



*The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library*

**This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.**

**Help ensure our sustainability.**

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

[aesearch@umn.edu](mailto:aesearch@umn.edu)

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

*No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.*

# BIODIGESTOR MÓVIL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS UTILIZANDO ESTIÉRCOL DE OVINO

## MOBILE BIODIGESTOR FOR THE PRODUCTION OF BIOGAS USING SHEEP MANURE

González-Medina, E.E.<sup>1\*</sup>; Rössel-Kipping, E.D.<sup>1</sup>; Amante-Orozco, A.<sup>1\*</sup>; García-Herrera, E.J.<sup>1</sup>; Ortiz-Laurel, H.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados. Campus S.L.P. Iturbide No. 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. C. P. 78600. México. <sup>2</sup>Colegio De Postgraduados Campus Córdoba Veracruz, México.

\*Autor de correspondencia: aamante@colpos.mx

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue diseñar conceptualmente un biodigestor de campo que se caracterizara por tener movilidad, integración de otras energías renovables en su operación y funcionamiento, y alta capacidad de materia seca, con el fin de disponer de una fuente alternativa de energía para el altiplano mexicano y cuidar el medio ambiente. La investigación se realizó en Salinas, San Luis Potosí, México. Se eligió estiércol de ovino como residuo orgánico, se realizó la optimización de transporte y ubicación de almacenes según la disponibilidad en el municipio. Se efectuaron ensayos de filtración en estiércol y se obtuvo el peso seco en laboratorio. El biodigestor móvil termofílico permitió mejorar el proceso de la producción de biogás al reducir la cantidad de agua necesaria en más del 50 % por la alta concentración de sólidos totales utilizados; al ahorrar energía para el transporte del suministro del residuo y distribución de biofertilizante por la movilidad del biodigestor; y al reducir el tiempo de digestión del sustrato alrededor del 50% por su calentamiento usando energía. Además, no es necesario el mezclado del sustrato de forma hidráulica, mecánica o neumática, dado que esa función la realiza la recirculación del líquido y del biogás en el biodigestor. Se mejoran también las propiedades físico-químicas de los suelos agrícolas al aplicar el biofertilizante coproducto del proceso. Es posible utilizar el biodigestor en forma móvil, transportable o estacionario. Es necesario realizar ensayos de producción de biogás con el biodigestor para determinar su factibilidad.

**Palabras clave:** Energía alterna, ahorro de agua y energía en el tratamiento de residuos orgánicos.

### ABSTRACT

The objective of this study was to conceptually design a field biodigester that is characterized by being mobile, integrating other renewable energies in its operation and functioning, and a high capacity for dry matter, with the aim of having an alternative source of energy for the Mexican highlands and to care for the environment. The research was done in Salinas, San Luis Potosí, México; sheep manure was chosen as organic residue, and the optimization of transport and location of storehouses was performed based on the availability in the municipality. Manure filtration assays were done and the dry weight was obtained in the laboratory. The mobile thermophilic biodigester presented the possibility of improving the biogas production process with the following effects: reduction of the water necessary in more than 50 % due to the high dry matter. Because of the mobility, energy is saved for transport of the material supply and biofertilizer distribution. Solar heating of the substrate allows reducing the processing time around 50 %. The process of mixing the hydraulic, mechanic, pneumatic substrate is not necessary because only the liquid moves. In addition, soil compacting is reduced because of the weight reduction of the biofertilizer. It is possible to use the biodigester in a mobile, transportable or stationary way. Assays are necessary in the production with different technological uses to receive experiences of feasibility.

**Keywords:** alternative energy, energy reduction of the process and water.

**Agroproductividad:** Vol. 10, Núm. 12, diciembre. 2017. pp: 106-115.

**Recibido:** junio, 2016. **Aceptado:** septiembre, 2017.

## INTRODUCCIÓN

**D**urante las últimas décadas, el planeta ha experimentado un acelerado proceso de calentamiento global. La temperatura media de la atmósfera terrestre y de los océanos se ha elevado desde finales del siglo XIX, esto debido a la actividad humana relacionada con la industrialización, principalmente por la quema de combustibles a base de petróleo, gas y carbón (IPCC, 2002; Bravo, 2008; Rojas, 2009). De acuerdo a Domínguez (2002) y Guevara (1996), es necesario trazar una estrategia con el tratamiento y disposición final de desechos sólidos y líquidos (Guevara, 1996). El suministro descentralizado de energía significa que la energía se produce y consume en el mismo lugar. Aunque para algunos, como GVBI Hessen (1985) y Grawe (1989), la descentralización se relaciona con el tamaño de las plantas generadoras y su adaptación a las condiciones locales. La producción descentralizada de energía permite satisfacer las necesidades energéticas de cada lugar con los recursos energéticos de que ésta disponga, disminuyendo el efecto sobre el medio ambiente y contribuyendo a disminuir las pérdidas energéticas ocasionadas por los procesos de transmisión y distribución (Gavilán, 2004). En ese sentido, Rössel et al. (2013) mencionan que es necesario tomar las medidas necesarias para asegurar

una constante interacción entre el progreso científico y técnico, de tal manera que la producción energética se realice con una mayor eficiencia y con bajos costos. Bajo este contexto, el uso de biodigestores para la producción descentralizada de una energía limpia como el biogás y la reutilización de desechos, así como la integración de otras energías renovables en el proceso que impacten positivamente los balances de energía y de emisión de GEI, es una alternativa interesante y prometedora. El objetivo de este trabajo, fue diseñar un prototipo de biodigestor de campo que se caracterice por: a) su movilidad, de tal manera que el tratamiento de residuos orgánicos y producción de biogás sean descentralizados, b) se integren otras energías renovables en su operación y funcionamiento para aumentar la producción de biogás y su contenido de metano, c)

tenga alta capacidad de carga de materia orgánica para un uso más eficiente del agua. Con lo cual se dispondrá de una fuente alternativa de energía para el altiplano mexicano y de una tecnología que permita el cuidado al medio ambiente.

## MATERIALES Y METODOS

La investigación se realizó en el Municipio de Salinas, San Luis Potosí, México; el clima corresponde a Seco semifrío con lluvias en verano y precipitación invernal que van desde 300-500 mm al año (INEGI, 2009). La agricultura y la ganadería ocupa el 22.80% de la superficie municipal, y se cría ganado bovino, porcino, ovino y caprino (INEGI, 1987). Se consideraron los siguientes aspectos: optimización de transporte y almacenaje, aspectos climáticos, dimensiones del biodigestor, modo de operación, almacenamiento del biogás, y los posibles usos de la energía. Un ejemplo de biodigestor estacionario con calentador solar integrado es el desarrollado en el

Colegio de Postgraduados (Figura 1). También se analizaron 60 plantas existentes las cuales realizan tareas parciales del flujo tecnológico ideal para el uso de un biodigestor que se muestra en la Figura 2.

El diseño del biodigestor móvil consideró que debería contar con las características de movilidad para transportar el biodigestor de un almacén a otro, el



**Figura 1.** Biodigestor estacionario utilizando energía solar.

biodigestor integraría energías renovables en su operación y funcionamiento (proceso termofílico), con la finalidad de optimizar los balances de energía y de emisión de gases de efecto invernadero; y debería reducir el agua del proceso por una alta concentración de masa seca en el biodigestor. En cuanto al residuo orgánico, se buscó que tuviera alta disponibilidad en el municipio de Salinas. Por lo tanto, y con información de SINIIGA (2015) se obtuvieron las localidades del municipio con ganado ovino. La producción diaria de estiércol por localidad se estimó entonces asumiendo un peso promedio de 30 kg por animal, los cuales, según Cruz (1986) generan 0.7 kg diarios de estiércol. Se recogieron 250 g de estiércol de borregas en dos formas, una oreada y otra fresca. Se colocaron en una estufa a 65 °C y se mantuvo en ella hasta obtener peso

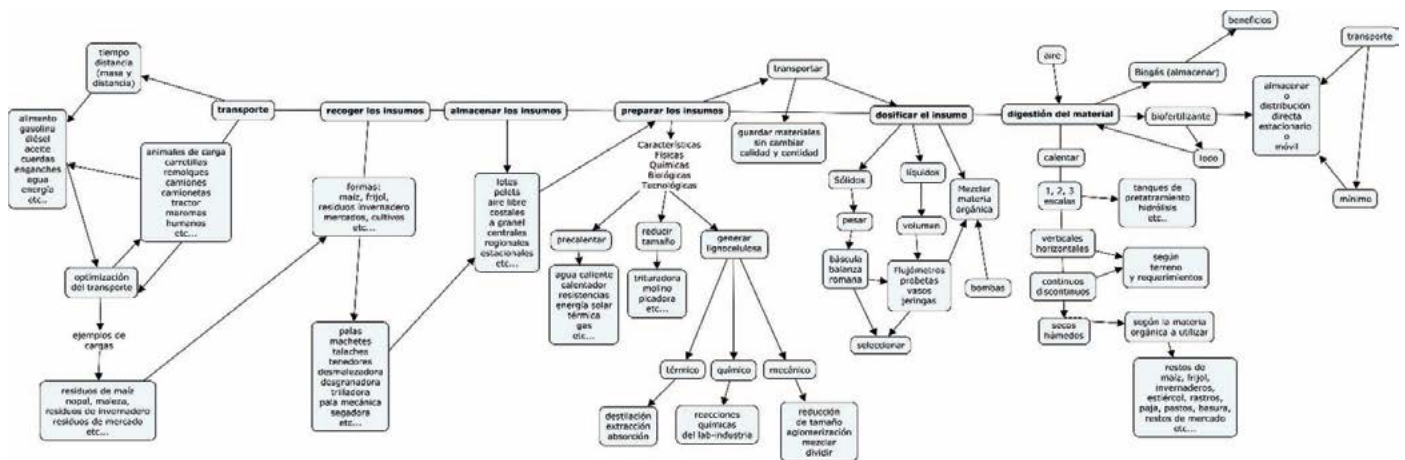


Figura 2. Flujo tecnológico del biodigestor.

constante, con lo cual el ensayo se realizó con estiércol fresco, y otro oreado. En la Figura 3 se presenta un diagrama del ensayo de filtración de agua en estiércol.

### Optimización del transporte y almacenaje de residuos

Para la optimización del transporte se utilizó el método para un modelo continuo propuesto por Rössel et al. (2013). El método se utilizó para determinar el sitio de ubicación del almacén dentro de una zona determinada con diferentes áreas productoras del residuo, en este caso, de residuos orgánicos, y consiste en seleccionar un lugar para concentrar los residuos de tal manera que su transporte requiera un mínimo de energía. El cálculo requiere de establecer un sistema de coordenadas cartesianas con divisiones elegidas arbitrariamente. A los puntos medios de las áreas productoras ( $A_i$ ) se les asigna las coordenadas correspondientes  $x_i$  y  $y_i$ . También se estima el rendimiento promedio de residuos orgánicos en cada área productora ( $a_i$ ). La distancia del punto medio de  $A_i$  hasta el lugar  $D$  se determina con la ecuación:

$$e_i = \sqrt{(x_D - x_i)^2 + (y_D - y_i)^2}$$

La selección del lugar  $D$  se realiza entonces en función de que el transporte de los residuos represente un costo mínimo, lo cual se determina con la siguiente expresión:  $\sum_{i=1}^n a_i * e_i \rightarrow \text{mínimo}$ ; El valor se aproxima al mínimo previsto cuando las coordenadas  $x_D$  y  $y_D$  donde se ubicará el almacén se calculan con las siguientes ecuaciones:  $x_D = \frac{\sum_i x_i * a_i}{\sum_i a_i}$ ;

$$y_D = \frac{\sum_i y_i * a_i}{\sum_i a_i}$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con datos de SINIIGA (2015) se determinaron las áreas productoras de estiércol de ovino en el municipio de Salinas. Para cada una de estas áreas se determinaron las coordenadas  $x$  y  $y$  de su punto medio, a la vez que se estimó la producción diaria del residuo orgánico, con lo que, finalmente, se calcularon las coordenadas del lugar donde se debe ubicar el almacén, de tal manera que el uso de energía para el transporte del estiércol sea mínimo (Figura 4). Como ejemplo de la forma como se determinaron los lugares donde se establecerán los almacenes de residuos orgánicos (estiércol en nuestro caso), el Cuadro 1 presenta la información

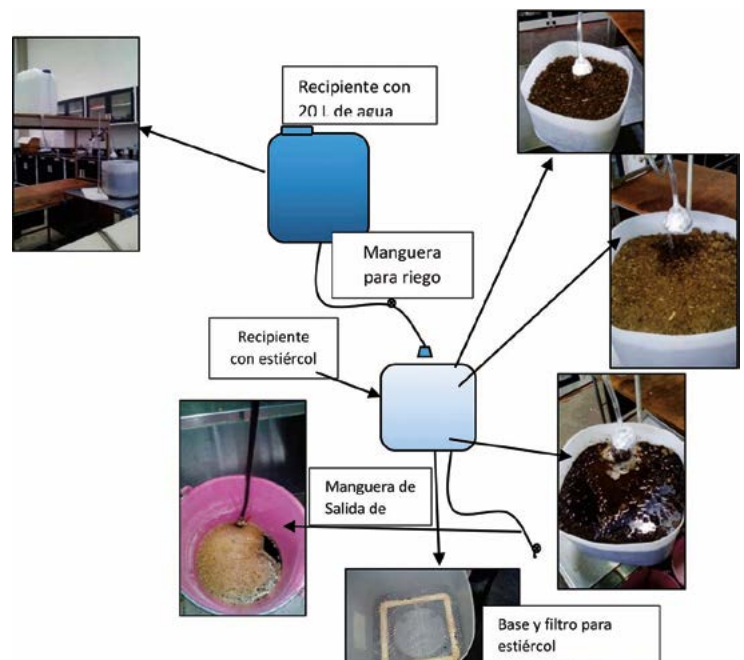
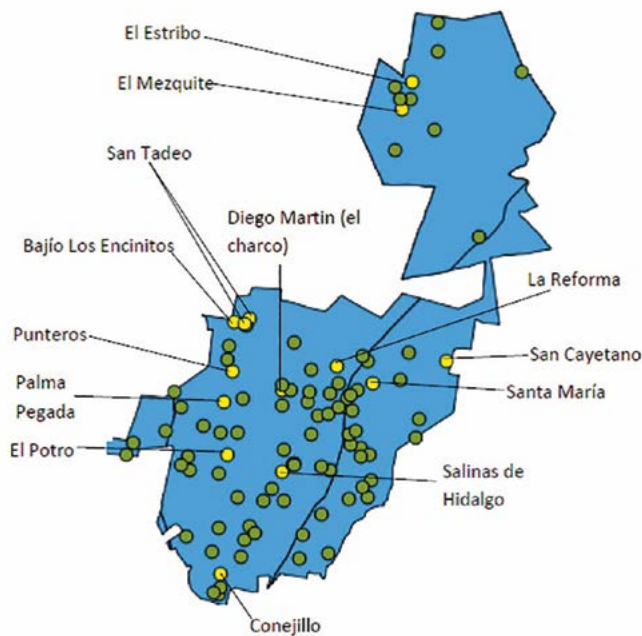
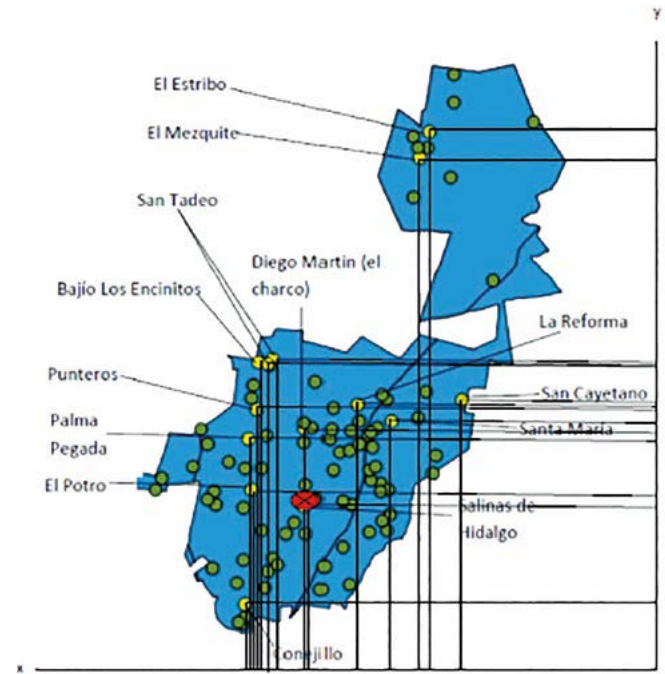


Figura 3. Filtrado de agua en stock de estiércol fresco y oreado respectivamente.





**Figura 4.** Localidades en el municipio de Salinas, SLP, México, con residuos de ovinos.



**Figura 5.** Ubicación del almacén en el municipio de Salinas, SLP, México, en las coordenadas  $x_D$  y  $y_D$  calculadas.

necesaria para determinar el lugar de un almacén de acuerdo al método empleado.

Con la información del Cuadro 1 se obtuvieron las coordenadas  $x_D$  y  $y_D$  donde se ubicó el almacén de residuos de ovinos como se indica a continuación.

$$x_D = \frac{\sum_i x_i * a_i}{\sum_i a_i} = \frac{146349}{12467} = 11.7$$

$$y_D = \frac{\sum_i y_i * a_i}{\sum_i a_i} = \frac{110591}{12467} = 8.9$$

**Cuadro 1.** Localidades con ovinos en el municipio de Salinas y cálculos necesarios para determinar las coordenadas  $x_D$  y  $y_D$  para el punto central de almacenaje.

Localidad $A_i$	Ovinos (cabezas)	Coordenadas		Producción diaria de residuos (kg) $a_i$	$x_i * a_i$	$y_i * a_i$
		$x_i$	$y_i$			
Bajío los Encinos	35	12.7	12.8	24.5	311	314
Conejillo	2388	13.0	5.5	1671.6	21731	9194
Diego Martín	41	11.2	10.9	28.7	321	313
El Estribo	39	7.0	20.3	27.3	191	554
El Mezquite	36	7.4	19.5	25.2	186	491
Palma Pegada	4481	13.0	10.1	3136.7	40777	31681
El Potro	1192	12.8	9.1	834.4	10680	7593
Punteros	52	12.7	11.5	36.4	462	419
La Reforma	1173	9.5	11.7	821.1	7800	9607
Salinas de Hgo.	8112	11.0	8.5	5678.4	62462	48266
San Cayetano	138	6.2	11.9	96.6	599	1150
San Tadeo	41	12.0	13.0	28.7	344	373
Santa María	82	8.4	11.1	57.4	482	637
Total	17810			12467.0	146349	110591

En la Figura 5 se muestra la ubicación de un almacén conforme a las coordenadas  $x_D$  y  $y_D$  calculadas y con la cual se optimizó la cantidad de energía requerida para el transporte de los residuos orgánicos que se generan diariamente. Algunos autores consideran que es necesario mediante distribuciones óptimas de lugares, nuevas tecnologías, programas de ahorro y mejora de la eficiencia energética al reducir en gran medida costos medioambientales, económicos y salubres. (Lakshmanan y Han,

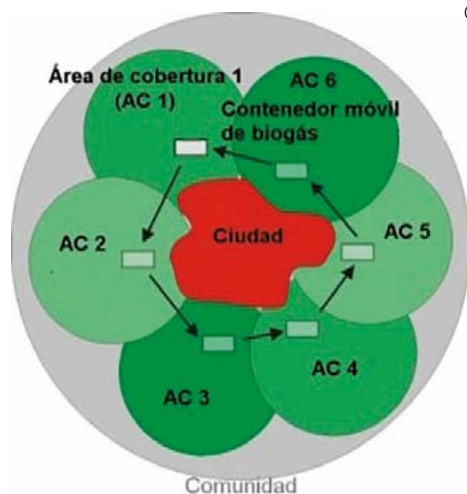
1997; Schipper *et al.*, 1997; Steenhof *et al.*, 2006).

De acuerdo a la distribución de las localidades productoras de residuos de ovinos a lo largo y ancho del municipio de Salinas, se proponen dos tipos de esquemas (modelos) para la recolección de residuos orgánicos los cuales

servirán de materia prima para la producción de biogás centralizado. En lo que respecta al primer modelo, en la Figura 6 se muestra una comunidad compuesta por la ciudad en el eje central, seis áreas de coberturas distintas y cada una de ellas con su respectivo almacén descentralizado. El biodigestor que tendrá la característica de ser móvil, se podrá desplazar a cada una de las áreas y aprovechar los residuos orgánicos generados en dicha zona para la producción de biogás y biofertilizante para aprovecharse en el mismo sitio; es más factible el llevar un biodigestor a donde están los residuos que lo contrario, ya que el gasto energético, de tiempo y económico, es menor.

La Figura 7 muestra el otro esquema o modelo propuesto de recolección de residuos orgánicos. Se divide en cuatro zonas, cada una con la misma área, en cada uno de los cuadrantes se ubica un almacén parcial

en los cuales se guardarán los residuos orgánicos, para después transportarlos a un almacén central donde el biodigestor móvil tratará dichos materiales mediante fermentación anaerobia con la respectiva producción de biogás y biofertilizante. Tal como lo mencionan diversos autores que consideran el ahorro y la eficiencia energética como un elemento esencial, y ciertamente la ganancia principal durante las próximas décadas, hasta



**Figura 6.** Diagrama de optimización de almacén y transporte para el primer esquema de recolección de residuos orgánicos de manera descentralizada.

que las innovaciones tecnológicas en desarrollo y aún por desarrollar puedan llegar a implantarse de forma masiva para un mayor ahorro energético (Kahn *et al.*, 2007).

### Peso seco y cálculo de agua en porcentajes de masa seca

Según lo obtenido en laboratorio, 1 kg de estiércol contiene 440 g de sólidos (44%) y 560 de humedad (56%). Se elige un porcentaje deseado de masa seca, como ejemplo será  $8\% = \frac{440 \text{ g}}{80} = 5.5$

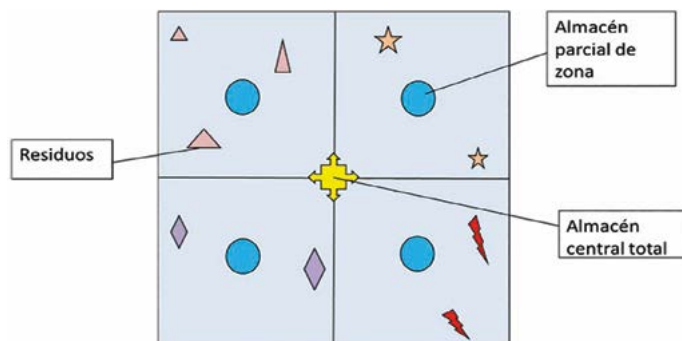
Se divide la masa seca entre el porcentaje deseado, luego se multiplica por 1000

$= 5.5 \times 1000 = 5500$  (masa total de mezcla agua y estiércol)

El resultado es la mezcla total de agua y sólidos totales. A esta se le resta el valor de la masa seca y el resultado es el total de agua a agregar por la cantidad de masa seca deseada.

$5500$  (mezcla total)  $- 440$  (masa seca)  $= 5060$  (agua a agregar)

El Cuadro 2 presenta los cálculos para el gasto y ahorro de agua según el porcentaje deseado de sólidos totales.



**Figura 7.** Diagrama de optimización de almacén y transporte para el segundo esquema de recolección de residuos orgánicos.

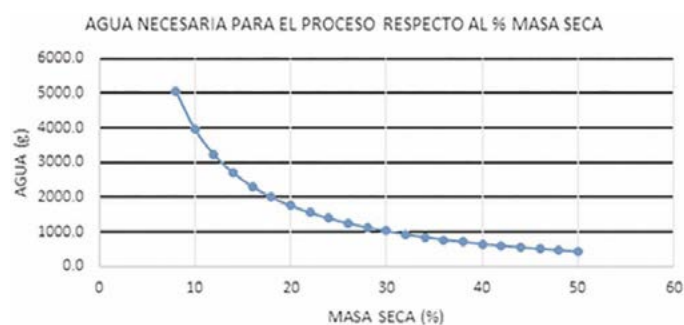
Se compara con 8% ya que según Varnero (2011) en los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de sólidos totales no debe exceder 10%. Botero y Preston (1987) recomiendan una entrada de 5% a 10% de concentración de sólidos totales para biodigestores en general.

### Ahorro y gasto de agua mediante la masa seca

La Figura 8 presenta el gasto de agua, o el ahorro de la misma, según el porcentaje de sólidos totales utilizado en el sustrato a digerir en el biodigestor. Cuando se utiliza un sustrato con poca concentración de sólidos totales, es necesario añadir grandes cantidades de agua para cumplir el proceso de fermentación, conforme

**Cuadro 2.** Cálculo de gasto y ahorro de agua según porcentaje deseado de sólidos totales.

Porcentaje deseado	Equivalencia del % a g <sup>-1</sup>	Masa seca de 1 kg g <sup>-1</sup> deseados	Masa total (estiércol y agua)	Diferencia del total menos la masa seca	Diferencia del 8% respecto a otros porcentajes
8	80	5.50	5500.0	5060.0	0.0
10	100	4.40	4400.0	3960.0	1100.0
12	120	3.67	3666.7	3226.7	1833.3
14	140	3.14	3142.9	2702.9	2357.1
16	160	2.75	2750.0	2310.0	2750.0
18	180	2.44	2444.4	2004.4	3055.6
20	200	2.20	2200.0	1760.0	3300.0
22	220	2.00	2000.0	1560.0	3500.0
24	240	1.83	1833.3	1393.3	3666.7
26	260	1.69	1692.3	1252.3	3807.7
28	280	1.57	1571.4	1131.4	3928.6
30	300	1.47	1466.7	1026.7	4033.3
32	320	1.38	1375.0	935.0	4125.0
34	340	1.29	1294.1	854.1	4205.9
36	360	1.22	1222.2	782.2	4277.8
38	380	1.16	1157.9	717.9	4342.1
40	400	1.10	1100.0	660.0	4400.0
42	420	1.05	1047.6	607.6	4452.4
44	440	1.00	1000.0	560.0	4500.0
46	460	0.96	956.5	516.5	4543.5
48	480	0.92	916.7	476.7	4583.3
50	500	0.88	880.0	440.0	4620.0

**Figura 8.** Cálculo de agua para el proceso según porcentaje de sólidos totales.

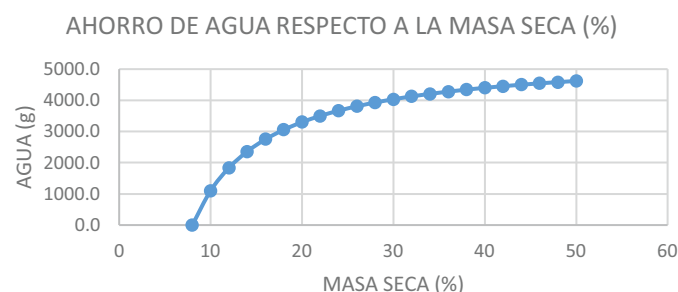
aumenta la concentración de masa seca, el ahorro de agua aumenta al no haber necesidad de añadir mayores cantidades de agua.

La Figura 9 muestra que cuando el porcentaje de masa seca tiene poca concentración en el sustrato a digerir, el ahorro de agua es menor, mientras que si tiene un porcentaje alto en sólidos totales, el ahorro es mayor. Según Mandujano y Hernández (2001), existen ventajas importantes con un proceso de biodigestión anaeróbica de sólidos

en alta concentración, tales como bajos requisitos de agua y tasa más alta de producción de biogás por unidad de volumen del biodigestor.

### Teoría de filtración para la aplicación de drenaje en el biodigestor

Para determinar la capacidad de filtración en el sustrato de un biodigestor termofílico con alta concentración de masa seca se realizaron ensayos en laboratorio. Los factores de filtración son: la estructura del

**Figura 9.** Cálculo de ahorro de agua según porcentaje de sólidos totales.

pastel del filtro o sustrato; el grosor del sustrato; la constitución del sustrato; la viscosidad del líquido; y la fuerza de acción del proceso.

De acuerdo a la ecuación de Poiseuille, el movimiento del líquido en un sustrato se da de acuerdo a la siguiente igualdad

$$w = \frac{\Delta p d^2}{32 \eta l}$$

donde  $w$ =velocidad del flujo del líquido en los poros en m/s;  $p$ =presión en Pa;  $d$ =diámetro de capilares en m;  $l$ =longitud en m;  $\eta$ =viscosidad en Pa s;  $\Delta p$ =diferencia de presión en la parte superior e inferior del sustrato.

En el caso del biodigestor la ecuación se puede expresar también como:

$$w = \frac{\Delta p d^2}{32 \eta l} = \frac{\Delta p 4r^2}{32 \eta l} = \frac{\Delta p r^2}{8 \eta l}$$

En nuestro caso,  $\eta$  se reduce por el rango termofílico al cual trabajará el biodigestor, lo cual aumenta la velocidad de filtración (velocidad de drenaje). También, el líquido (agua) que pasa por el filtro (sustrato en el biodigestor) revuelve el material con lo cual se aumenta el diámetro de los capilares, lo que permite hacer un cálculo considerando poros constantes. En cuanto a la longitud de los poros, esta no se reduce significativamente ya que el líquido disuelve parte del material. Por tanto, con presión constante y sin acumular líquido por encima del sustrato, se considera que el drenaje en el biodigestor no tendrá complicaciones. Los resultados de los ensayos que se muestran en las Figuras 10 y 11 confirman lo anterior.

### Filtración de agua en stock de estiércol

La humedad y la consistencia del estiércol influyen en los tiempos de drenaje de agua y formación del espejo de agua. Los tiempos de drenaje del espejo o total de agua son proporcionales, ya que los primeros días hay más retención de agua en el estiércol fresco por la absorción de agua llegando al punto de saturación en sus poros, esto hace que el drenaje de agua sea más lento por la saturación del medio, conforme pasan los días, el filtrado de agua se encuentra con mayor libertad en el stock de estiércol, debido a que se crean canales

de corriente con la saturación de poros, el tiempo de drenaje se minimiza y el agua drenada es mayor. Este mismo comportamiento se presenta en estiércol seco, aunque a diferencia con el estiércol fresco es que en las primeras filtraciones absorbe mayor cantidad de agua que en el fresco, el tiempo de drenaje disminuye y el agua drenada es menor a comparación de los siguientes días en los cuales la saturación del estiércol es menor, el tiempo de drenaje de agua aumenta y el agua drenada es mayor.

El estiércol seco, los primeros días retiene mayor cantidad de agua debido a la falta de humedad en él. Al momento de llegar a la saturación de sus poros por el agua, empieza el drenaje.

Todo lo anterior tiene importancia en el mezclado del biodigestor, ya que por ser una concentración alta en masa seca se vuelve complicado el movimiento del sustrato, es por ello que mediante filtraciones de agua dentro del biodigestor con alta masa seca se resuelve el problema, aunado al ahorro energético que se pueda obtener por la no utilización de bombas, motores, etcétera, para su mezclado. Diversos autores como Weiland (2001), Balssen (2009), Postel et al. (2008), Schulz et al. (2006) mencionan los gastos energéticos de distintos

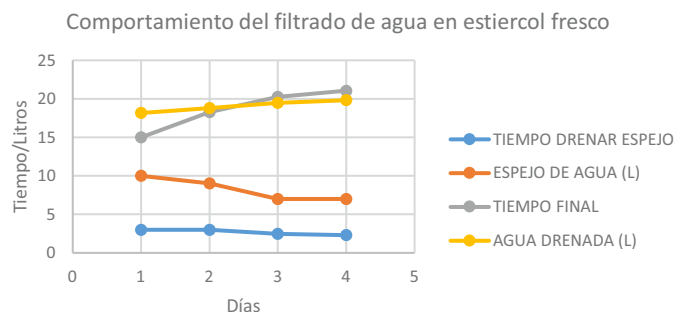


Figura 10. Comportamiento del filtrado de agua en estiércol fresco.

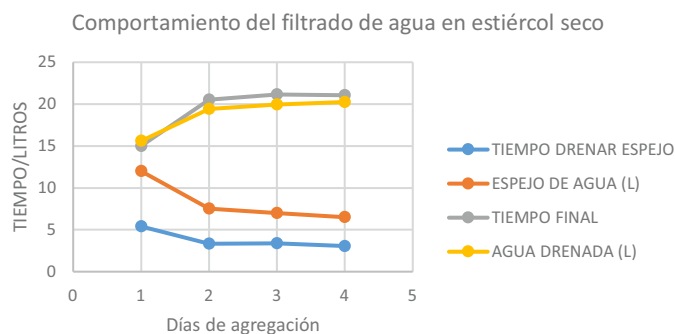


Figura 11. Comportamiento del filtrado de agua en estiércol seco (oreado).



dispositivos para mezclar sustratos en biodigestores. Para el mezclado mecánico los valores van desde 2 hasta 35 kW según el tipo de sustrato. El mezclado neumático va desde 0.5 kW a cualquier rango necesario dependiendo del sustrato. El mezclado hidráulico va de 2 a 30 m<sup>3</sup>/min. Ejemplo, 3kW a 2 m<sup>3</sup>/min.

### Diseño del biodigestor

Debido a que el biodigestor debe ser móvil y a la disponibilidad de recursos de los productores, se decidió que el biodigestor será transportado en un remolque, el cual representará la principal limitante para el tamaño del mismo. Por tal razón se consideró que una capacidad apropiada para el biodigestor es de 12 m<sup>3</sup>. Notoriamente, con un biodigestor de esta capacidad es imposible tratar los residuos que se generan diariamente, los cuales de acuerdo a lo reportado en el Cuadro 1 son de alrededor de 12.5 t día<sup>-1</sup> de residuos de ovino. Esta situación se soluciona con la construcción de los biodigestores que sean necesarios para tratar dicha cantidad. Para ello se considera que el tiempo de retención del sustrato en el biodigestor es de 15 días por el proceso termofílico, y se podrán realizar alrededor de 24 cambios en el año ya que según Varnero (2011), la velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; y mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás.

Por lo que un biodigestor de 12 m<sup>3</sup> efectivos de capacidad podrá tratar alrededor de 288 t año<sup>-1</sup>, dependiendo del contenido de humedad de los residuos y con una carga de sólidos totales en el sustrato del biodigestor de alrededor de 44%. Según Ward *et al.* (2008), los requerimientos básicos para el diseño de un biodigestor son permitir una tasa de carga orgánica continua, alta y sostenible, en corto tiempo de retención hidráulico (para reducir al mínimo el volumen de reactor) y para producir el volumen máximo de metano. Algunos de los cálculos necesarios para el diseño de un biodigestor con capacidad de 12 m<sup>3</sup> efectivos para la biodigestión se enuncian a continuación: con la finalidad de tener mayor estabilidad del contenedor en el remolque, es deseable tener una relación altura-área del mismo de 1:3; y por las características del tipo de remolque a utilizar se considera pertinente utilizar dos recipientes con capacidad de 6 m<sup>3</sup> efectivos, cada uno para el sustrato a fermentar, más una tercera parte de ese volumen para contener el biogás. Por otra parte, considerando que el remolque tiene un ancho de 2.2 m, se puede determinar el área de los recipientes de la siguiente manera

$$\pi * r^2 = 3.14 * 1.1 \text{ m} = 3.80 \text{ m}^2 = \text{área del recipiente}$$

Conociendo los datos de volumen (v) efectivo y área (a) de los recipientes podemos determinar entonces la altura efectiva realizando la siguiente operación:

$$v = a * h; \quad h = \frac{v}{a} = \frac{6 \text{ m}^3}{3.8 \text{ m}^2} = 1.58 \text{ m}$$

Se considera también pertinente, destinar alrededor de un tercio del volumen efectivo como volumen adicional para contener el biogás que se genere, por lo tanto el volumen en el recipiente destinado a contener el biogás se calcula por:

$$\text{volumen} = \frac{6 \text{ m}^3}{3} = 2 \text{ m}^3$$

Por lo tanto la altura libre de sustrato en el recipiente para contener el biogás se determina de la siguiente manera:

$$v = a * h; \quad h = \frac{v}{a} = \frac{2 \text{ m}^3}{3.8 \text{ m}^2} = 0.52 \text{ m}$$

**Cuadro 3.** Condiciones del biodigestor.

Capacidad	TRT	Rel. altura-área	Área recipiente	Altura efectiva	Volumen reservorio de biogás	Altura libre del sustrato para el biogás	Altura total de recipientes
12 m <sup>3</sup> (2 recipientes)	15 días (24/año)	1:3	3.80 m <sup>2</sup>	1.58 m	2 m <sup>3</sup>	0.52 m	2.1 m

Por lo que la altura total de cada uno de los dos recipientes será de aproximadamente:  $1.58 \text{ m} + 0.52 \text{ m} = 2.1 \text{ m}$  (Cuadro 3).

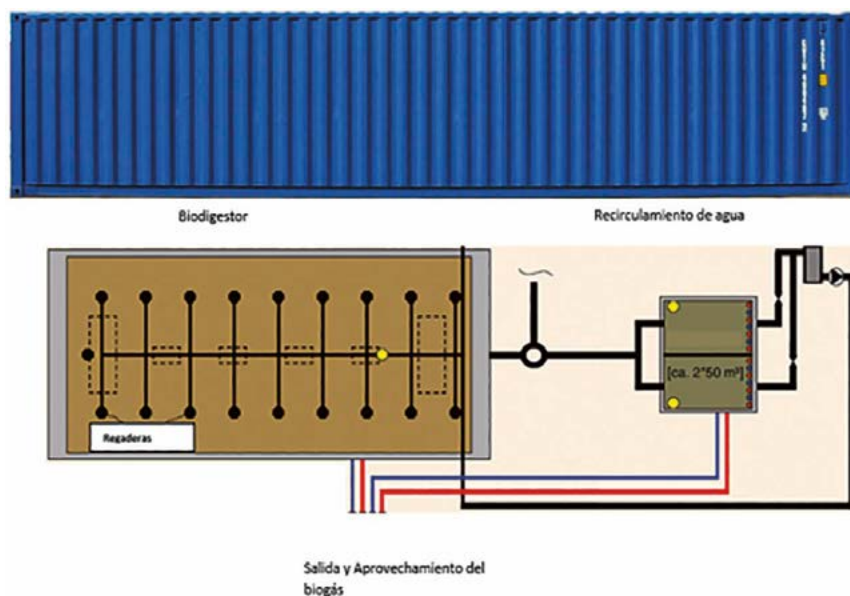
La Figura 12 muestra una vista superior interna y lateral externa del biodigestor con sus dimensiones.

## CONCLUSIONES

Mediante el uso de métodos de optimización de almacenamiento y transporte existentes, es posible determinar la ubicación de almacenes, que permitan que el gasto de energía para el transporte de residuos orgánicos, en una región determinada, sea mínimo. La subdivisión de una superficie en zonas parciales de igual tamaño, las cuales contendrían un almacén parcial, permite tratar los residuos orgánicos generados en ellas con el uso de un biodigestor móvil, con lo cual se generará de manera descentralizada un biocombustible como el biogás y un biofertilizante como coproducto a partir de los lodos residuales resultantes de la fermentación de los residuos orgánicos. Mediante el aumento de masa seca en el biodigestor se ahorra agua a comparación de los procesos con bajas cantidades de sólidos totales. Gracias al filtrado de agua en el stock de estiércol es posible un ahorro de energía, ya que no hay mezclado con algún tipo de aparato que requiera energía, sino que este se da por gravedad. Aunado a esto, mediante el calentamiento de agua la viscosidad baja y el proceso se vuelve más eficiente. El diseño con la integración de energías renovables en la operación y funcionamiento del biodigestor, permite hacer un uso más eficiente de la energía requerida en todo el proceso, así como reducir la emisión de gases de efecto invernadero. El diseño puede dar solución a la carencia energética existente en zonas marginadas rurales, especialmente en la zona de estudio.

## LITERATURA CITADA

- Balssen Memorandum. 2009. Tratamiento de Aguas Servidas de Flygt ITT; setiembre
- Bravo E. 2008. Encendiendo el debate sobre los biocombustibles, cultivos energéticos y soberanía alimentaria en América Latina. Ed. Capital Intelectual S. A. HIVOS. Quito, Ecuador. 135 p.
- Botero B.R., Preston T. 1987. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas 20 pág.



**Figura 12.** Diagrama del diseño conceptual del biodigestor. Vista de arriba interna y lateral externa.

- Cruz M.S. 1986. Abonos orgánicos. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Domínguez J. 2002. La integración económica y territorial de las energías renovables y los sistemas de información geográfica. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España. p. 471.
- Gavilán J.A. 2004. Celdas combustibles: una opción para la transformación descentralizada de energía. *Energética* Vol. XXVI, No. 1/2005.
- Grawe J. 1989. Dezentrale Stromerzeugung. Stand und Aussichten; *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*. 39. S. 186 ff.
- GVBI Hessen. 1985. S § 5 des Gese~s Über sparsame. rationelle. sozial- und umweltverträgliche Energienutzung in Hessen vom 3.7. 101 ff.
- Guevara V.A. 1996. Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Anaeróbicos Rurales. Producción de gas y Saneamiento de Efluentes. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente. Organización Panamericana de la Salud, Lima, Perú. 73 p.
- INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Salinas, San Luis Potosí. Clave geoestadística 24025.
- INEGI. 1987 Cuaderno Estadístico Municipal. Aguascalientes. 1987. 153 pág. [http://www.colpos.mx/slp/salinas\\_localizacion.htm](http://www.colpos.mx/slp/salinas_localizacion.htm).
- IPCC. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Documento Técnico V. PNUMA-UNEP. ISBN: 92-9169 104-7.
- Kahn Ribeiro S., Kobayashi S., Beuthe M., Gasca J., Greene D., Lee D.S., Muromachi Y., Newton P.J., Plotkin S., Sperling D., Wit R., Zhou P.J. 2007. Transport and its infrastructure, in: Metz,B., O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave y L.A. Meyer (eds.), "Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 323-385 pp.
- Lakshmanan T.R., Han X. 1997. "Factors underlying transportation CO<sub>2</sub> emissions in the U.S.A.: A decomposition analysis", en:

- Transportation Research Part D: Transport and Environment 2, Elsevier, Amsterdam, 1-15 pp.
- Mandujano S.P., Hernández M.A.F. 2001. Digestión anaerobia de sólidos en alta concentración. Universidad Politécnica de Madrid, España. 389 pág. Tesis Doctoral.
- Postel J., Jung U., Fischer E., Scholwin F. 2008; Stand der Technik beim Bau und Betrieb von Biogasanlagen – Bestandsaufnahme, Umweltbundesamt (pub.); disponible en línea en [http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql\\_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3873](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3873)
- Rössel K.E.D., Ortiz L.H., Talavera M.D. 2013. Logística rural. Transporte, transbordo y almacenamiento. Colegio de Postgraduados, México. 188 pág.
- Rojas R.R. 2009. Construcción de un biodigestor como alternativa de generación de energía eléctrica "limpia". Instituto Tecnológico de Ensenada, B.C. 5 p.
- Schipper L., Scholl L., Price Y.L. 1997. Energy use and carbon emissions from freight in 10 industrialized countries: an analysis of trends from 1973 to 1992, en: Transportation Research Part D: Transport and Environment 2, Elsevier, Amsterdam, 57-76 pp.
- Schulz H., Eder B. 1996, 2001, 2006.: Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiel, segunda edición revisada, Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg.
- SINIIGA. 2015. <https://www.siniiga.org.mx/>
- Steenhof P., Woudsma C., Sparling E. 2006: "Greenhouse gas emissions and the surface transport of freight in Canada", en: Transportation Research Part D: Transport and Environment 11, Elsevier, Amsterdam, 369-376 pp.
- Varnero M.M.T. 2011. Manual de biogás, Gobierno de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, Global Environment Facility, Proyecto CHI/00/G32 "Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables. 120 pág.
- Ward A.J., Hobbs P.J., Holliman P.J., Jones D.L., 2008. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. Bioresource Technology 99: 7928-7940.

