

Sustratos y producción de biogás en biodigestores. Una revisión sistemática

Substrates and production of biogas in biodigesters. A systematic review

Erika Tatiana González¹ y Paula Catalina Jurado²
Asesor: Luis Fernando Gómez Echeverri³

Resumen

Un biodigestor es un dispositivo en el que se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia, mediante el cual se genera biogás, que puede ser utilizado como combustible gracias al contenido de metano que posee. Por esto, una de sus utilidades es la generación de energía renovable. Se hizo una revisión sistémica de artículos científicos para identificar los diferentes sustratos empleados en los biodigestores y establecer su relación con la cantidad de metano producido. En este sentido, se buscaron artículos originales en la base de datos ScienceDirect, teniendo como criterios de selección aquellos artículos publicados en los últimos diez años y que incluyeran el término “anaerobic co-digestion”, entre comillas en el título y con la palabra “manure” en el título, resumen y palabras clave. Se revisaron 57 artículos en los que se encontró que las mezclas más usadas como sustrato para la codigestión son el *estiércol de vaca* y los *residuos de cultivos*. Se obtuvo que la codigestión de estiércol de cerdo, vaca, pollo y ganado mezclados con residuos de alimentos producen una buena cantidad de metano para ser aprovechado. Es importante estandarizar la información

en la cual se presentan los resultados del proceso de codigestión para poder realizar una mejor comparación.

Palabras clave: codigestión anaerobia, residuo, metano, eficiencia, energía.

Abstract

A biodigester is a device in which is carried out the process of anaerobic digestion, there is generated biogas, which can be used as fuel due to the content of methane that it possesses. For this reason one of its usefulness is the generation of renewable energy. There was done a systemic review of scientific articles to identify the different substrata used in the biodigesters and to establish its relation with the quantity of produced methane. In this respect, original articles looked in the

¹ Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo: egonzaleza2@ucentral.edu.co.

² Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo: pjuradod@ucentral.edu.co.

³ Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo. Doctorando en Agroecología de la Universidad de Antioquia. Profesor del Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo: lgomeze1@ucentral.edu.co.

database ScienceDirect, taking those articles as criteria of selection published in the last ten years and that were including the term “anaerobic co-digestion” within quotation marks in the title and with the word “manure” in the title, summary, and key words. 57 articles were reviewed, the mixtures that are in use more commonly as substrate for the co-digestion are the manure of cow and the residues of crop.

The co-digestion of manure of pork, cow, chicken and cattle mixed with food residues produce a good quantity of methane to be used. It is important to standardize the information in which they present the results of the process of co-digestion to be able to realize a better comparison.

Key words: Anaerobic co-digestion, Residue, Methane, Efficiency, energy.

1. Introducción

En Colombia alrededor de 171 219 hogares en el sector rural no cuentan con conexión a la infraestructura eléctrica (DANE, 2005). Hacer llegar la red eléctrica a zonas rurales suele ser muy costoso y no es factible en lugares aislados por su topografía y terrenos agrestes, e, incluso, es poco probable que se logre en el medio plazo para muchas regiones, debido a los costos de inversión e infraestructura necesaria (Energreencol, 2015). En tales situaciones, la electricidad generada con energías renovables puede ser una solución para la producción de energía en hogares, escuelas y empresas locales de estas zonas apartadas del país (Energreencol, 2015). Las energías renovables, como la energía solar, eólica o la generada por biomasa pueden proporcionar suficiente energía eléctrica de una forma sostenible, confiable y limpia (Energreencol, 2015).

Una de las formas investigadas desde hace varios años para la generación de energía renovable es la *digestión anaerobia de residuos sólidos*, proceso fermentativo llevado a cabo por microorganismos en ausencia de oxígeno (Castells, Ripoll y Pozuelo, 2012). Los residuos que se utilizan suelen ser aquellos provenientes de actividades agropecuarias como el estiércol de animales y subproductos de

cultivos, que reciben el nombre de sustratos. En el caso de utilizarse combinados, el proceso recibe el nombre de *codigestión anaerobia* (Navarro, 2016). Mediante la codigestión, los residuos sólidos biodegradables se convierten en subproductos útiles para la generación de energía de carácter renovable, en forma de biogás, este último compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Castells, Ripoll y Pozuelo, 2012). Otro producto que se genera mediante este tipo de digestión es un efluente, con altos porcentajes de agua, que permite aprovechar la complementariedad de la composición de los residuos, al ser utilizado como abono (Castells, Ripoll y Pozuelo, 2012).

El proceso de codigestión anaerobia se lleva a cabo en un dispositivo conocido como reactor o biodigestor, en el que su diseño y funcionamiento dependen del tipo de sustrato que se utilice. De tal manera que el objetivo de un biodigestor es mantener la actividad bacteriana estable, lo que permite el desarrollo de diferentes comunidades microbianas, el control de variables como la velocidad de carga orgánica máxima, el tiempo de retención hidráulico, el tiempo de retención de sólidos, la relación C/N en el sustrato, la temperatura,

el pH, la alcalinidad y potencial redox. Además, evita la presencia de posibles tóxicos e inhibidores de la digestión (Universidad de Murcia, 1988; Guevara, 1996; Ortega, 2006; Nogués et. ál., 2010; Castells, Ripoll y Pozuelo, 2012).

Gracias a lo anterior, los biodigestores han recibido atención desde diferentes campos, hecho que ha llevado a la publicación de manuales y libros que describen el proceso para su diseño y funcionamiento (Nogués et ál., 2010). Se encuentra diversa literatura que describe el proceso de digestión anaerobia en un biodigestor y que refleja el desarrollo de diseños y modelos del funcionamiento del mismo. No obstante, tras revisar en bases de datos importantes —Redalyc, Scielo y Dialnet— y globales —Scopus y Google Académico— no se encuentran artículos de revisión que establezcan qué tipos de residuos orgánicos se incorporan en los biodigestores y la relación de estos con la generación de biogás y metano. Por lo general, se publican artículos originales que tienen como objetivo el diseño del biodigestor.

No hay una sistematización de la diversidad de posibles mezclas de los residuos orgánicos que operan como materia prima o sustrato en los biodigestores, ni de su relación con la producción de biogás. Esta falta de conocimiento sistematizado no permite aprovechar posibles fuentes que generen alternativas energéticas más económicas, eficientes y limpias para poblaciones vulnerables, como es el caso del sector rural colombiano, en el cual las actividades agrícolas tienen una gran importancia. Por esta razón, la presente revisión tiene como objetivo general determinar, basados en la literatura académica, los diferentes sustratos que se emplean en biodigestores para la codigestión anaerobia y busca establecer la relación del tipo de sustrato con la cantidad de metano producido durante este proceso.

2. Materiales y métodos

2.1 Diseño

Se revisaron sistemáticamente artículos originales que desarrollaran diseños experimentales del proceso de codigestión anaerobia, utilizando como sustrato estiércol y residuos orgánicos provenientes de actividades agrícolas.

2.2 Estrategia de búsqueda

La búsqueda se efectuó en noviembre de 2016. Se restringió por el año de publicación y el tipo de artículo. Se buscaron artículos originales en ScienceDirect publicados en los últimos diez años (desde el 2006 hasta la fecha) con el término “anaerobic co-digestion” entre comillas en el título y con la palabra “manure” en el resumen, título y palabras clave. Se realizaron dos búsquedas por separado (por parte de cada una de las autoras) y se compararon las búsquedas para consensuar las discordancias en cantidad y contenido de los artículos.

2.3 Selección de artículos

Se seleccionaron los artículos originales teniendo en cuenta los siguientes criterios: (1) que en el diseño experimental no se evidenciara algún pretratamiento al sustrato; (2) que la codigestión no se realizara con algún residuo de industria petrolera o combustibles (debido a que el enfoque es plantear alternativas de manejo de residuos sólidos en el sector rural colombiano); (3) que los sustratos utilizados fueran representativos en la actividad rural del país (teniendo en cuenta volúmenes de producción y presencia de ciertos cultivos) y (4) cuyo tema de trabajo no fuera la programación lineal o modelos matemáticos, debido a que estos no hacen énfasis en un diseño experimental que nos provea datos reales de producción de biogás y de metano.

2.4 Extracción de datos

Los estudios incluidos fueron analizados cualitativamente mediante un protocolo de evaluación compuesto por cuatro criterios. Las variables de valoración fueron dicotómicas, con calificaciones de “sí” o “no”, de acuerdo con la presencia o ausencia del criterio estudiado. La valoración fue realizada por las dos autoras de manera independiente.

El primer criterio tiene en cuenta que el artículo registra el sustrato utilizado; el segundo considera si se registran las proporciones de mezcla de los sustratos para la codigestión; el tercero, si se registra un valor de la producción de biogás y metano; el último evalúa si se dan condiciones de operación del proceso de digestión anaerobia como la temperatura y el tiempo de retención hidráulico. Finalmente, de acuerdo con los cuatro criterios mencionados, se hizo una cuantificación por medio de una tabla-resumen, en la cual se podría evidenciar la cantidad de artículos que cumplen con cada pauta. Si un artículo no cumple con un criterio, solo se calificaba con un “no” en este, para luego clasificarlo la tabla.

2.5 Análisis de datos

Se unificaron los datos extraídos en cada artículo, se presentan todos los datos de producción de biogás y de metano, utilizando tres unidades de medida: litros de metano o biogás sobre litros de sustrato alimentados por día ($L/L_{\text{sustrato}} * d$), litros de metano o biogás sobre kilogramos de sólidos volátiles alimentados por día ($L/Kg_{SV} * d$) y litros de metano o biogás sobre kilogramos de sólidos totales alimentados por día ($L/Kg_{ST} * d$). Aquellos datos que estaban expresados en mililitros de biogás o de metano por gramos de sólidos volátiles alimentados o sólidos totales alimentados ($mL/g_{\text{sólidos volátiles}}$) se convirtieron a unidades de litro (L) y kilogramo (kg) por equivalencias.

De igual manera, para aquellos datos que estaban expresados en litros por kilogramo de sólidos volátiles o sólidos totales alimentados ($L/kg_{\text{sólidos volátiles}}$) se dividieron por la cantidad de días reportados como tiempo de retención hidráulico. Además, para los datos reportados solo como un volumen, se dividieron en la cantidad de días reportados como tiempo de retención hidráulico y por la cantidad de sólidos totales alimentados registrados para homogeneizar la información. Finalmente, la concentración de metano en el biogás fue calculada como la cantidad de metano producido sobre la cantidad de biogás producido por 100, como se muestra en la ecuación 1.

Ecuación (1)

$$C (\%v/v) = (\text{metano producido} / \text{biogás producido}) * 100$$

3. Resultados

3.1 Sustratos

Se obtuvieron 57 artículos originales, los cuales se clasificaron en cuatro grupos de acuerdo al sustrato que utilizaban para la codigestión (tabla 1). En cada grupo, los sustratos son diversos. En general, se observa que se utiliza, sobre todo, pastos (20%), forrajes (15%), residuos de cultivos como maíz, arroz, yuca y caña de azúcar (30%), residuos de comida (25%), sueros de queso y leche (2%), melaza de remolacha y residuos de plantas de sacrificio animal (sangre, plumas y huesos) (figura 1) (2%). De estos, solo un artículo utilizaba como cosustrato el mucílago de café (Hernández et ál., 2014), otro, gelatina de vino (García et ál., 2013) y finalmente uno algas marinas (Astals et ál., 2015) (1%). La anterior distribución puede ser atribuida a la estrategia de búsqueda.

Tabla 1. Grupos de sustrato principal para codigestión, n=57

Grupo	Número de artículos	%
Estiércol de cerdo	19	33
Estiércol de vaca	25	44
Estiércol de pollo	5	11
Estiércol de ganado	8	14

Fuente: elaboración propia con datos tomados de la tabla 2.

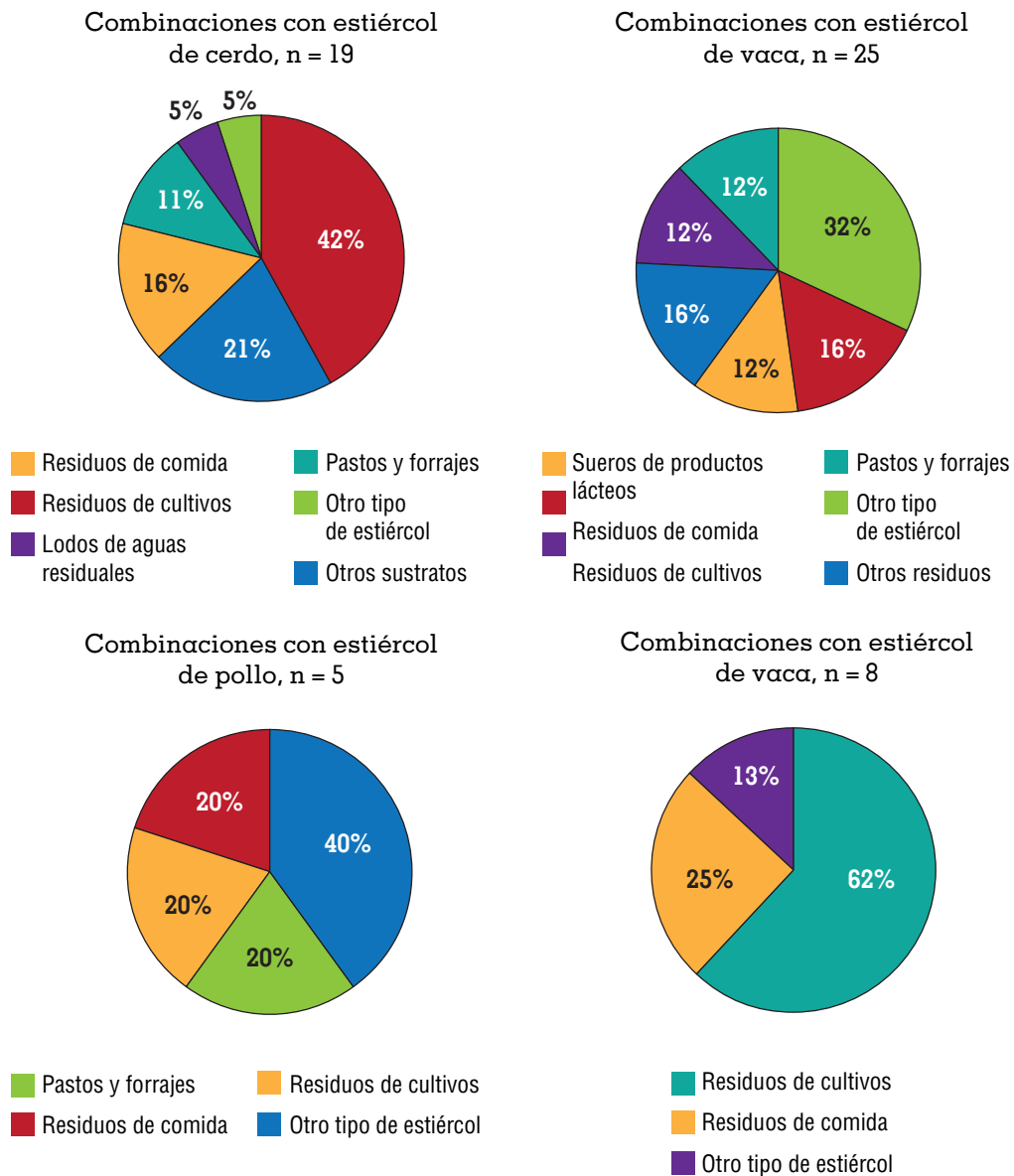


Figura 1. Combinación de sustratos utilizados en cada grupo de estiércol.

Fuente: elaboración propia con base en los artículos consultados.

3.2 Producción de biogás y de metano

La producción de metano se divide en tres grupos, determinados por las unidades en las que expresan la producción de biogás y de metano. En la tabla 2 se recopilaron 22 artículos (39%), que muestran la producción de biogás y de metano en las unidades de L/L_{sustrato}^*d . De estos, ocho artículos (14%) no registran un dato de producción de biogás; por lo tanto, no hay un valor de concentración de metano. En mayor proporción, en la tabla 3 se agrupan veinticuatro artículos (42%)

que expresaban la producción en unidades de L/Kg_{SV}^*d . En esta tabla, once artículos (19%) no reportaba un valor de producción de biogás; por lo tanto, no fue posible el cálculo de la concentración de metano. Finalmente, en la tabla 4 se observan los resultados de tres artículos (5%) que expresaban las producciones de los gases en unidades de L/kg_{ST}^*d . Para el resto de los ocho artículos del total (14%) no fue posible agruparlos, debido a que no había un método para unificar las unidades en las que expresaban la producción de biogás y metano.

Tabla 2. Resultados primer grupo de artículos, unidades de $L(CH_4 \text{ o biogás}) / L_{\text{sustrato alimentado}}^*d$

N.º	Sustrato	Proporción	Producción		Temperatura	C
			Biogás	CH ₄		
			L/L*d	L/L*d	°C	%v/v
1	Estiércol de vaca + lodo primario + suero de caseína	10:5:1	1,86	1,21	37	65,05%
2	Estiércol de vaca + remolacha	3:1	-	1,22	35	-
3	Estiércol de vaca + arbusto salix	1:3	-	0,63	37	-
4	Estiércol de vaca + residuos de comida	-	1,69	1,53	36	90,53%
5	Estiércol de vaca líquido + El suero de queso	2:1	2,60	1,46	35	56,15%
6	Estiércol de vaca líquido + aguas residuales del molino de aceituna + suero de queso	11:8:1	0,50	0,13	37	26,00%
7	Estiércol de cerdo (sólido) + Ensilado de pasto seco	3:2	-	0,27	35	-
8	Estiércol de cerdo + subproducto de remolacha azucarera	1:1	-	2,91	37	-
9	Estiércol de cerdo + desechos de pescado + residuos de melaza de remolacha	3:1:1	0,35	0,22	37	62,86%
10	Estiércol de vaca + suero de queso	3:2	1,66	0,83	35	50,00%
11	Estiércol de cerdo + residuos de yuca	4:6	2,05	1,40	37	68,29%
12	Estiércol de vaca + abono de vaca con paja + residuos de frutas y hortaliza	1:1:2	-	1,38	35	-

Continúa...

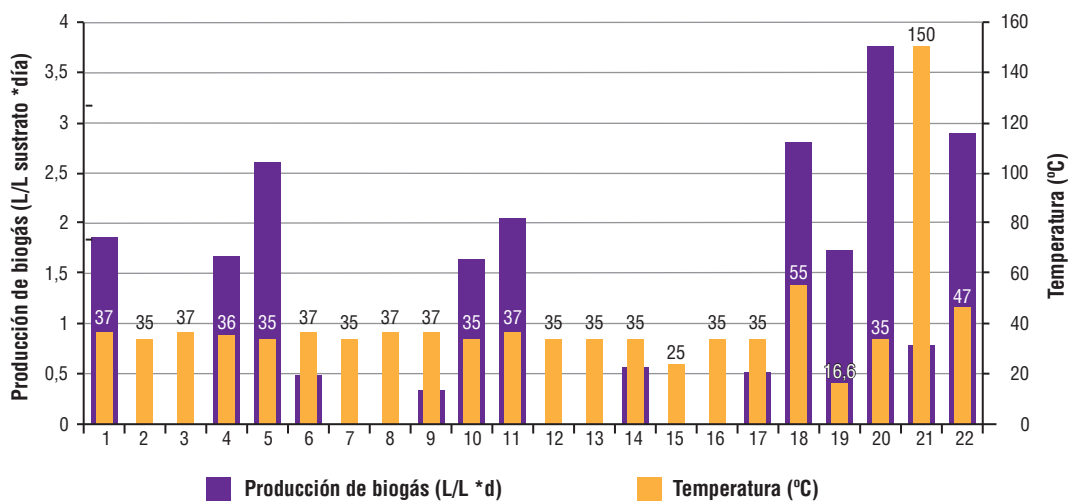
... Viene

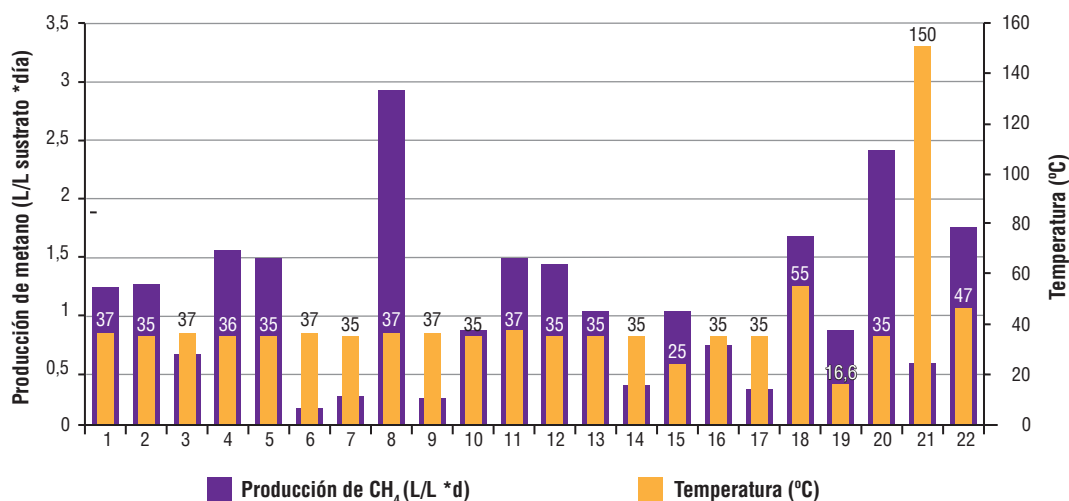
N.º	Sustrato	Proporción	Producción		Temperatura	C
			Biogás	CH ₄		
			L/L*d	L/L*d	°C	%v/v
13	Estiércol de cerdo + desechos de procesamiento de hortalizas + hojarasca + lodos anaeróbicos	1:1:1:1	-	0,97	35	-
14	Estiércol de cerdo + pulpa de yuca	1:4	0,59	0,33	35	55,93 %
15	Estiércol de cerdo + plumas crudas inoculadas con lodo de matadero	1.3:1:1.75	-	0,99	25	-
16	Estiércol de vaca + residuos de cocina	1:1	-	0,70	35	-
17	Estiércol de vaca + residuos de cultivos	1:1	0,52	0,29	35	56,12 %
18	Estiércol de vaca + remolacha	4:1	2,81	1,66	55	59,02 %
19	Estiércol de vaca + estiércol de oveja y de llama	1:3	1,75	0,84	16,6	48,00 %
20	Estiércol de cerdo + residuos de cocina (vegetales residuales, carne, arroz y fideos)	1:1	3,75	2,38	35	63,53 %
21	Estiércol de pollo + pasto de Napier	1:1	0,80	0,52	150	65,00 %
22	Estiércol de ganado sólido y líquido + maíz + fruta + pan	3:2:2:2	2,90	1,71	47	58,97 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Gráfica de producción de biogás y temperatura (eje secundario).

Fuente: elaboración propia con datos tomados de la tabla 2.

Figura 3. Gráfica de producción de metano (L/L_{sustrato} *d) y temperatura (°C), eje secundario.



Fuente: elaboración propia con datos tomados de tabla 2.

No existe un patrón de producción de metano según el tipo de sustrato utilizado o la temperatura; tampoco, según de la proporción. Hay diferentes combinaciones con estiércoles de vaca, cerdo y ganado que producen cantidades significativas de biogás y de metano. Diez (45%) de los datos registrados están por encima del promedio de producción de metano ($1,07 \text{ L/L}_{\text{sustrato}} \cdot \text{d}$) de este grupo de datos. De estos artículos, seis (60%) tienen como sustrato una mezcla con estiércol de vaca; tres (30%), estiércol de cerdo, y uno (10%), estiércol de ganado. Sin embargo, los artículos que registran los cinco mejores niveles de producción de biogás son sustratos con estiércol de vaca, cerdo y ganado. Un rasgo común por resaltar es que los cinco artículos utilizan como cosustrato algunos residuos de comida en general, tal como la remolacha, el pan y el maíz.

El estiércol de vaca registra mayor cantidad de producción de metano por encima del promedio, debido a que este sustrato es utilizado en doce artículos en este grupo. A pesar

de estos datos, los cinco artículos que registran la menor cantidad de metano ($< 0,29 \text{ L/L}_{\text{sustrato}} \cdot \text{d}$) utilizan como sustrato estiércol de vaca y de cerdo. Esta baja producción se le puede atribuir al cosustrato, tal como aguas residuales industriales, pastos y residuos de cultivos. De lo anterior se puede inferir que la mezcla de residuos de comida con cualquier tipo de estiércol es el sustrato que mayor cantidad de metano produce.

La producción de biogás tampoco expresa un patrón claro por parte del estiércol utilizado. Los cinco artículos que reportan los valores más altos utilizan como sustrato estiércol de cerdo, vaca y ganado. Por otro lado, el cosustrato es, en todos los casos, un residuo de algún producto alimenticio (comida en general, suero de queso o remolacha). Esto confirma la afirmación anteriormente realizada de que la mayor cantidad de biogás y metano es producida por mezclas de estiércol con residuos de comida.

Las proporciones de mezcla varían mucho. El dato que más se repite es el de iguales

proporciones (1:1) y apenas dos veces, lo cual no permite hacer una afirmación sobre qué proporción de mezcla genera mayor producción de metano. Por otro lado, está la temperatura. El rango en el que se produce mayor cantidad de metano es el de 35–37°C. De los diez datos que presentan producciones de metano por encima del promedio, el 80% registra como temperatura de operación el rango mencionado. De igual manera, los cinco artículos que presentan mayor producción de metano están dentro de este mismo rango. Lo anterior indica que este es el rango de mejor operación para el proceso de producción de metano. Sin embargo, dos datos registran un valor de temperatura de 47°C y 55°C, y también corresponden a producciones mayores al promedio. Esta producción se le puede atribuir al sustrato utilizado, ya que la mezcla puede dar muy buenos resultados en cualquier rango de temperatura hasta este límite de 55°C.

A diferencia de lo anterior, las temperaturas bajas no favorecen el proceso. A 25°C no se reporta un valor significativo de biogás, sino que está por debajo del promedio. Aunque el artículo que registra este valor de temperatura no registra valor de biogás, se puede inferir que es la temperatura la que afecta la producción de metano. De igual manera, la temperatura de 150°C es muy alta para el buen desarrollo del proceso y registra un valor menor al promedio, aunque no es la más baja.

La concentración de metano en el biogás varía en un rango muy amplio, empezando con una concentración del 26% v/v hasta el 91%v/v. Por ende, no se observa una correlación clara. En general, los textos expresan que al menos un 50% del biogás es metano; pero, en este caso, se observa que no se cumple para todos los casos. Solo once del total de este grupo de datos expresa un valor de concentración de metano mayor al 50% v/v.

Tabla 3. Resultados segundo grupo de artículos, unidades de L (CH₄ o biogás)/ kg Sólidos Volátiles *día

No	Sustrato	Proporción	Producción		Temperatura	C
			Biogás	CH ₄		
			L/Kg SV*d	L/Kg SV*d	°C	%v/v
1	Estiércol de vaca + sólidos de estiércol de vaca acidificado	7:3	11,07	6,75	50	61,00%
2	Estiércol de vaca + sustratos de hongos gastados	3:1	2,79	1,56	32	55,91%
3	Estiércol de vaca + residuos de producción de azúcar + agua	0:1:9.	23,52	12	32	51,02%
4	Estiércol de vaca + melaza	9:1.	27,8	15	37	53,96%
5	Estiércol de vaca + Residuos de tomate + hojarasca de maíz	3:3:4.	18,8	9,23	35	49,10%
6	Estiércol de vaca + paja de maíz	10:3	-	12,59	55	-
7	Estiércol de vaca + rábano forrajero	7:3	10,44	7	35	67,05%

Continúa...

... Viene

No	Sustrato	Proporción	Producción		Temperatura	C
			Biogás	CH ₄		
			L/Kg SV*d	L/Kg SV*d	°C	%v/v
8	Estiércol de vaca + estiércol de pollo + estiércol de cerdo + paja de arroz	1:1	-	7,2	35	-
9	Estiércol de vaca + residuos orgánicos domésticos	1:1	12,61	6,18	55	48,97%
10	Estiércol de vaca + estiércol de pollo + paja de trigo	1:1:0	19,4	7,82	35	40,31%
11	Estiércol de vaca + Desechos de servicio de comidas	4:1	-	15,03	37	-
12	Estiércol de vaca + lodos residuales de la industria de la carne + residuos ruminales + restos de vaca de cerdos	1:9	56,81	29,2	35	51,40%
13	Estiércol de cerdo + residuos de comida	1:4	-	14,88	39	-
14	Estiércol de cerdo + tallo de maíz	1:1,5	4,18	2,09	35	50,00%
15	Estiércol de cerdo + lodo de aguas residuales desecado	2:1	-	3,72	37	-
16	Estiércol de cerdo concentrado + ensilaje de pasto	3:1	-	8,52	35	-
17	Estiércol de cerdo + estiércol de ganado + basura	1:19:12	6,63	3,86	53	58,22%
18	Estiércol de cerdo + algas	1.5:1	-	10,71	35	-
19	Estiércol de pollo + Residuos de alimentos	1:1	6,53	3,26	35	49,92%
20	Estiércol de pollo + hojarasca de maíz	1:1	19,17	10,63	37	55,45%
21	Estiércol de ganado + paja de trigo triturada	1:1	-	15,3	35	-
22	Estiércol de ganado + cultivos alternativos (cardo, maíz, sorgo, cardo mariano y camas de paja)	3:2	-	6,84	37	-
23	Estiércol de ganado + Fibra de palma prensada + lodo de un biodigestor que trabaja con estiércol de cerdo y pollo	1:3	-	11,54	37	-
24	Estiércol de cerdo + paja de arroz + arcilla	1:2:3	-	1,96	55	-

Fuente: elaboración propia con base en los artículos consultados.

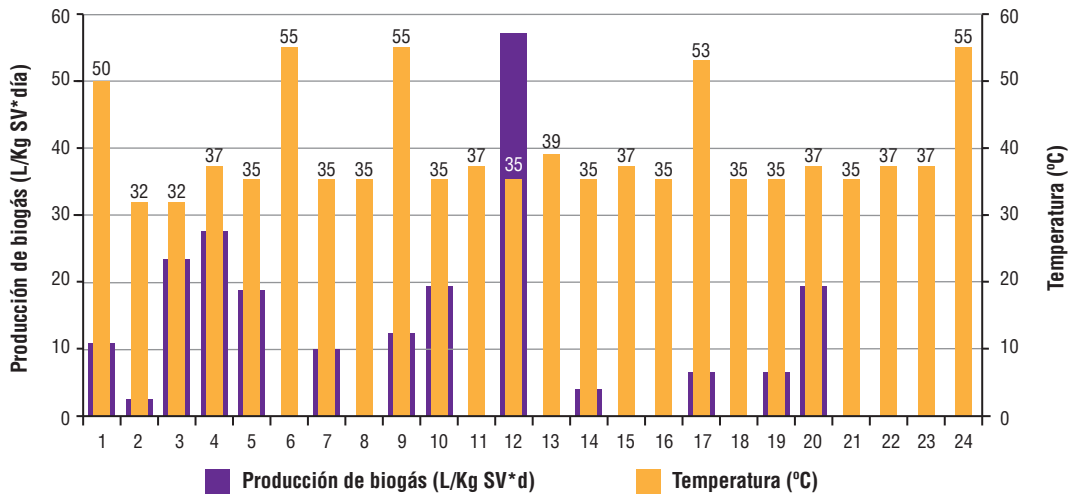


Figura 4. Gráfica de producción de biogás y temperatura —eje secundario—
Fuente: elaboración propia con datos de tabla 3.

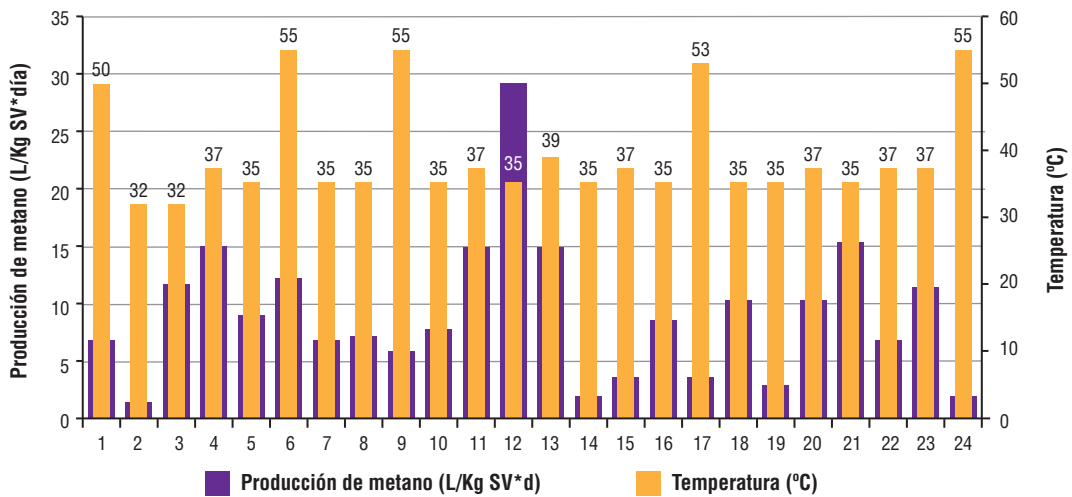


Figura 5. Gráfica de producción de metano y temperatura (eje secundario).
Fuente: elaboración propia con datos de tabla 3.

Tabla 4. Resultados tercer grupo de artículos, unidades L (CH₄ o biogás)/Kg sólidos totales *día

No	Sustrato	Proporción	Producción		Temperatura	C
			Biogás	CH ₄		
			L/Kg _{ST} *d	L/Kg _{ST} *d	°C	% v/v
1	Estiércol de pollo + estiércol de vaca + recortes de pasto fresco + estiércol de cerdo + lodos de aguas residuales primarias + residuos de alimentos vegetales + paja de trigo y paja de arroz + Granos de granjas de la cervecería	2:1	4,8	4,3	55	89,58 %
2	Estiércol de cerdo + litera de aves de corral + desechos de procesamiento de vegetales	2:1:0	3,9	3,1	35	79,49 %
3	Estiércol de ganado + cama de ovejas	1:3	7,6	3,8	18,4	50,00 %

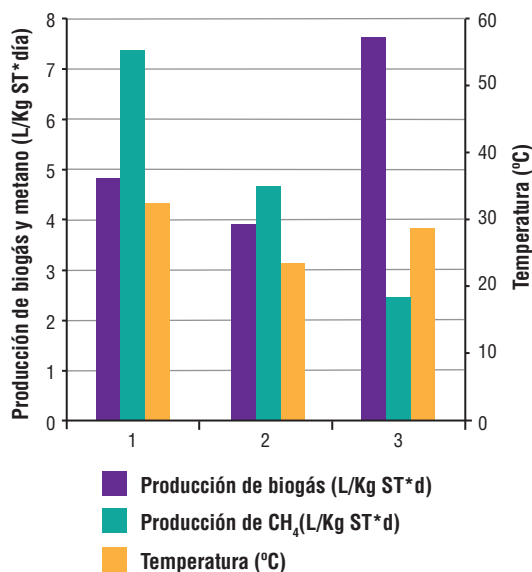


Figura 6. Producción de biogás (metano y temperatura; eje secundario)

Fuente: elaboración propia con datos de tabla 4.

Los artículos que registran mayor producción de metano en este grupo utilizan como

sustrato combinaciones con estiércol de vaca. El promedio de producción de metano de estos datos es de 9,29 L/Kg sv *día, de los cuales diez artículos (45 %) están por encima. Cinco de estos diez artículos (50 %) registran un valor superior al promedio y utilizan como sustrato estiércol de vaca; dos, estiércol de cerdo; otros dos, estiércol de ganado, y uno, estiércol de pollo. Los cinco datos de producción de metano más alta registran sustratos con estiércol de vaca, cerdo y ganado. Tres de estos cinco utilizan una mezcla con estiércol de vaca. El cosustrato no muestra ningún patrón de producción de metano y es más difícil de agrupar para hacer una afirmación clara. De los otros catorce artículos que registran valores por debajo del promedio de producción de metano, también el 50 % corresponden a sustratos que utilizan estiércol de vaca. Por lo tanto, no hay un patrón claro de producción de este gas. Es posible que los datos de baja producción se le puedan atribuir al cosustrato, aunque también a las temperaturas por fuera del rango

mesófilo. Los datos de la figura 6 muestran algo diferente: el sustrato que mayor producción de metano presenta es la combinación de estiércol de pollo con otros residuos; por lo tanto, no hay una correlación clara. Sin embargo, no hay suficientes datos para hacer una comparación.

Igual que en el grupo de datos anterior (tabla 2), las proporciones son variadas. El dato que más se utiliza es la mezcla en iguales proporciones que se repite apenas cinco veces (21%). Solo una tiene igual proporción (1:1). Una registra un valor de 9:1; otra, 4:1; otra, 1:9, y la última, 1:4. De lo anterior no hay un patrón claro de producción de biogás; por lo tanto, no hay una proporción que genere mayor cantidad de metano. Para el caso de la temperatura, se observa que, al igual que en casos anteriores, los procesos se llevan a cabo en un rango de 35–37 °C en su mayoría, con diecisiete artículos (71 %) que registran valores dentro de este rango. Los datos atípicos son temperaturas de 55 °C o de 18 °C. La concentración de metano en el biogás está por encima del 50 % en solo once artículos (45 %) del grupo de datos, lo que no alcanza a ser ni la mitad de los datos recopilados. Lo anterior no confirma la afirmación de los libros de texto de que, en todos los casos, el metano está por encima del 50 % v/v del biogás.

4. Discusión

Esta revisión confirma lo planteado por Guevara (1996) acerca de la idea de que los sustratos más utilizados son los tipos de estiércol y, en mayor proporción, el de ganado bovino. Esto se debe a que este último proporciona la mejor producción de metano por su relación C/N. No obstante, se requiere una mayor investigación, pues aguas las residuales, al igual

que las combinaciones de sustratos con material celulósico proveniente de cultivos y de comida, pueden generar una alta tasa de producción de metano y el estiércol bovino solo acidifica la mezcla, hecho que interrumpe la actividad microbiana (Li et ál., 2014).

La producción de biogás varía de acuerdo con la mezcla de sustratos y con la proporción de esta. Las proporciones mostradas son aquellas en las que se observa una mayor producción de biogás y, por lo tanto, de metano. Se puede presentar el caso en el que la proporción no es la adecuada. Por consiguiente, el material no es suficiente para generar gran cantidad de biogás y metano. Lo anterior puede estar relacionado inicialmente con la relación C/N. Estas proporciones de mezcla son las que mejor relación C/N dan para la codigestión. Según Guevara (1996) y Castells (2012), la relación adecuada de nutrientes (relación C/N) para el desarrollo de la flora bacteriana debe ser de 30:1, dado que esta aumenta la velocidad de reacción, disminuye problemas de inhibición y determina la proporción de metano en el biogás.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 2, cabe resaltar que el sustrato de la codigestión del artículo 8 (estiércol de cerdo + subproducto de remolacha azucarera) es aquel que evidencia mayor producción de biogás, debido a la variable de velocidad de alimentación del biodigestor. Según Aboudí, Álvarez-Gallego y Romero-García (2015), el aumento progresivo de la alimentación conduce al aumento continuo de las producciones de metano. Sin embargo, el aumento de la velocidad de alimentación excesiva causa una fuerte disminución en la producción de metano, debido a la sobrecarga del reactor. Por otro lado, el sustrato n.º 20 (estiércol de cerdo + residuos de cocina —vegetales residuales, carne, arroz y fideos—) presenta la mayor

producción de biogás; pero no de metano. Esto se debe a que la codigestión tuvo una larga fase de retraso para la producción de biogás, que prolonga el tiempo de retención hidráulica y la existencia de hidrógeno resultante de la acumulación de grasas. Por ello, entre mayor es la proporción de residuos de cocina, menor es el contenido de metano (Tian et ál., 2015). La concentración de metano en el biogás del sustrato n.º 4 (estiércol de vaca + residuos de comida) es la más alta debido al tamaño de las partículas. Se deben reducir alrededor de un 67% del tamaño de la partícula que da como resultado alto contenido de metano en el biogás (Agyeman y Tao, 2014).

En la tabla 3, el sustrato n.º 12 (estiércol de vaca + lodos residuales de la industria de la carne + residuos ruminales + restos de vaca de cerdos) registró uno de los mayores valores de producción de biogás y de metano, debido a que aumentó la cantidad de lodo residual en las mezclas de codigestión y a que la cantidad de fracciones inertes y biodegradables disminuyó lentamente, hecho que condujo a un aumento en fracciones fácilmente biodegradables, y este, a su vez, indujo a la eliminación de sólidos volátiles y rendimientos de metano altos. Estos resultados sugieren que el uso de residuos fácilmente biodegradables como cosustrato, la biodegradabilidad anaerobia de residuos orgánicos complejos puede ser mejorada (Buendía et ál., 2009).

Por otro lado, el sustrato n.º 21 (estiércol de ganado + paja de trigo triturada) registra un valor de producción de biogás alto debido al contenido proteico que suministran estos dos sustratos, una menor concentración de productos del metabolismo proteico en los reactores que trabajan con paja (Xavier et ál., 2015). Finalmente, el sustrato n.º 4 (estiércol de vaca + melaza) presenta una alta producción de biogás (Fang et ál., 2011) debido a la

estabilidad del proceso en el pH ya que se debe mantener neutro, además la concentración de melaza debe estar por debajo del 15% y no se debe diluir con agua para que el proceso no se desestabilice. En el sustrato n.º 7, el alto contenido de metano en el biogás se presenta debido al contenido de nutrientes como el azufre en el rábano (Belle et ál., 2015).

Por otro lado, en los resultados obtenidos en la tabla 4, la alta producción de biogás registrada por el artículo 3 se debe al alto contenido de fibra en lecho de ovejas y también a la presencia de cáscara de arroz en este componente de la mezcla. La presencia de lignina en material lignocelulósico, que se encuentra en grandes cantidades en la cáscara de arroz, constituye una barrera para la degradación química y biológica. Esto evita el ataque microbiano y enzimático de la celulosa y la hemicelulosa. La ruptura de esta capa impermeable de lignina es necesaria para la hidrólisis de celulosa y hemicelulosa (Cestonaro et ál., 2015).

La temperatura es un parámetro de operación significativo para la producción biogás. Según Mejía (1996) el proceso de digestión anaerobia puede realizarse a tres rangos diferentes de temperatura: psicrófilo (<20 °C), mesófilo (entre 30 y 40 °C) y termófilo (entre 50 y 70 °C). Además de esto, Rincón (2014) dicen que la mayoría de las bacterias metanogénicas son conocidas como mesófilas y tienen una temperatura óptima de trabajo en torno a 35 °C. Un alto porcentaje de los estudios revisados validan lo anterior, dado que más de la mitad de los experimentos fueron realizados bajo condiciones mesófilas, con mayores producciones de biogás y, por lo tanto, de metano. Por otro lado, son pocos los artículos que operaban en condiciones termófilas, dado que estos requieren mayor control y seguimiento, debido a que en altas temperaturas el nitrógeno amoniacal se comporta

como inhibidor; sin embargo, aumenta la velocidad de crecimiento de las bacterias y, con ello, también la tasa de producción de biogás. De acuerdo con la producción de metano, se observa que efectivamente aquellos estudios que presentaban condiciones mesófilas daban mayor producción que aquellas termófilas.

5. Conclusiones

- La codigestión anaerobia se puede llevar a cabo con cualquier tipo de sustrato biodegradable. Los sustratos más propicios para la obtención de biogás y metano son los residuos de alimentos, tal como residuos de comida en general, sueros de queso o leche y remolacha, mezclados con estiércol de animales de granja. Es importante que los residuos de alimentos no contengan grasas animales, pues esto retrasa el proceso de digestión.
- El sustrato determina la cantidad de metano y biogás producido, de acuerdo a la temperatura y la proporción de mezcla. La temperatura se debe controlar y mantener en un rango mesófilo entre 35 y 40 °C para que se produzca mayor volumen de metano. Mientras que la proporción de sustratos en la mezcla debe ajustarse, asegurando una relación C/N en un rango 20-30:1 para garantizar que más del 50% de gas generado sea metano.
- No existe una matematización generalizada para calcular la eficiencia de un biodigestor.
- La presentación de unidades varía. Esto implica hacer conversiones para realizar la comparación de los resultados hallados. Por

lo tanto, es importante estandarizar la información de los valores encontrados para que no se presenten errores en el reporte de datos.

6. Recomendaciones

- Se recomienda, para futuros estudios, usar la siguiente ecuación para evaluar la eficiencia:

$$Eficiencia(\%) = \frac{PG * TR}{P * SO * TR} * 100$$

Donde:

$$PG: \text{ Gas producido } \left(\frac{L}{d} \text{ o } \frac{Kg}{d} \right)$$

TR: Tiempo de retención (días)

P: Producción de biogás aproximada
(mostrada en tablas 2, 3 y 4)

SO: Materia prima alimentada

$$(L_{\text{sustrato}} \text{ o } kg_{\text{Sólidos Volátiles}} \text{ o } kg_{\text{Sólidos Totales}})$$

La anterior ecuación relaciona los resultados obtenidos en esta revisión con producciones de biogás obtenidos en futuros estudios.

Agradecimientos

Nuestros más sinceros agradecimientos a Ángela Patricia Navas Berdugo, docente del Departamento de Biología de la Universidad Central, por su gran colaboración con la elaboración de este documento, por su tiempo,

disposición y dedicación en sus labores como docente.

Referencias

- Aboudí, K., Álvarez-Gallego, C. J. y Romero-García, L. I. (2015). Semi-continuous anaerobic co-digestion of sugar beet byproduct and pig manure: Effect of the organic loading rate (OLR) on process performance. *Bioresource Technology*, 194, 283-290. doi:10.1016/j.biortech.2015.07.031.
- Aboudí, K., Álvarez-Gallego, C. J. y Romero-García, L. I. (2016). Evaluation of methane generation and process stability from anaerobic co-digestion of sugar beet by-product and cow manure. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 121 (5), 566-572. doi:10.1016/j.jbiosc.2015.10.005.
- Agyeman, F. O. y Tao, W. (2014). Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure: Effects of food waste particle size and organic loading rate. *Journal of Environmental Management*, 133, 268-274. doi:10.1016/j.jenvman.2013.12.016.
- Akhiar, A., Battimelli, A., Torrijos, M. y Carrere, H. (2017). Comprehensive characterization of the liquid fraction of digestates from full-scale anaerobic co-digestion. *Waste Management*, 59, 118-128. doi:10.1016/j.wasman.2016.11.005.
- Astals, S., Musenze, R. S., Bai, X., Tannock, S., Tait, S., Pratt, S. y Jensen, P. D. (2015). Anaerobic co-digestion of pig manure and algae: Impact of intracellular algal products recovery on co-digestion performance. *Bioresource Technology*, 181, 97-104. doi:10.1016/j.biortech.2015.01.039.
- Bah, H., Zhang, W., Wu, S., Qi, D., Kizito, S. y Dong, R. (2014). Evaluation of batch anaerobic co-digestion of palm pressed fiber and cattle manure under mesophilic conditions. *Waste Management*, 34 (11), 1984-1991. doi:10.1016/j.wasman.2014.07.015.
- Belle, A. J., Lansing, S., Mulbry, W. y Weil, R. R. (2015). Anaerobic co-digestion of forage radish and dairy manure in complete mix digesters. *Bioresource Technology*, 178, 230-237. doi:10.1016/j.biortech.2014.09.036.
- Brown, N., Güttler, J. y Shilton, A. (2016). Overcoming the challenges of full scale anaerobic co-digestion of casein whey. *Renewable Energy*, 96, Part A, 425-432. doi:10.1016/j.renene.2016.04.044.
- Buendía, I. M., Fernández, F. J., Villaseñor, J. y Rodríguez, L. (2009). Feasibility of anaerobic co-digestion as a treatment option of meat industry wastes. *Bioresource Technology*, 100 (6), 1903-1909. doi:10.1016/j.biortech.2008.10.013.
- Castells, X. E. (2012). *Tecnologías aplicables al tratamiento de residuos: Reciclaje de residuos industriales*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Castells, X. E., Ripoll, X. F. y Pozuelo, E. C. (2012). *Procesos biológicos. la digestión anaerobia y el compostaje: Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Cavinato, C., Fatone, F., Bolzonella, D. y Pavan, P. (2010). Thermophilic anaerobic co-digestion of cattle manure with agro-wastes and energy crops: Comparison of pilot and full scale experiences. *Bioresource Technology*, 101 (2), 545-550. doi:10.1016/j.biortech.2009.08.043.
- Cestonaro, T., Costa, Silva de Mendonça, M. S., Costa, L. A. d. M., Rozatti, M. A. T.,

- Pereira, D. C., Lorin, H. E. F. y Carneiro, L. J. (2015). The anaerobic co-digestion of sheep bedding and $\geq 50\%$ cattle manure increases biogas production and improves biofertilizer quality. *Waste Management*, 46, 612-618. doi:10.1016/j.wasman.2015.08.040.
- Compostaje, R. E. D. (2014). *Residuos urbanos I.4*. Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Dareioti, M.A., Dokianakis, S. N., Stamatelatos, K., Zafiri, C., & Kornaros, M. (2009). Biogas production from anaerobic co-digestion of agroindustrial wastewaters under mesophilic conditions in a two-stage process. *Desalination*, 248 (1-3), 891-906. doi:10.1016/j.desal.2008.10.010.
- Dennehy, C., Lawlor, P. G., Croize, T., Jiang, Y., Morrison, L., Gardiner, G. E. y Zhan, X. (2016). Synergism and effect of high initial volatile fatty acid concentrations during food waste and pig manure anaerobic co-digestion. *Waste Management*, 56, 173-180. doi:10.1016/j.wasman.2016.06.032.
- Ebner, J. H., Labatut, R. A., Lodge, J. S., Williamson, A. A. y Trabold, T. A. (2016). Anaerobic co-digestion of commercial food waste and dairy manure: Characterizing biochemical parameters and synergistic effects. *Waste Management*, 52, 286-294. doi:10.1016/j.wasman.2016.03.046.
- Energreencol. (2015). Soluciones de energía para áreas rurales en Colombia. Consultado en <https://goo.gl/AqP3Ju>.
- Estévez, M. M., Sapci, Z., Linjordet, R., Schnürer, A. y Morken, J. (2014). Semi-continuous anaerobic codigestion of cow manure and steam-exploded salix with recirculation of liquid digestate. *Journal of Environmental Management*, 136, 9-15. doi:10.1016/j.jenvman.2014.01.028.
- Fang, C., Boe, K. y Angelidaki, I. (2011). Anaerobic co-digestion of by-products from sugar production with cow manure. *Water Research*, 45 (11), 3473-3480. doi:10.1016/j.watres.2011.04.008.
- Fang, C., Boe, K. y Angelidaki, I. (2011). Anaerobic co-digestion of desugared molasses with cow manure; focusing on sodium and potassium inhibition. *Bioresource Technology*, 102 (2), 1005-1011. doi:10.1016/j.biortech.2010.09.077.
- Frison, N., Katsou, E., Malamis, S., Bolzonella, D. y Fatone, F. (2013). Biological nutrients removal via nitrite from the supernatant of anaerobic co-digestion using a pilot-scale sequencing batch reactor operating under transient conditions. *Chemical Engineering Journal*, 230, 595-604. doi:10.1016/j.cej.2013.06.071.
- Ganesh, R., Torrijos, M., Sousbie, P., Steyer, J. P., Lugardon, A., & Delgenes, J. P. (2013). Anaerobic co-digestion of solid waste: Effect of increasing organic loading rates and characterization of the solubilised organic matter. *Bioresource Technology*, 130, 559-569. doi:10.1016/j.biortech.2012.12.119.
- García-Gen, S., Lema, J. M. y Rodríguez, J. (2013). Generalised modelling approach for anaerobic co-digestion of fermentable substrates. *Bioresource Technology*, 147, 525-533. doi:10.1016/j.biortech.2013.08.063.
- Glanpracha, N. y Annachatre, A. P. (2016). Anaerobic co-digestion of cyanide containing cassava pulp with pig manure. *Bioresource Technology*, 214, 112-121. doi:10.1016/j.biortech.2016.04.079.
- Guevara Vera, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos*

- rurales: producción de gas y saneamiento de efluentes. Consultado en <https://goo.gl/UF13bg>.
- Hernández, M. A., Rodríguez Susa, M. y Andres, Y. (2014). Use of coffee mulch as a new substrate for hydrogen production in anaerobic co-digestion with swine manure. *Bioresource Technology*, 168, 112-118. doi:10.1016/j.biortech.2014.02.101.
- Jiménez, J., Guardia-Puebla, Y., Cisneros-Ortiz, M. E., Morgan-Sagastume, J. M., Guerra, G. y Noyola, A. (2015). Optimization of the specific methanogenic activity during the anaerobic co-digestion of pig manure and rice straw, using industrial clay residues as inorganic additive. *Chemical Engineering Journal*, 259, 703-714. doi:10.1016/j.cej.2014.08.031.
- Kalamaras, S. D. y Kotsopoulos, T. A. (2014). Anaerobic co-digestion of cattle manure and alternative crops for the substitution of maize in south europe. *Bioresource Technology*, 172, 68-75. doi:10.1016/j.biortech.2014.09.005.
- Khairuddin, N., Manaf, L. A., Halimoon, N., Ghani, W. A. y Hassan, M. A. (2015). High solid anaerobic co-digestion of household organic waste with cow manure. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 174-179. doi:10.1016/j.proenv.2015.10.031.
- Li, J., Wei, L., Duan, Q., Hu, G. y Zhang, G. (2014). Semi-continuous anaerobic co-digestion of dairy manure with three crop residues for biogas production. *Bioresource Technology*, 156, 307-313. doi:10.1016/j.biortech.2014.01.064.
- Li, Y., Li, Y., Zhang, D., Li, G., Lu, J. y Li, S. (2016). Solid state anaerobic co-digestion of tomato residues with dairy manure and corn stover for biogas production. *Bioresource Technology*, 217, 50-55. doi:10.1016/j.biortech.2016.01.111.
- Li, Y., Zhang, R., He, Y., Zhang, C., Liu, X., Chen, C. y Liu, G. (2014). Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch and continuously stirred tank reactor (CSTR). *Bioresource Technology*, 156, 342-347. doi:10.1016/j.biortech.2014.01.054.
- Linke, B., Muha, I., Wittum, G. y Plogsties, V. (2013). Mesophilic anaerobic co-digestion of cow manure and biogas crops in full scale german biogas plants: A model for calculating the effect of hydraulic retention time and VS crop proportion in the mixture on methane yield from digester and from digestate storage at different temperatures. *Bioresource Technology*, 130, 689-695. doi:10.1016/j.biortech.2012.11.137.
- Liu, K., Tang, Y., Matsui, T., Morimura, S., Wu, X. y Kida, K. (2009). Thermophilic anaerobic co-digestion of garbage, screened swine and dairy cattle manure. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 107(1), 54-60. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiosc.2008.09.007.
- Martí-Herrero, J., Alvarez, R., Cespedes, R., Rojas, M. R., Conde, V., Aliaga, L., Balboa, M. Danov, S. (2015). Cow, sheep and llama manure at psychrophilic anaerobic co-digestion with low cost tubular digesters in cold climate and high altitude. *Bioresource Technology*, 181, 238-246. doi:10.1016/j.biortech.2015.01.063.
- Molinuevo-Salces, B., García-González, M. C., González-Fernández, C., Cuetos, M. J., Morán, A. y Gómez, X. (2010). Anaerobic co-digestion of livestock wastes with vegetable processing wastes: A statistical analysis. *Bioresource Technology*,

- 101 (24), 9479-9485. doi:10.1016/j.biortech.2010.07.093.
- Molinuevo-Salces, B., Gómez, X., Morán, A., & García-González, M. C. (2013). Anaerobic co-digestion of livestock and vegetable processing wastes: Fibre degradation and digestate stability. *Waste Management*, 33(6), 1332-1338. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.02.021.
- Nogues, F. (2010). *Energía de la biomasa (vol. ii): (energías renovables)*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Ortega, N. M. (2006). *Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process* Universal-Publishers.
- Pagés-Díaz, J., Pereda-Reyes, I., Taherzadeh, M. J., Sárvári-Horváth, I. y Lundin, M. (2014). Anaerobic co-digestion of solid slaughterhouse wastes with agro-residues: Synergistic and antagonistic interactions determined in batch digestion assays. *Chemical Engineering Journal*, 245, 89-98. doi:10.1016/j.cej.2014.02.008.
- Poulsen, T. G., Adelard, L. y Wells, M. (2016) Improvement in CH₄/CO₂ ratio and CH₄ yield as related to biomass mix composition during anaerobic co-digestion. *Waste Management*, doi:10.1016/j.wasman.2016.11.009.
- Regueiro, L., Carballa, M. y Lema, J. M. (2014). Outlining microbial community dynamics during temperature drop and subsequent recovery period in anaerobic co-digestion systems. *Journal of Biotechnology*, 192, Part A, 179-186. doi:10.1016/j.jbiotec.2014.10.007.
- Ren, J., Yuan, X., Li, J., Ma, X., Zhao, Y., Zhu W., Wang, X., Cui, Z. (2014). Performance and microbial community dynamics in a two-phase anaerobic co-digestion system using cassava dregs and pig manure. *Bioresource Technology*, 155, 342-351. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.120.
- Rico, C., Muñoz, N. y Rico, J. L. (2015). Anaerobic co-digestion of cheese whey and the screened liquid fraction of dairy manure in a single continuously stirred tank reactor process: Limits in co-substrate ratios and organic loading rate. *Bioresource Technology*, 189, 327-333. doi:10.1016/j.biortech.2015.04.032.
- Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J. y Rico, J. L. (2015). High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate. *Chemical Engineering Journal*, 262, 794-802. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.050.
- Rincón Martínez, J. M. y Silva Lora, E. E. (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogotá: Cytod.
- Rodríguez-Verde, I., Regueiro, L., Carballa, M., Hospido, A., & Lema, J. M. (2014). Assessing anaerobic co-digestion of pig manure with agroindustrial wastes: The link between environmental impacts and operational parameters. *Science of the Total Environment*, 497-498, 475-483. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.07.127.
- Schwede, S., Kowalczyk, A., Gerber, M. y Span, R. (2013). Anaerobic co-digestion of the marine microalga nannochloropsis salina with energy crops. *Bioresource Technology*, 148, 428-435. doi:10.1016/j.biortech.2013.08.157.
- Shi, X., Yuan, X., Wang, Y., Zeng, S., Qiu, Y., Guo, R., & Wang, L. (2014). Modeling of the methane production and pH value during the anaerobic co-digestion of dairy manure and spent mushroom substrate. *Chemical Engineering Journal*,

- 244, 258–263. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.02.007>.
- Sutaryo, S., Ward, A. J. y Møller, H. B. (2012). Thermophilic anaerobic co-digestion of separated solids from acidified dairy cow manure. *Bioresource Technology*, 114, 195–200. doi:[10.1016/j.biortech.2012.03.041](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.041).
- Tian, H., Duan, N., Lin, C., Li, X. y Zhong, M. (2015). Anaerobic co-digestion of kitchen waste and pig manure with different mixing ratios. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 120 (1), 51–57. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.11.017>.
- Umetsu, K., Yamazaki, S., Kishimoto, T., Takahashi, J., Shibata, Y., Zhang, C., Misaki, O., Ihara, M. y Komiyama, M. (2006). Anaerobic co-digestion of dairy manure and sugar beets. *International Congress Series*, 1293, 307–310. doi:[10.1016/j.ics.2006.03.025](https://doi.org/10.1016/j.ics.2006.03.025).
- Universidad de Murcia. (1988). *La digestión anaerobia*. Murcia: Editum.
- Wang, M., Sun, X., Li, P., Yin, L., Liu, D., Zhang, Y. y Zheng, G. (2014). A novel alternate feeding mode for semi-continuous anaerobic co-digestion of food waste with chicken manure. *Bioresource Technology*, 164, 309–314. doi:[10.1016/j.biortech.2014.04.077](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.077).
- Wang, X., Li, Z., Zhou, X., Wang, Q., Wu, Y., Saino, M. y Bai, X. (2016). Study on the bio-methane yield and microbial community structure in enzyme enhanced anaerobic co-digestion of cow manure and corn straw. *Bioresource Technology*, 219, 150–157. doi:[10.1016/j.biortech.2016.07.116](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.116).
- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G. y Han, X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, 120, 78–83. doi:[10.1016/j.biortech.2012.06.058](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.058).
- Wang, X., Yang, G., Li, F., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2013). Evaluation of two statistical methods for optimizing the feeding composition in anaerobic co-digestion: Mixture design and central composite design. *Bioresource Technology*, 131, 172–178. doi:[10.1016/j.biortech.2012.12.174](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.174).
- Weerayuttil, P., Khoyun, U. y Khuanmar, K. (2016). Optimum ratio of chicken manure and napier grass in single stage anaerobic co-digestion. *Energy Procedia*, 100, 22–25. doi:[10.1016/j.egypro.2016.10.141](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.141).
- Xavier, C. A. N., Moset, V., Wahid, R. y Møller, H. B. (2015). The efficiency of shredded and briquetted wheat straw in anaerobic co-digestion with dairy cattle manure. *Biosystems Engineering*, 139, 16–24. doi:[10.1016/j.biosystemseng.2015.07.008](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.008).
- Xia, Y., Massé, D. I., McAllister, T. A., Kong, Y., Seviour, R. y Beaulieu, C. (2012). Identity and diversity of archaeal communities during anaerobic co-digestion of chicken feathers and other animal wastes. *Bioresource Technology*, 110, 111–119. doi:[10.1016/j.biortech.2012.01.107](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.107).
- Xie, S., Lawlor, P. G., Frost, J. P., Hu, Z. y Zhan, X. (2011). Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of concentrated pig manure and grass silage. *Bioresource Technology*, 102 (10), 5728–5733. doi:[10.1016/j.biortech.2011.03.009](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.009).

- Xie, S., Wu, G., Lawlor, P. G., Frost, J. P. y Zhan, X. (2012). Methane production from anaerobic co-digestion of the separated solid fraction of pig manure with dried grass silage. *Bioresource Technology*, 104, 289-297. doi:10.1016/j.biortech.2011.11.076.
- Zhai, N., Zhang, T., Yin, D., Yang, G., Wang, X., Ren, G., & Feng, Y. (2015). Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure. *Waste Management*, 38, 126-131. doi:10.1016/j.wasman.2014.12.027.
- Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H. y Tan, T. (2013). The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology*, 129, 170-176. doi:10.1016/j.biortech.2012.10.138.
- Zhang, T., Mao, C., Zhai, N., Wang, X. y Yang, G. (2015). Influence of initial pH on thermophilic anaerobic co-digestion of swine manure and maize stalk. *Waste Management*, 35, 119-126. doi:10.1016/j.wasman.2014.09.004.
- Zhang, W., Wei, Q., Wu, S., Qi, D., Li, W., Zuo, Z. y Dong, R. (2014). Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions. *Applied Energy*, 128, 175-183. doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.071.