sección de 10 centímetros de tubería en PVC de una pulgada y sobre ésta acoplar y pegar uno de los extremos de un codo en PVC de una pulgada. Del otro extremo del mismo codo se acopla y pega otra sección de 10 centímetros de tubería en PVC de una pulgada y sobre su extremo libre se acopla mediante introducción a presión y sostenido con una abrazadera metálica, uno de los extremos de la manguera plástica flexible en vinilo transparente de 1 1/4 pulgadas de diámetro, que haya sido ablandada y dilatada previamente entre agua hirviente [FIGURA 5](#) Colocación del macho y la hembra en PVC como salida para el biogas)

e) Llenado de la bolsa con humo o aire

Manteniendo la estructura extendida sobre el piso limpio y cercano a la fosa, se frunce y dobla cada uno de los extremos de la bolsa, se amarra con una correa en neumático y se introduce a través de las canecas, previamente ensambladas una sobre otra (si fueran de 5 galones), o de cada caneca o estañón plástico de 15 galones, tubo en concreto o gress cuyos bordes rugosos (en ambos extremos) hayan sido recubiertos con sacos en polipropileno para evitar la ruptura de la bolsa. Se debe exceder en un mínimo de 50 centímetros de longitud de la bolsa el borde superior de las canecas o del tubo de cada extremo [FIGURA 6](#) (Introducción definitiva y amarre temporal de cada extremo de la bolsa dentro de las canecas o tubos terminales)

Se toma entonces el extremo libre de la manguera plástica flexible en vinilo transparente de 1 1/4 pulgadas y se acopla mediante una de las correas en neumático, fuerte y

extensamente enrollada, a la sección de 50 centímetros de tubería galvanizada de media pulgada de diámetro, la cual se introduce dentro de la mufla o escape de un tractor, automóvil, motocicleta, motobomba, planta eléctrica o cualquier motor de explosión, acoplándola y amarrándola al escape igualmente con otra correa en neumático [FIGURA 07](#) (Conexiones para el llenado de la bolsa con humo y posterior salida para el biogás)

El procedimiento de inflado se realiza con el motor encendido, durante el tiempo que sea necesario, hasta llenar casi completamente la bolsa con el humo de la combustión del motor, que permite por su color y olor fuerte, detectar posibles fugas por roturas de la bolsa y proceder a sellarlas con parches, antes de alojarla dentro de la fosa.

Hay que tener precaución para que el humo y la tubería galvanizada calientes no derritan la manguera o los implementos en PVC de la salida para el biogás, estructuras éstas que deben refrigerarse continuamente con agua fría aplicada externamente durante el inflado.

En el caso de no poseer un motor de combustión, la bolsa puede ser levantada por varias personas que al caminar rápido u orientarla en dirección al viento, y al mismo tiempo abrir uno de sus extremos, permitirían su llenado parcial con aire, el cual sería suficiente para lo que se persigue, que no es más que darle forma a la bolsa y eliminar las arrugas antes de alojarla dentro de la fosa.

Completado el paso anterior, se identifica el extremo de la fosa más cercano a la colocación posterior del quemador del fogón (cocina) con el fin de colocar la salida del biogás hacia ese extremo. Se aloja así la bolsa, con el quiebre superior centrado, dentro de la fosa, acomodando provisionalmente las canecas o los tubos terminales, en los huecos oblicuos que fueron excavados sobre las paredes de los extremos de la fosa.

f) Colocación y funcionamiento de la válvula de seguridad

La válvula de seguridad está constituida por un frasco en plástico transparente, de tres litros de capacidad, sobre cuya boca destapada se coloca la te en PVC de una pulgada. En el extremo de la tee dirigido hacia adentro del frasco se introduce, sin pegarla, una reducción en PVC de una a media pulgada, que a su vez acopla pegada una sección de aproximadamente 25 centímetros de tubería en PVC de media pulgada, cuyo extremo inferior debe penetrar entre tres a máximo cinco centímetros dentro del agua contenida en el frasco. El nivel del agua se mantiene hasta la mitad del frasco, aún bajo la lluvia, mediante huecos alineados en redondo y a la mitad de la altura de las paredes del frasco. [FIGURA 8](#) (Válvula de seguridad)

Ante un llenado excesivo de la bolsa con biogás, éste ingresa a través de la tee, vence la tensión de la delgada lámina de agua y se expulsa a manera de burbujas, y posteriormente sale como gas por una ventana previamente abierta o por la boca, en la parte alta del frasco. Esta ventana es utilizada para el llenado de la válvula con agua, cuando baja su nivel. Se impide así el rompimiento de la bolsa por el biogás producido en exceso o por un bajo consumo ocasional y se permite el almacenamiento permanente de todo el biogás producido, hasta alcanzar la capacidad del depósito (25% del volumen total del biodigestor) Los dos extremos superiores de la te son los de entrada y salida respectivamente del biogás proveniente del biodigestor hacia la válvula de seguridad y de

ésta hacia el quemador. Al extremo de entrada del biodigestor a la te se le introduce y pega una sección de 10 centímetros de tubería en PVC de una pulgada y a su extremo libre se acopla y pega uno de los extremos de un codo en PVC de una pulgada. Del otro extremo del mismo codo se acopla y pega otra sección de 10 centímetros de tubería en PVC de una pulgada y sobre su extremo libre se acopla y fija, con una abrazadera metálica, el extremo libre de la manguera plástica flexible en vinilo transparente (FIGURA 8), después de haberle retirado la sección de tubería galvanizada, en el caso de que la bolsa haya sido llenada con el humo de un motor.

En el extremo superior de la tee que sale hacia el quemador, se acopla y pega una sección de 10 centímetros de tubería en PVC de una pulgada, luego un codo y finalmente el último niple de 10 centímetros en PVC de una pulgada. Su extremo libre se cierra temporalmente (30 días, hasta que se inicie la producción continua de biogás) con un tapón en PVC para una pulgada y posteriormente al retirar el tapón se acopla y pega la tubería "conduit" en PVC de una pulgada o se acopla y fija mediante una abrazadera metálica la manguera negra en polietileno de 1 1/4 pulgadas que llevará el biogás hacia el quemador.

A un lado de la fosa se clava un estacón o poste que sobresale aproximadamente 1.5 metros del nivel del suelo. Este estacón se utiliza para amarrar fijamente, a su extremo superior y con ayuda de una de las correas en neumático, la válvula de seguridad. Hay que tratar de que el frasco y la te se mantengan inmóviles para evitar que el biogás pueda escaparse si la tubería queda por fuera de la lámina de agua, o por el contrario ante una introducción excesiva (mayor de 5 centímetros) de la tubería dentro de la lámina de agua, impida la salida del biogás en un momento de sobrellenado, y permita el rompimiento por estallido de la bolsa.

g) Llenado de la bolsa con agua

El llenado inicial de la bolsa puede ser hecho con agua sola, con el agua del lavado de los pisos de los alojamientos de una o varias especies animales o con el agua de las alcantarillas sanitarias para las excretas humanas (sin detergentes, ni desinfectantes), actuando el biodigestor como pozo séptico, pero capturando el biogás para utilizarlo como combustible.

A la bolsa ya alojada en la fosa y estando sin arrugas o torsiones, con el quiebre superior centrado (orientándose por la línea hecha inicialmente con el lápiz marcador), con la válvula de seguridad ya conectada y sellado el extremo de la te en la salida de la válvula de seguridad hacia el quemador mediante el tapón en PVC, se procede a introducirle, por uno o ambos extremos, una o varias mangueras conectadas al agua, cuidando de depositar el agua dentro del tubular interno y de amarrar nuevamente el o los extremos de la bolsa para no dejar escapar el humo o el aire. Este saldrá lentamente por la válvula de seguridad, a medida que el nivel del agua introducida, por la o las mangueras, desplaza el humo o el aire utilizados en el llenado inicial de la bolsa. La válvula de seguridad, en este caso también, actúa para evitar el rompimiento por estallido de la bolsa.

La bolsa se llena con agua hasta el 75% de su capacidad total y, a este nivel quedan

hechos los sellos que posibilitan las canecas plásticas o los tubos terminales al actuar a manera de codos sobre ambos extremos de la bolsa.

Con el fin de lograr el sello a este nivel de la fase líquida (75%) y, al mismo tiempo, permitir que la capacidad de la campana para el almacenamiento del biogás sea del 25% del volumen total del biodigestor, es indispensable que la excavación de las paredes de cada extremo de la fosa se haga un 25% más larga externamente y en el mismo ancho de las canecas o tubos terminales utilizados en cada extremo de la bolsa [FIGURA 9](#) (Biodigestor alojado en la fosa)

Una vez que el agua introducida alcanza el borde superior de las canecas o tubos terminales, se procede a quitar el amarre en neumático colocado previamente en cada extremo, replegando la extensión de bolsa sobrante (50 centímetros) hacia afuera y alrededor del borde superior de cada caneca o tubo terminal, fijándola circularmente con la misma correa en neumático utilizada previamente en el amarre de cada extremo de la bolsa. Acomodando, ahora si en forma definitiva y fija, las canecas o los tubos terminales, en los huecos oblicuos que fueron excavados sobre las paredes de los extremos de la fosa.

Para favorecer la salida por gravedad del efluente, a partir del borde superior de la caneca o del tubo terminal del extremo escogido como salida, se excava una zanja en declive y dirigida hacia una fosa de recolección o directamente hacia el sitio donde se quiera llevar y utilizar el efluente.

h) Cálculo del diámetro de la estructura tubular

$$\text{Diámetro} = \frac{\text{Circunferencia}}{\text{Pi} * 3.14} = \frac{2.5 \text{ metros}}{3.14} = 79.5 \text{ centímetros}$$

$$\text{Radio} = \frac{\text{Circunferencia}}{2 \times \text{Pi}} = \frac{2.5 \text{ metros}}{2 \times 3.14} = 39.3 \text{ centímetros}$$

i) Cálculo de la capacidad total del biodigestor

$$\text{Volumen del cilindro} = \text{Pi} \times \text{Radio}^2 \times \text{Longitud}$$
$$3.14 \times (0.393)^2 \text{ metros} \times 10 \text{ metros} = 4.850 \text{ litros}$$

$$\text{Fase líquida (75\%)} = 3.650 \text{ litros}$$

$$\text{Depósito para el biogás (25\%)} = 1.200 \text{ litros}$$

* Pi es una constante matemática cuyo valor es 3.14

Debe quedar claro que, aunque los dos tubulares en polietileno, tienen una longitud de 14 metros, cada extremo de la estructura que se introduce en las canecas o en cada tubo terminal, que miden aproximadamente un metro en total, implica, adicionado a los 50 centímetros de repliegue y a la pérdida en los dobleces, el gasto de dos metros de cada extremo de la estructura tubular, por lo cual, el largo de la fosa deberá ser cuatro metros menor (diez metros en este caso) que la longitud total de los tubulares, sean éstos de la

longitud que se desee.

El ancho exterior y la profundidad de la fosa (70 centímetros en este caso) deberán corresponder ambos al 90% del diámetro de la bolsa, sea ésta del diámetro que se desee (80 centímetros en esta bolsa), con el fin de que se mantenga, con ayuda de las paredes de la fosa, su forma cilíndrica y se hagan fácilmente los codos, que permiten crear el depósito superior aislado o campana para el almacenamiento del biogás.

5. Operación del Biodigestor

a) Valores de ph en la fase líquida

Aunque el rango de pH óptimo, para alcanzar la mayor eficiencia en la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, puede variar, el proceso de digestión bacteriana produce biogás a valores de pH entre 6.7 y 7.5, un medio prácticamente neutro (GRIFFIS, MOTE y KIENHOLZ, 1980). El pH se mantiene en ese rango, solo si, el biodigestor está operando correctamente. Si el pH se torna muy ácido, la acción de las bacterias metanogénicas se inhibe, aumentando la proporción de gas carbónico en el biogás (TAIGANIDES et al., 1963). Las causas por las cuales se puede acidificar la fase líquida contenida dentro del biodigestor son:

- Un cambio excesivo de la carga.
- El permanecer por largo tiempo sin recibir carga.
- La presencia de productos tóxicos en la carga.
- Un cambio amplio y repentino de la temperatura interna.

En algunos casos la alta acidez puede corregirse adicionándole agua con cal a la fase líquida.

b) Relación carbono:nitrógeno (C:N) en las excretas

Los carbohidratos y la proteína son los nutrientes indispensables para el crecimiento, desarrollo y actividad de las bacterias anaeróbicas. El carbono contenido en el estiércol, es el elemento que las bacterias convierten en metano (CH_4). El nitrógeno es utilizado para la multiplicación bacteriana y como catalizador en el proceso de producción de biogás. Si su nivel es alto el proceso se retarda por el exceso de amoníaco y la alcalinización de la fase líquida, y puede llegar a detenerse.

El contenido de carbono en el estiércol del bovino es excesivo, como lo es también el contenido de nitrógeno en el estiércol del cerdo. De allí, la posibilidad y ventaja de alimentar al biodigestor con las excretas mezcladas de varias especies animales, lo que permite balancear su contenido de nutrientes e incrementar así, la eficiencia del proceso de producción de biogás (PERSSON et al., 1979).

c) Rangos de temperatura para la operación del biodigestor

La tasa de fermentación anaeróbica de los sólidos orgánicos y su conversión parcial en

biogás, están directamente relacionadas con la temperatura interna de operación. Aunque el proceso se lleva a cabo en un amplio rango de temperaturas, desde 15°C hasta 60°C, la mayor eficiencia de conversión se obtiene en los rangos de temperatura mesofílico (30°C a 40°C) y termofílico (55°C a 60°C)

La mayoría de las bacterias metanogénicas digieren la materia orgánica más eficientemente en el rango mesofílico, que puede ser alcanzado por la fase líquida, no solamente por efecto de la temperatura ambiental, sino también porque la temperatura interna se incrementa debido a la generación de calor ocurrida durante la fermentación de la materia orgánica (proceso exotérmico). Debido a esto, a medida que disminuye la temperatura ambiental, por efecto de la altura, es conveniente recolectar el agua del lavado de las instalaciones pecuarias y sanitarias del hogar, cuando se van a utilizar en la alimentación del biodigestor, bien durante las horas más cálidas del día o bien realizando el lavado con agua tibia, utilizando parte del biogás o calentadores solares para ello.

d) Suministro de excretas al biodigestor

Si se requiere la producción diaria de biogás, con esta misma frecuencia debe alimentarse al biodigestor.

Ya que comúnmente el lavado de las instalaciones para el alojamiento de animales se realiza diariamente, de allí la conveniencia de que el desagüe de los pisos permita la conexión directa con el biodigestor y que dicho desagüe posea un interruptor manual, para desviar y evitar la entrada en exceso del agua de lavado mezclada con las excretas al biodigestor.

e) Proporción entre excretas y agua

Las excretas sólidas (estiércol) contienen, en promedio, 15% de materia seca y éstas deben ingresar al biodigestor como una suspensión en agua con aproximadamente 3% de materia seca, esto implica una mezcla de cuatro partes del agua de lavado por una parte de estiércol fresco.

f) Tiempo de retención y cantidad diaria de excretas

El tiempo de retención, suficiente para la digestión anaeróbica más eficiente de la materia orgánica componente de las excretas, es de 50 días; por lo que la cantidad diaria de excretas para alimentar al biodigestor se calcula dividiendo el volumen de su fase líquida (75% de su capacidad total) entre los 50 días de retención. Para este caso, 3.650 litros/50 días = aproximadamente 75 litros/día, de los cuales, 15 kilos deberán ser de estiércol fresco y los 60 litros restantes serán del agua de lavado. Esto equivale a uno y medio baldes o cubos llenos con estiércol fresco mezclados con seis baldes con agua.

g) Número de animales necesarios para la alimentación del biodigestor

La cantidad y composición del estiércol producido por las diferentes especies animales

varían con el peso del animal y con la calidad y cantidad de alimento consumido. La producción diaria aproximada de estiércol, en base húmeda y en algunas especies se aprecia en el CUADRO 2.

CUADRO 2.

PRODUCCIÓN DIARIA DE ESTIÉRCOL ¹ EN DIVERSAS ESPECIES ANIMALES	
Especie animal (Kg)	Estiércol producido ²
Bovino de raza de carne o de doble propósito	6
Bovino de raza lechera	8
Equino, mular o asnal	7
Oveja o cabra	4
Cerdo	4
Conejos o cuyes	3
1/ Base húmeda	
2/ Por cada 100 Kg de peso vivo	

Del CUADRO 2 se deduce que la granja debe tener una población animal mínima de un bovino adulto de cualquier tipo, o un caballo, un mular o dos asnos confinados durante 12 horas diarias o, 15 ovejas, cabras, cerdos en levante, o cinco cerdas de cría confinados permanentemente, un plantel de 100 conejas o de 500 cuyes, o cualquier combinación de especies animales o de humanos que le permita obtener 15 kilogramos diarios de estiércol fresco (en este caso específico), para alimentar diariamente al biodigestor.

6. Utilización del Biogás para Cocinar

a) Instalación del conducto para el desplazamiento del biogás hacia el quemador

El biogás se desplaza fuera de la campana únicamente por efecto de la presión atmosférica, por lo que se requiere de una tubería amplia para disminuir el roce y favorecer su rápido y fácil desplazamiento hacia el quemador.

Al iniciar la instalación del conducto, se debe amarrar provisionalmente un quiebre provocado sobre la manguera, flexible y transparente, que une al biodigestor con la válvula de seguridad. Esto con el fin de evitar temporalmente (mientras se coloca la llave de paso hacia el fogón) el escape del biogás almacenado entre la campana.

Luego a partir del codo con su sección pegada en PVC de una pulgada, en la salida hacia el quemador y una vez retirado el tapón provisional en PVC, se une y pega a ella la primera sección de tubería "**conduit**" en PVC de una pulgada, que trae las uniones haciendo parte de ella, uniendo y pegando tantas secciones como sean necesarias (vienen comercialmente de 3 metros de longitud), para llegar hasta el sitio donde se colocará el quemador para el biogás.

La tubería "**conduit**" de una pulgada puede ser reemplazada por manguera negra en polietileno de 1 1/4 pulgadas que viene en rollos de hasta 100 metros de longitud y tiene un costo menor. La tubería para conducir el biogás, hacia el sitio de utilización, no debe ser enterrada para evitar la condensación interna de humedad y el sello que haría el agua dentro del conducto.

A distancias mayores de 100 metros entre el biodigestor y el quemador, se debe utilizar tubería o manguera de mayor diámetro para la conducción del biogás.

b) Quemador del fogón

Una vez con el extremo final de la tubería "**conduit**" o de la manguera negra en el sitio escogido para el quemador (cocina), se le introduce y pega o se fija mediante una abrazadera metálica una reducción en PVC de una a media pulgada de diámetro, para empatar y pegar sobre ella la sección sobrante de tubería en PVC de media pulgada y a su extremo libre pegar el macho en PVC de media pulgada, para que su rosca se acople con la llave de paso en bronce o de balín de media pulgada. Del otro extremo de la llave se enrosca la sección de tubería galvanizada de media pulgada y a su extremo se enrosca el codo galvanizado a cuyo extremo libre se enrosca el niple galvanizado, para dirigir la salida del biogás hacia arriba, quedando así conformado el quemador para el biogás [FIGURA 10](#) (Quemador del fogón para cocción con biogás)

El quemador así construido, en tubería galvanizada, puede aprisionarse entre las caras laterales más angostas de dos ladrillos, bloques o adobes que a su vez sirven de base a una lata redonda y sin fondo, de galletas o leche en polvo, que actúa como soporte para las ollas o utensilios que contienen el alimento a ser cocinado.

Con el fin de sostener recipientes de diferentes tamaños se debe colocar una parrilla de alambre sobre el borde superior de la lata.

Al hacer derivaciones de la tubería galvanizada, se pueden colocar tantos quemadores independientes, con sus propias llaves de paso, como sean necesarios (FIGURA 10)

c) Producción y consumo de biogás

Después de 30 días de haberse iniciado la alimentación diaria del biodigestor, el biogás ya ha desplazado, a través de la válvula de seguridad, el humo del motor o el aire introducido y atrapado inicialmente dentro de la campana. Esto permite que al abrir la llave de paso y acercar una llama o chispa, al extremo del niple en tubería galvanizada, se inicie una combustión con llama limpia, incolora y de color azul que alcanza una alta temperatura que permite la cocción rápida de los alimentos, al igual que el gas propano.

Se puede esperar una producción diaria de biogás equivalente al 35% del volumen de la fase líquida (aproximadamente 1200 litros diarios en este caso).

Con un consumo de hasta 150 litros de biogás por hora y por cada quemador, se logra

que el biogás producido permita un tiempo de cocción, en este caso, de ocho horas por día.

7. Otros Usos del Biogás

El biogás puede ser utilizado igualmente como combustible en quemadores para la calefacción de pollitos, cerdos y otros animales recién nacidos, para la iluminación mediante lámparas incandescentes, que no requieren del gas a presión, al igual que las lámparas antiguas de carburo; puede ser usado también como combustible único para refrigeradores, calentadores de agua y secadores de granos y forrajes.

Se puede utilizar además como segundo combustible en motores de explosión estacionarios o móviles, cuya ignición se hace con diesel o gasolina y una vez en movimiento se reduce el ingreso del combustible inicial al 15% y se introduce el biogás en un 85%, a través del purificador de aire o directamente dentro de la cámara de cada inyector.

8. Valor del Efluente del Biodigestor como Fertilizante

El efluente del biodigestor puede ser utilizado como abono orgánico, puesto que la digestión anaeróbica, comparada con la descomposición de las excretas al aire libre, disminuye las pérdidas para el nitrógeno del 18% al 1% y del 33% al 7% para el carbono.

Dentro del biodigestor no existen pérdidas apreciables para el fósforo, potasio y calcio contenidos en las excretas.

El contenido de nitrógeno, fósforo y potasio comparado entre estiércol fresco y estiércol biodigerido de bovino, durante 30 días, se aprecia en el CUADRO 3.

En un trabajo realizado en México (GOMEZ y VINIEGRA, 1979), el valor del estiércol fresco de bovino como fertilizante para lechuga, fue comparado con un fertilizante comercial y con el estiércol digerido de bovino, durante 30 días en un biodigestor, y mezclado antes de su aplicación con 50% de nitrógeno en forma de urea. Cada forma de fertilizante se aplicó hasta proveer el equivalente de 80, 120 y 200 Kg. de nitrógeno por hectárea. Se obtuvo un incremento lineal en la producción de lechuga, a medida que se aumentó la cantidad de nitrógeno aplicado y no hubo diferencia significativa en respuesta a las diversas formas del fertilizante utilizado.

CUADRO 3

Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en estiércol fresco y biodigerido de bovino (promedio \pm E.S. promedio)			
	Nitrógeno (% en M.S.)	Fósforo (% en M.S.)	Potasio (% en M.S.)
Estiércol fresco	2.0 + 0.08	0.6 + 0.2	1.7
Estiércol biodigerido	2.6 + 0.10	1.4 + 0.2	1.0
Fuente: Adaptado de Gomez y Viniegra (1979)			

9. Otros Usos del Efluente del Biodigestor

El efluente del biodigestor, que pierde todo el olor característico del estiércol que lo originó, puede ser utilizado en el mejoramiento de los suelos arcillosos y arenosos que son pobres en humus, y como medio nutritivo de los vegetales bajo cultivo hidropónico y cultivos orgánicos en invernadero o en el campo.

El efluente puede ser utilizado también como alimento para animales mezclándolo, para mejorar su gustocidad, con granos, tortas, mieles o forrajes ya que el efluente puro posee una concentración de aminoácidos esenciales similar al grano de soya (STOUT, 1983).

10. Mantenimiento del Biodigestor

En el caso de presentarse rupturas pequeñas, mientras el polietileno no esté degradándose (tostado), se puede proceder a sellar los huecos con trozos de neumático que se fijan a la superficie de la bolsa con ayuda de un pegante. Realizar una revisión periódica de los conductos y sus uniones con el fin de evitar posibles fugas del biogás, que es un combustible explosivo y de olor fuerte al igual que el gas propano, por lo que debe evitarse su utilización descuidada en recintos cerrados.

Internamente, sobre la superficie de la fase líquida tiende a formarse una "nata" flotante, constituida por el material fibroso no digerido por las bacterias. Esta nata puede deshacerse desde el exterior al hacer presión a todo lo largo de la superficie de la campana, aprovechando para ello las ocasiones en que la campana o depósito del biogás se encuentre vacío. Esta ruptura de la "nata" permite que el biogás salga libremente desde dentro del líquido hacia la campana.

Gracias a la utilización de materiales sintéticos (polietileno, caucho, fibra de vidrio, acrílico y poliuretano, polivinilo o PVC), en todos los conductos que entran en contacto con el biogás, se evita la alta corrosión del biogás sobre los metales.

La transparencia del vinilo de la manguera que forma la salida para el biogás, desde la campana hasta la válvula de seguridad, permite visualizar el agua acumulada por condensación, que puede formar un sello en las curvas de dicha manguera, haciendo posible evitarlo.

La válvula de seguridad debe ser instalada en cualquier sitio, con declive, de la tubería para la conducción del biogás hacia el quemador. Esto con la finalidad de poderla utilizar además para captar por gravedad, el agua proveniente de la posible condensación de humedad dentro del conducto. Debido a que el agua contenida en la válvula de seguridad se llena de lama o algas, el frasco debe lavarse cada que sea necesario para facilitar la salida del biogás producido en exceso.

11. Protecciones Adicionales al Biodigestor

La fosa del biodigestor debe ser techada con materiales de producción local (guadua, bambú, caña brava, hoja de palma, etc.), que disminuyen la condensación interna de humedad e impiden la entrada directa del agua lluvia y también de los rayos ultravioleta del sol, que llegan a tostar el polietileno, lo que disminuye su vida útil.

La fosa debe ser protegida con una cerca alrededor para evitar la caída accidental de personas o animales sobre la bolsa del biodigestor, lo que podría ocasionar su rompimiento.

Las estructuras firmes de la salida para el biogás (hembra y secciones de tubería en PVC) se amarran con un alambre liso y se mantienen fijas y tensionadas hacia arriba, utilizando para ello la estructura del techo colocado sobre la fosa del biodigestor. Este amarre evita que por el peso de las estructuras de la salida para el biogás, la campana del biodigestor caiga sobre la superficie del líquido interno e impida la salida del biogás almacenado en todo el depósito.

En zona de ladera y con el fin de evitar que, durante las lluvias, la fosa se llene con el agua escurrida, cuyo ingreso no puede ser evitado por el techo, deben excavarse zanjas paralelas a la pared superior de la fosa, para desviar dicha agua.

De ser posible, se debe sembrar una barrera (pastos de corte, caña de azúcar, limoncillo, vetiver, etc.) a lo largo de las zanjas, para disminuir la fuerza y ayudar a desviar el agua de escorrentía. Puede sembrarse un cultivo de cobertura sobre el piso alrededor de la fosa para evitar su enmalezamiento, pero no deben sembrarse árboles en las cercanías de la fosa puesto que sus raíces pueden llegar a perforar la bolsa.

Hay que tener la precaución de no permitir la entrada al biodigestor de basuras, arena, cemento, piedras, trozos de madera, hojas o tallos de forraje y fibras varias, puesto que puede taparse la entrada y a largo plazo llenarse el fondo con sedimentos que disminuirían la vida útil de la bolsa. Por lo tanto, es necesario colocar una trampa para sólidos o desarenador, como parte del canal de conducción de las excretas y una malla o anejo sobre el extremo por el que ingresan las excretas al biodigestor.

En ningún caso deberá introducirse estiércol seco ni estiércol fresco en cantidades excesivas y que no hayan sido previamente diluidos en agua, puesto que se producirá un empastamiento de la fase líquida. Esto impide el flujo y la salida de las partículas sólidas del estiércol suspendidas en el efluente. En caso de que se presente el empastamiento o

la acumulación de sedimentos en el fondo de la bolsa del biodigestor, estos sólidos pueden expulsarse mediante la introducción, por el tubo terminal de cargue, de una manguera conectada a una motobomba con abundante agua a presión durante dos a tres horas, dejando salir el efluente.

Se debe colocar también una tapa sobre las canecas o tubos terminales de cada extremo, con el fin de impedir la entrada de cantidades excesivas de agua durante las lluvias, teniendo la precaución de quitar ambas tapas durante el llenado diario del biodigestor, lo que implica su vaciado simultáneo, puesto que el piso del fondo de la fosa se encuentra a nivel y el biodigestor es de flujo continuo. Como tapas para las canecas terminales de la bolsa pueden utilizarse las mismas tapas de cada extremo de las canecas plásticas, que les fueron cortadas previamente para convertirlas en tubos.

Cuando en la limpieza de los locales para el alojamiento de los animales de la granja sean utilizados insecticidas, detergentes o desinfectantes, las aguas de estos lavados, durante un período de hasta tres días después de la aplicación, no deben ingresar al biodigestor, por su efecto destructivo sobre las bacterias productoras de biogás (metanogénicas).

Ya que la presión ejercida por el biogás producido y almacenado dentro de la campana del biodigestor puede desplazar hacia arriba las livianas canecas plásticas terminales, deshaciendo los codos y la campana y permitiendo el escape de todo el biogás producido diariamente; es necesario que, una vez instalado el biodigestor, se coloque sobre las canecas plásticas terminales, para evitar su desplazamiento, una capa gruesa de tierra húmeda o tierra-cemento suavemente compactada.

En áreas inundables o en suelos con alto nivel freático es necesario construir la fosa, para alojar el biodigestor, sobre la superficie del suelo. Una forma eficiente y de bajo costo para hacer la fosa es mediante gaviones colocados sobre el suelo a manera de una trinchera o hilada de ladrillos, con las mismas medidas internas de la fosa bajo suelo. Los gaviones se hacen mezclando suelo arcilloso con cemento o con cal viva molida, en la proporción de seis partes de suelo por una parte de cemento o de cal viva y empacando dicha mezcla en sacos de polipropileno cuya boca se cierra una vez llenos. Por acción del agua de lluvia y el sol la mezcla se solidifica en corto tiempo.

Dentro de la única tee en PVC de una pulgada de diámetro que está colocada en la tubería de conducción del biogás y sobre la válvula de seguridad, se debe colocar una esponjilla metálica o alambrina. Esta permite filtrar y descontaminar tanto el biogás que va hacia el quemador, como el que se elimina por exceso de producción o por bajo consumo, a través de la válvula de seguridad. La limadura de hierro de la esponjilla reacciona con el ácido sulfhídrico, altamente tóxico, contenido en el biogás, convirtiéndolo en sulfato de hierro, el cual es inofensivo. La esponjilla metálica debe ser cambiada cada seis meses y por ello la reducción o buje de la válvula no se adhiere con pegante, permitiendo cambiar la esponjilla fácilmente y cuantas veces sea necesario.

AGRADECIMIENTOS

A la señora Cielo Núñez de Rodríguez por su eficiente trabajo de mecanografía y al señor Julio César García por la elaboración de las Figuras. Ambas personas laboran actualmente en el Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT con sede en Cali, Colombia.

A los usuarios de los biodigestores en América Tropical, Asia y África, que han estimulado, con su interés, la escritura de este manual.

Al Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria-CIPAV, con sede en Cali, Colombia, quienes continúan mejorando y promoviendo actualmente esta útil tecnología.

12. BIBLIOGRAFIA

- Especies para leña: arbustos y árboles para la producción de energía. Traducción de la edición inglesa por VERA ARGUELLO DE FERNANDEZ y TRADINSA.-- Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza - CATIE. Proyecto Leña y Fuentes Alternas de Energía, 1984. 344p.
- GOMEZ, J. y G. VINIEGRA (1979). Uso de estiércol bovino digerido anaeróbicamente como fertilizante para vegetales. Producción Animal Tropical, 4:25-29.
- GRIFFIS, C.L., C.R. MOTE y E. KIENHOLZ (1980). Methane production from agricultural wastes. Agricultural Experiment Station, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas (USA).
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS (1980). Digestores de desechos orgánicos. Boletín Energético No.14, Organización Latinoamericana de Energía, Cuernavaca, Morelos (México).
- McGARRY, M. y J. STAINFORTH (1978). Compost, fertilizer and biogas production from human and farm wastes in the People's Republic of China. IDRC-TS8e, IDRC, Ottawa (Canada).
- PERSSON, S.P.E, H.D. BARTLETT, A.E. BRANDING y R.W. REGAN (1979). Agriculture anaerobic digesters. Design and operation. Agricultural Experiment Station, The Pennsylvania State University, University Park. Pennsylvania (USA).
- STOUT, B.A. (1983). Can agriculture provide enough biomass for fuels. Agricultural Engineers Yearbook, ASAE, St. Joseph, Missouri (USA).
- TAIGANIDES, P. (ed) (1963). Anaerobic digestion of hog wastes. Journal of Agriculture Engineer Research, 8:327-333.