

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Estado del arte sobre la producción de biogás mediante la digestión anaerobia como parte del aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria

Por:

Mery Yulissa Huaraya Huahualuque
Thania Crisbeth Sancho Moya

Asesor:

Ing. Veronika Haydee Pari Mamani

Juliaca, setiembre de 2020

DECLARACIÓN JURADA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Veronika Haydee Pari Mamani, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: “ESTADO DEL ARTE SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA COMO PARTE DEL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA RESIDUAL PECUARIA” constituye la memoria que presentan la estudiante Mery Yulissa Huaraya Huahualuque y la estudiante Thania Crisbeth Sancho Moya para aspirar al Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental – Filial Juliaca, ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en Juliaca, a los 09 días del mes de septiembre del año 2020.



Veronika Haydee Pari Mamani

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a... 09 día(s) del mes de Setiembre del año 2020 siendo las 9:00 horas,

se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión campus Juliaca, bajo la dirección del (de la)

presidente(a) Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera el (la)

secretario(a) MSc. Rose Soelene Ballata Chura y los demás miembros:

MSc. Matío Alejandro Salinas Mena

y el (la) asesor(a) Ing. Verónica Staydee Pari Mamani

..... con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de investigación titulado:

"Estado del arte sobre la producción de biogás mediante la digestión anaerobia como parte del aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria"

de los (las) egresados (as): a) Mery Yulissa Huaraya

Huahuallague b) Ehania Crisbeth Sancho Moya

..... conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en

Ingeniería Ambiental

(Denominación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando a las candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por las candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): Mery Yulissa Huaraya Huahuallague

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy bueno</u>

Candidato/a (b): Ehania Crisbeth Sancho Moya

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy bueno</u>

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a

[Firma]
Secretario/a

Asesor/a

Miembro

Miembro

Candidato/a (a)

Candidato/a (b)



Una Institución Adventista



Estado del arte sobre la producción de biogás mediante la digestión anaerobia como parte del aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria

Mery Yulissa Huaraya Huahualuque ^{a*}, Thania Crisbeth Sancho Moya ^a, Veronika Haydee Pari Mamani ^a

^aFacultad de Ingeniería y Arquitectura EP Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión

Resumen

Los residuos pecuarios son materiales provenientes de la actividad ganadera y son responsables de problemas ambientales, económicos y sociales. Asimismo, se analiza como nuevas alternativas de gestión y valorización de estos residuos de biomasa pecuaria en la generación de biogás. El objetivo de este trabajo de investigación fue, realizar una revisión sobre la producción de biogás mediante la digestión anaerobia como parte del aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria. La digestión anaerobia es un proceso que tiene 4 fases, donde: los residuos pecuarios son digeridos y descompuestos por microorganismos anaerobios bajo condiciones controladas para la producción de biogás. En zonas frías con una cantidad de 20 kg de residuos pecuarios se registra una producción aproximada de 700 a 750 l/día de biogás y en zonas cálidas se incrementa hasta 900 l/día con una concentración neta de 45 a 55 % de metano, siendo esta última la de mayor capacidad de producción de biogás, sin embargo, cabe señalar que en zonas frías si es posible obtener biogás teniendo en cuenta: el tipo de biodigestor, TRH, tipo de sustrato y pH, asimismo, la temperatura no representa una limitación para este método. En conclusión, esta alternativa aporta diferentes beneficios, reduciendo el impacto ambiental de la actividad ganadera al capturar el metano para emplearlo como combustible de cocina o iluminación en zonas rurales.

Palabras clave: Residuos pecuarios; digestión anaerobia; metano; biogás; energía renovable

Abstract

Livestock waste is material from livestock activity and is responsible for environmental, economic and social problems. Likewise, it is analyzed as new alternatives of management and valorization of these livestock biomass residues in the generation of biogas. The objective of this research work was to carry out a review of the production of biogas through anaerobic digestion as part of the use of residual livestock biomass. The anaerobic digestion is a process that has 4 phases, where: the cattle residuals are digested and decomposed by anaerobic microorganisms under controlled conditions for the production of biogas. In cold areas with a quantity of 20 kg of livestock waste, an approximate production of 700 to 750 l/day of biogas is registered and in warm areas it increases to 900 l/day with a net concentration of 45 to 55% of methane, being this last one the one with the highest capacity of biogas production. However, it is important to point out that in cold areas it is possible to obtain biogas taking into account: the type of biodigester, TRH, type of substrate and pH, also, temperature does not represent a limitation for this method. In conclusion, this alternative provides different benefits, reducing the environmental impact of livestock activity by capturing the methane to use it as cooking fuel or lighting in rural areas.

Keywords: Livestock waste; anaerobic digestion; methane; biogas; renewable energy

1. Introducción

La generación de residuos sólidos se está incrementando cada día a nivel global y su deficiente aprovechamiento está provocando serios problemas ambientales, económicos y sociales (Gómez, Sánchez y Matallana, 2019).

En consecuencia, una fracción mayoritaria de estos residuos sólidos corresponde a la biomasa residual, que se define como aquellos materiales orgánicos renovables, que se generan en diferentes actividades: urbanas, agrícolas, pecuarias, agroindustriales entre otros (Gómez, Sánchez y Matallana, 2019), esta biomasa residual pecuaria son materiales resultantes de la actividad ganadera, por otro lado, su elevada generación y su falta de tratamiento son responsables de la emisión de gases con mayor potencial de calentamiento global (Parra, Botero y Botero, 2018); entre estos gases se encuentran el metano (CH₄) proveniente de la fermentación entérica de rumiantes, óxido nítrico procedente del estiércol, y el amoníaco (NH₃) que contribuye a la acidificación de la lluvia y los ecosistemas (IPCC, 2019).

* Autor de correspondencia:

Km. 7 Carretera Héroes de la Guerra del Pacífico, Chullunquiani, Juliaca.

Tel.: +51 953805463

E-mail: mery.hh@upeu.edu.pe

De la actividad ganadera, se tiene a los bovinos que producen una emisión mundial de gas metano entre el 15 – 20%, lo que indica que está causando contaminación a la atmosfera. En el Perú, se estima que existen alrededor de 824 mil productores agropecuarios que tienen al menos un bovino, de los cuales, el 87% se concentra en la sierra (MINAGRI, 2017), además, Bonilla y Lemus (2012) indican que el 90 % de metano emitido por cada bovino, se producen en el rumen y el estiércol. Debido a este problema, es necesario evaluar diversas tecnologías que aporten a la mitigación de estos gases.

Teniendo en cuenta esto, la digestión anaerobia es una alternativa tecnológica viable económica, social y ambientalmente ya que aprovecha los residuos pecuarios y los transforma en biogás, pudiendo ser utilizado en los hogares para cocinar o iluminar (Montenegro, Rojas, Cabeza y Hernández, 2016; Martí, 2010).

Así mismo, Ruiz (2017) postula que la digestión anaerobia es una alternativa promisoriosa para aprovechar el potencial energético del estiércol de bovino, a la vez que contribuye a disminuir los impactos ambientales generados por este residuo.

Gómez, Sánchez y Matallana (2019) enfatizan diferentes formas de aprovechar los residuos pecuarios, dentro de estos se tiene a la licuefacción, gasificación, hidrólisis química, digestión anaerobia y la digestión aeróbica. Métodos que ayudan a darles un valor agregado a los residuos pecuarios.

Por otro lado, Tufaner y Avsar (2016) describen que la relación de la digestión anaerobia con el aprovechamiento de los residuos pecuarios para la producción de biogás, es decir, identifican las diferentes condiciones óptimas para la operación como la temperatura, la Tasa de Carga Orgánica (TCO), el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la eficiencia de eliminación de Sólidos Volátiles (SV) para aprovechar de manera óptima los residuos pecuarios.

Finalmente, Zahariev, Penkov y Aladjadjian (2013) enfatizan que los residuos pecuarios son un recurso prometedor para la producción de biogás por digestión anaerobia. La energía total de metano del estiércol de ganado de vacuno que se puede originar, se estima en 25 188 PJ.

Frente a todo lo mencionando anteriormente, el artículo tiene como objetivo, realizar una revisión sobre la producción de biogás mediante la digestión anaerobia como parte del aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria.

2. Desarrollo o Revisión

2.1. Residuos pecuarios

Pueden ser definidos como un elemento de desecho, dispuesto o que necesita una disposición final, este como excedente de un proceso de producción (Chávez y Rodríguez, 2016). Esta definición se adapta también al ámbito pecuario en la que encontramos los estiércoles y los purines, estos últimos, son nocivos para el ambiente cuando su disposición no es adecuada (Huerga, 2019). Estos residuos contienen diferentes tipos de compuestos como almidones con diferentes porcentajes de amilosa, amilopectina, pectinas, diferentes tipos de proteínas y lípidos como grasas y aceites, entre otros compuestos, además de material lignocelulósico (Tester, Karkalas y Qi, 2003; Gómez, Sánchez y Matallana, 2019).

Dentro de las principales fuentes de biomasa residual pecuaria con capacidad de generar biogás, se encuentra el estiércol de ganado (vacuno, ovino, porcino, auquénidos, aves de corral, etc.) y sus características se muestran en la figura 1.

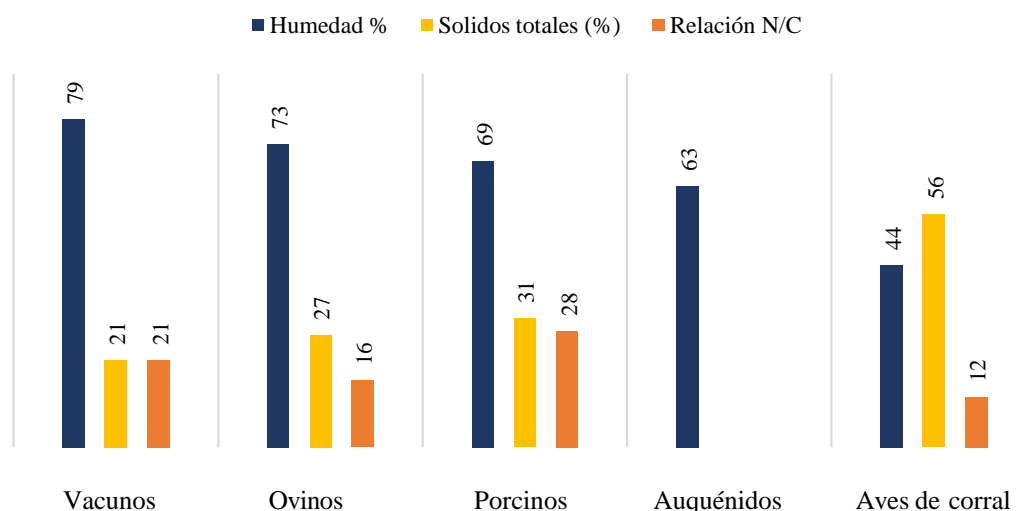


Figura 1. Características del estiércol de diferentes especies.
Fuente: Valdez, 2016.

2.2. Proceso de Digestión Anaerobia (DA)

Es un proceso donde los materiales biodegradables son digeridos y descompuestos por microorganismos anaerobios bajo condiciones óptimas, produciendo biogás (Aghbashlo, Tabatabaei, Soltanian, Ghanavati y Dadak, 2019). Este, está compuesto principalmente de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), también, contiene una cantidad mínima de sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco (NH₃) y otros gases. De la misma manera, Khanal (2008) revela que un proceso anaeróbico es mucho más

complejo que un proceso aeróbico, esto debido a la participación de diversos grupos de microorganismos y una serie de etapas metabólicas interdependientes.

Estas etapas metabólicas son 4, (Figura 2):

- **Hidrólisis:** se da cuando las enzimas licúan las moléculas y descomponen los polímeros grandes en el material en compuestos más sencillos como en aminoácidos, azúcares y ácidos grasos que tengan una cadena larga de carbono (Dana, 2010; Gonzales, Castillo, Correa y Retto, 2017). Esta etapa generalmente es el paso limitante de la DA y este proceso es realizado por microorganismos anaerobios estrictos como bacteroides, clostridium y bacterias facultativas como estreptococci (Cazier, Trably, Steyer y Escudie, 2015).
- **Acidogénesis:** conocida también como etapa fermentativa o segunda etapa, en donde los productos de la hidrólisis (monómeros solubles) se fermentan a Ácidos Grasos Volátiles (AGV), alcoholes, hidrogeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios (Dana, 2010). Esta etapa es muy importante porque los microorganismos logran eliminar el oxígeno disuelto de un sistema (Gonzales, Castillo, Correa y Retto, 2017). Además, la concentración de hidrógeno que se forma como producto intermedio en esta fase, influye en el producto final formado durante el proceso fermentativo (Adekunle y Okolie, 2015).
- **Acetogénesis:** las bacterias acetogénicas descomponen los AGV y alcoholes en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno (Dana, 2010). Esto es importante, puesto que los microorganismos que llevan a cabo las reacciones de oxidación anaeróbica deben de colaborar con la siguiente población microbiana formadoras de metano (Adekunle y Okolie, 2015).
- **Metanogénesis:** Finalmente, los microorganismos metanogénicos convierten el ácido acético y el hidrógeno en CO_2 y CH_4 (Dana, 2010; Gonzales, Castillo, Correa y Retto, 2017). Además, esta última fase puede ser una limitante en la DA de sustratos fácilmente degradables. La velocidad de crecimiento de estos microorganismos frecuentemente resulta influenciada por la acumulación de AGV y en consecuencia, causa la inhibición del proceso de la metanogénesis (Gonzales, Sialve y Molinuevo, 2015).

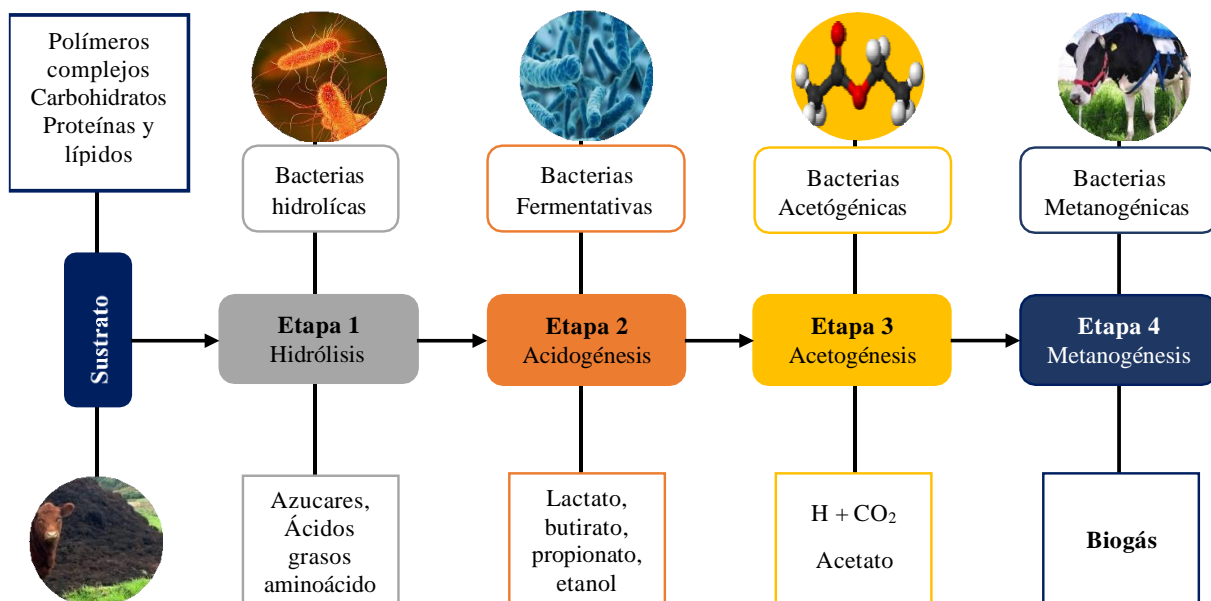


Figura 2. Fases de la digestión anaerobia y los microorganismos que intervienen en el proceso.

2.3. Parámetros físicos, químicos y biológicos que influyen en la DA para la producción de biogás

2.3.1. Temperatura

Interviene en el crecimiento y desarrollo de los microorganismos que participan en la digestión anaerobia, como se muestra en la figura 3, generalmente es posible aplicar tres rangos de temperatura (psicrofílica, mesofílica y termofílica), usualmente las condiciones psicrofílicas ($12-15^{\circ}\text{C}$) declinan la velocidad de crecimiento de los microorganismos y la actividad metanogénica, la DA en condiciones termofílicas ($55-70^{\circ}\text{C}$), tienen una ventaja sobre la DA en condiciones mesofílicas (37°C) en cuanto a la velocidad de reacción, teniendo una mayor productividad (Quinchia, Pérez, Doria y Sánchez, 2017), sin embargo, los microorganismos metanogénicos digieren la materia orgánica con mayor eficiencia a temperatura mesofílica, además, cabe mencionar que los cambios de temperatura bruscos, pueden disminuir la producción de metano (García y Gómez, 2016).

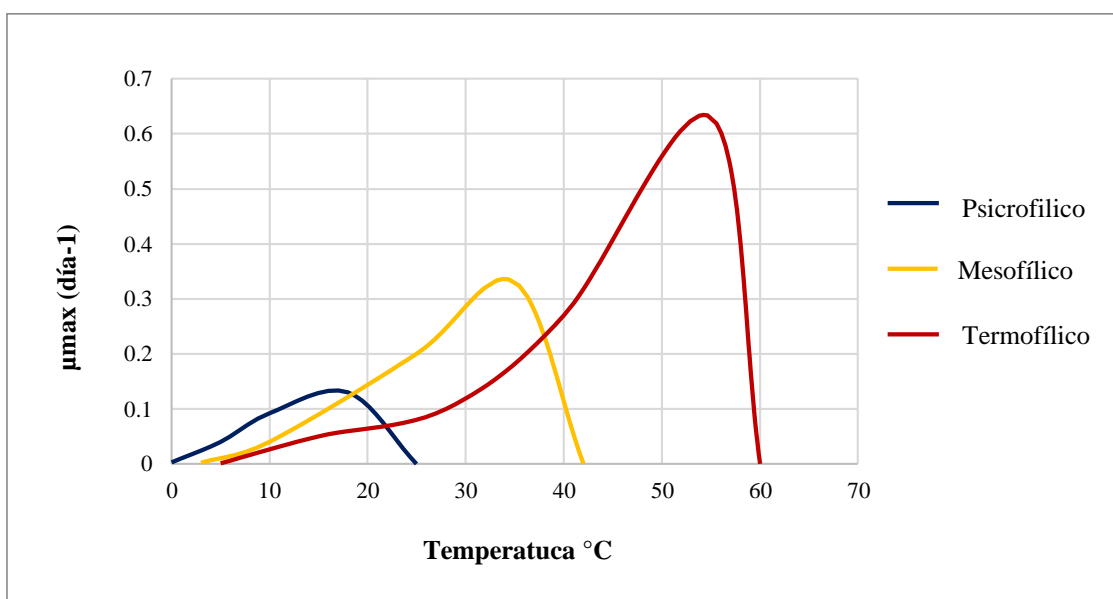


Figura 3. Influencia de la temperatura sobre la razón máxima de crecimiento de microorganismos. Fuente: Nuñez, 2012.

2.3.2. pH

Tiene un efecto significativo sobre el rendimiento de la producción de biogás, esto debido a que, las bacterias de la DA necesitan de ciertas condiciones óptimas para su desarrollo. En los estudios realizados por Wang *et al.* (2017); Yao, Zhang, Wang y Zhang (2017); Adebimpe, Edem y Ayodele (2020) observaron que la producción de biogás con residuos agropecuarios mejoró, cuando el pH inicial fue de 7 - 7.5 a temperatura mesofílica, y por el contrario cuando el pH inicial era ácido (5.5 - 6) la producción de metano era menor (Parra *et al.*, 2014).

2.3.3. Inhibidores

El principal inhibidor de la digestión anaerobia es el oxígeno, puesto que, los microorganismos metanogénicos se encuentran dentro de los anaerobios más estrictos, ya que si se filtra 0.01 ppm de oxígeno inhibe completamente su crecimiento. Además, el NH₃ libre, los ácidos grasos, el sulfuro de hidrogeno, los iones de metales ligeros como el sodio, potasio, calcio y magnesio, son buenos para el crecimiento de microorganismos; sin embargo, cantidades excesivas pueden retardar su crecimiento e incluso causar la inhibición (Valdez, 2016).

2.3.4. Ácidos grasos volátiles

El pH es muy importante para la regulación de los AGV en la DA. Los AGV son ácidos grasos de cadena corta (ácido acético, ácido propiónico, ácido butírico y ácido valérico), y a su vez, son los principales productos intermedios producidos a partir de la DA de los residuos pecuarios (Zhang *et al.*, 2014). Así mismo, Marchetti y Vasmara (2019) sostienen que existe una mayor producción de AGV cuando el pH inicial es neutro (7), puesto que, cuando el pH inicial es ácido (6.5) o alcalino (8.0 y 8.5) los valores de AGV fueron menos favorables.

Por otro lado, cuando las concentraciones de AGV caen en el rango de 5800 a 6900 mg/L, la producción de metano se inhibe por completo (Xu *et al.*, 2014; Shi *et al.*, 2018).

2.3.5. Carbono y nitrógeno

Según (Yao, Zhang, Wang y Zhang, 2017), la relación carbono y nitrógeno es un parámetro importante para el rendimiento de biogás en la digestión anaerobia, esto se refuerza según Dioha, Ikeme, Nafi'u, Soba, y M.B.S, (2013); Wang *et al.*, (2017), donde indican que, la relación óptima de C/N es de 25 y 30, puesto que, incrementan el contenido de metano. La relación de 25 tuvo aproximadamente un 47.8% más de producción de biogás y un 60.6% más de rendimiento de metano en la fermentación.

Las pruebas con relaciones más bajas de C/N tuvieron acumulación de amoníaco y valores de pH más altos, que eran tóxicos para las bacterias metanogénicas. Por el contrario, el nitrógeno fue consumido rápidamente por los metanógenos en condiciones de alta relación carbono y nitrógeno, y el valor del pH fue menor que la demanda óptima del sistema de digestión anaerobia (Wang, Yang, Feng, Ren, y Han, 2012). Cabe mencionar que con el aumento de la relación C/N, el rendimiento del biogás también aumenta (Wang *et al.*, 2017).

2.3.6. Tasa de Carga Orgánica

Es la cantidad de materia orgánica que se agrega cada día al digestor, este parámetro está estrechamente relacionado con el tiempo de retención hidráulica, si la TCO en el reactor de digestión anaerobia es demasiado alta, las vías de metanogénesis se

inhiben, lo que puede dar como resultado la acumulación de AGV en el reactor, por lo tanto, una caída en la producción de biogás (Orhororo, Okechukwuby Ejuvwedia, 2018), y este resultado se puede comprobar en la investigación realizada por Bi, *et al.* (2019), en donde se concluyó que una alta tasa de carga orgánica condujo a una alta concentración de ácidos grasos volátiles, que afectó negativamente a la actividad metanogénica específica, mientras que en condiciones mesofílicas los ácidos grasos volátiles fueron más bajos y la actividad metanogénica específica no se vio afectada.

2.3.7. Tiempo de Retención Hidráulica

Es la duración del proceso de digestión anaerobia, es decir el tiempo que requieren las bacterias para digerir la materia orgánica y producir biogás (Bautista y Aznar, 2010). Por ende, es necesario tener en cuenta el TRH de acuerdo a la región y la temperatura que ésta tenga (Herrero, 2008), la cual se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1

TRH en diferentes condiciones climáticas

Características	Tiempo de retención hidráulica (días)	Temperatura
Clima tropical con regiones planas (Indonesia, Venezuela, América central)	30-40	30
Regiones cálidas con inviernos fríos cortos (India, Filipinas, Etiopía)	40-60	20
Clima temperado con inviernos fríos (China, Corea, Turquía)	60-90	18
Altiplano (Perú, Bolivia)	60-100	12

Fuente: Varnero, 2011; Herrero, 2008.

2.4. Factores que mejoran el proceso de la DA

2.4.1. Pre tratamientos físicos

Son usados cuando existen problemas referidos con la baja degradación de los sustratos, bajo rendimiento de metano, inestabilidad de los pasos o procesos de la degradación anaeróbica, en estos casos, estas condiciones pueden ser mejoradas utilizando tratamientos físicos-mecánicos, como: molinado, homogenización a alta presión, térmicos y ultrasónicos. La aplicación de pre-tratamientos físicos puede incrementar el rango de la hidrólisis e incrementar la degradabilidad anaeróbica de los sustratos (Dana, 2010).

2.4.2. Pre tratamientos mecánicos

Estos están dirigidos a reducir las dimensiones de los sustratos, facilitando la degradación de estos compuestos complejos a simples en cada etapa, así mismo, ayuda a mejorar la velocidad y eficiencia de la hidrólisis. Los métodos que se utilizan en este pre tratamiento, suelen ser, procesos de separación, reducción de tamaño y compactación del sustrato (REN21, 2017).

2.5. Tipos de digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia se puede clasificar como digestión líquida, húmeda o seca según la concentración total de sólidos presentes en los residuos.

2.5.1. Digestión líquida

Se produce mediante procesos y tecnologías desarrollados para tratar grandes cantidades de efluentes netamente líquidos, con porcentajes de sólidos que rara vez superan el 1% (FAO, 2019).

2.5.2. Digestión húmeda

Se considera digestión anaerobia húmeda cuando la concentración total de sólidos del desperdicio de alimentos es < 15%, así mismo, años atrás, en la década de los 80' la DA húmeda era el sistema más utilizado, cuya velocidad del proceso de digestión era de 25 a 60 días (Kothari, Pandey, Kumar, Tyagi y Tyagi, 2014).

2.5.3. Digestión seca

Desde la posición de Kothari *et al.* (2014), se considera digestión anaerobia seca si la concentración total de los residuos sólidos se mantiene entre 20 y 40%. En la actualidad, los sistemas de DA se basan en un proceso seco, ya que la velocidad del

proceso de digestión es menor que la del proceso húmedo (14 a 60 días). Cabe mencionar, que el proceso seco tiene una mayor tasa de producción de biogás en comparación con el proceso húmedo.

2.6. Tipos de digestores

La siguiente clasificación está en base al periodo de alimentación:

2.6.1. Sistema discontinuo

También conocido como carga fija, ya que se realiza una sola carga en total y se tapa herméticamente por unos 20 o 50 días y luego se descarga cuando deja de producir biogás. El modelo tipo Batch o por lotes es el más conocido de este sistema (Schlaefli, 2010, como se citó en Salazar, Amusquivar, Llave y Rivasplata, 2012).

Los digestores por lotes tienen varios beneficios, como ser técnicamente simple y tener bajos costos de inversión y requisitos de mantenimiento y una mínima pérdida de energía parasitaria (Kothari *et al.*, 2014).



Figura 4. Digestor de carga en batch
Fuente: Moncayo Romero, 2013.

2.6.2. Sistema semicontinuo

Este tipo de sistemas son de pequeña o mediana escala, además, son usados en el ámbito urbano o rural y presentan buena eficiencia de producción de biogás diaria. Los modelos que destacan en este sistema son los biodigestores del tipo hindú, tipo chino y otro de menor costo que es el de tipo manga de polietileno (Schlaefli, 2010, como se citó en Salazar, Amusquivar, Llave y Rivasplata, 2012).



Figura 5. Biodigestor modelo manga de geo membrana.
Fuente: Salazar *et al.*, 2012.

2.6.3. Sistema continuo

Tiene un flujo constante de biomasa activa en su interior, se caracterizan por ser sistemas sofisticados de gran escala, donde se emplean equipos comerciales para alimentarlos, darles calefacción, agitación y control (Schlaefli, 2010, como se citó en Salazar, Amusquivar, Llave y Rivasplata, 2012).

En este sistema continuo, los residuos pecuarios son alimentados continuamente y se elimina la misma cantidad de digerido. No obstante, algunos estudios han informado que la recirculación de biogás o los agitadores mecánicos podrían usarse en el proceso continuo para agitar el sustrato y el inóculo continuamente (Deepanraj *et al.*, 2014; Kothari *et al.*, 2014). Así, la producción de biogás puede mantenerse casi constante o continuo debido a la entrada constante de sustratos (residuos pecuarios).

Por otro lado, de los tipos de biodigestores domésticos evaluados, el Biodigestor Continuo Tubular de Plástico (BCTP) es el que presenta más factibilidad, por ser el más económico y que menos dificultades presenta al momento de su instalación y

operación (Arrieta, 2016). Además, este tipo de biodigestores son ampliamente utilizados en países subdesarrollados, por ejemplo, se estima que en China e India, entre abril de 2010 y marzo de 2011, se construyeron 2.8 millones y 150 mil plantas de biogás, respectivamente, por lo que el número total de plantas alcanzó los 42.8 millones en China y 4.5 millones en India (Aslanzadeh, Rajendran, y Taherzadeh, 2012), además de estos países, en Asia se tiene a: Bangladesh, Nepal, Pakistán, Vietnam y otros; en países de África como: Etiopía, Tanzania y Ruanda; en Centroamérica: Nicaragua y Costa Rica; finalmente en Sudamérica: Colombia, Perú y Bolivia, se están utilizando este tipo de biodigestores de bajo costo, principalmente en zonas rurales (Arrieta, 2016).

2.7. Características del funcionamiento de un biodigestor

Tabla 2

Características de funcionamiento de un biodigestor en zonas cálidas y frías

Características de funcionamiento de un biodigestor en zonas cálidas y frías		
	Zonas cálidas	Zonas frías
Carga diaria	9 kg de excretas de vaca + 9-15 L de agua	20 kg de estiércol de vaca + 60 L de agua
Producción diaria de biogás	400 L/día	700-750 L/día
Tiempo de retención	45 días	75 días
Temperatura de trabajo	30 °C	10°C
Temperatura ambiente	20 – 45 °C	-12 a 20°C
pH de trabajo	5.2	5.5

Fuente: Forget, 2011; Fernández y Miranda, 2009.

En el cuadro se puede observar los resultados de los biodigestores de Bolivia (zona fría) que fueron diseñados para producir biogás, con tiempos largos de retención hidráulica, para poder obtener biogás por 3 horas en condiciones frías se requiere 20 kg de estiércol diariamente (Forget, 2011).

2.8. Biogás

2.8.1. Composición química

La FAO (2019) menciona que la composición química del biogás puede variar según el sustrato y la temperatura con la que se trabaja, sin embargo, existen algunos gases habituales que forman parte de este, los cuales son:

- Metano (CH₄), es un gas energéticamente interesante y el más importante del biogás (Arhoun, 2017); se encuentra con una concentración aproximadamente del 45%, a partir de éste se considera si el biogás es inflamable o no (Casanovas, Della, Reymundo y Serafini, 2019).
- Dióxido de carbono (CO₂), cuya concentración oscila en un rango del 25% a 45% molar.
- Sulfuro de hidrogeno (H₂S), es producido por los microorganismos anaeróbicos reductores de sulfato, este gas aún en bajas concentraciones es muy toxico y altamente corrosivo, en consecuencia, se debe eliminar del biogás para que no disminuya la vida útil de los equipos o reactores (Casanovas, Della, Reymundo y Serafini, 2019).
- Hidrogeno (H₂), generalmente su concentración es inferior a los 5 000 ppm.
- Nitrógeno gaseoso (N₂), en sistemas con biodigestores su concentración no supera el 5% molar.
- Oxígeno (O₂), tiene una concentración máxima de 5% molar (Casanovas, Della, Reymundo y Serafini, 2019).
- Agua (H₂O), se encuentra en forma de vapor, generalmente cuando se trabaja con un proceso termofílico (Casanovas, Della, Reymundo y Serafini, 2019).

2.8.2. Purificación del biogás

El biogás crudo no tiene ningún problema a la hora de su combustión, sin embargo, esto depende del uso que se le dé, puesto que para garantizar la vida útil de los reactores se deben eliminar las impurezas, como: el vapor de agua, sulfuro de hidrogeno y nitrógeno gaseoso (FAO, 2019).

2.8.3. Filtros y sistemas de purificación

- Eliminación de los vapores de agua: en los biodigestores domésticos, los condensados de agua se eliminan conduciendo la tubería del biogás a trampas de agua que se ubican en diferentes puntos. Por otro lado, en las instalaciones de las industrias se utilizan generalmente sistemas para secar el biogás antes de su uso, ya sea por comprensión o enfriamiento del gas, este último es el más utilizado por la facilidad en su operación y sus bajos costos (FAO, 2019).

- Eliminación del sulfuro de hidrógeno: es fundamental y puede realizarse de diferentes formas como: agregado de cloruro ferroso o férrico con la alimentación del biodigestor, agregado de oxígeno, filtros por adsorción, filtros por absorción y los filtros biológicos (FAO, 2019).
- Eliminación de dióxido de carbono: se elimina solo si el biogás será utilizado para suministrar en redes de distribución o para sustituir gas natural vehicular, de esta forma se eliminan la mayor cantidad de impurezas obteniendo el biometano, y las formas de remoción son: el lavado químico, lavado con agua bajo presión, adsorción a presión oscilante, lavado físico con disolventes orgánicos, separación con membranas y la separación criogénica (FAO, 2019).
- Eliminación de siloxanos: Pueden causar daños significativos a los motores, turbinas y calderas incluso en bajas concentraciones (< 0,5 ppm), los métodos que se usan para su eliminación son: la adsorción con solventes orgánicos, adsorción química, adsorción en materiales de sílice, separación criogénica y la adsorción en lechos regenerables, sin embargo, su supresión dependerá de factores como el tipo de siloxanos y la cantidad de humedad del biogás (FAO, 2019)

2.8.4. Características generales del biogás

Tabla 3

Características generales del biogás

Características generales del biogás	
Contenido energético	6,0 – 6,5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0,60 – 0,65 L petróleo/m ³ biogás
Temperatura de ignición	650 – 750°C
Olor	Huevo podrido (el biogás desulfurado es imperceptible para el olfato)

Fuente: Doublein y Steinhauser, 2008, como se citó en FAO, 2011.

2.8.5. Evaluación energética por sustratos

El único compuesto del biogás energéticamente interesante es el metano, cuando el biogás contiene metano superior al 45% se considera inflamable, además la producción de biogás es influida por el tipo de sustrato como se observa en la tabla 4.

Tabla 4

Evaluación energética por sustratos

Sustrato	ST (% de Kg de sustrato)	L de biogás por Kg de sustrato	%CH ₄
Estiércol de vacuno	7-10	9.7- 34.0	65
Estiércol de cerdo	5-7	11.6-28.4	65-70
Estiércol de gallinaza	18-32	44.6-172.6	60
Estiércol de ovino	25-30	28.8-105.8	63
Estiércol de caprino	2-4	50-250	63

Fuente: Forget, 2011; Barros *et al.*, 2017.

2.9. Impactos asociados a la digestión anaerobia

2.9.1. Impactos ambientales

El sector ganadero representa el 14,5% de las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) inducidas por el hombre, superando a las del transporte. Sin embargo, si se tienen en cuenta otros factores, la imagen se vuelve más favorable (Eisler *et al.*, 2014). La ganadería gestionada de forma sostenible puede aumentar la biodiversidad, preservar los servicios ecosistémicos y mejorar la captura de carbono por parte de las plantas y el suelo. Por ejemplo, una vaca produce hasta 70 kg de estiércol al día, proporcionando suficiente fertilizante en un año para una hectárea de trigo, equivalente a 128 kg de nitrógeno sintético que de otro modo podría derivar de combustibles fósiles (Eisler *et al.*, 2014), además, estos residuos se pueden reaprovechar dándole un tratamiento, y generando biogás.

2.9.2. Impactos sociales

Se estima que cerca de 2.7 billones de personas a nivel mundial no poseen tecnologías adecuadas para la cocción de alimentos; en Latinoamérica esta cifra se aproxima a los 65 millones de habitantes, así los sistemas de generación de biogás son una de las formas de energía que más ha aportado al abastecimiento de electricidad y calor a las comunidades más necesitadas

(REN21, 2017). A finales del 2015, se estimó que cerca de 700 000 biodigestores estaban al servicio de países en vías de desarrollo.

El principal beneficio social para los pobladores rurales es la reducción del tiempo en la recolección de biomasa orgánica sólida y la cocción de alimentos (Parra, Botero y Botero, 2019).

2.9.3. Impactos económicos

Eisler *et al.* (2014) mencionan que, la ganadería es considerada ampliamente insostenible. Sin embargo, en estos últimos años, se ha estado utilizando tecnologías para el aprovechamiento de los residuos pecuarios desarrollando así la economía circular, favoreciendo especialmente a zonas apartadas de la región (Núñez, 2012), donde podrían usar el biogás para cocinar o producir electricidad (Sandim, Batista, Baretta, Betini y Pepplow, 2019).

Por otro lado, el desarrollo de estas tecnologías deberían de formar parte de la estrategia de medianos y grandes empresarios para reducir el consumo energético en sus propias empresas, también podrían comercializar este producto (Núñez, 2012), por ejemplo, realizando la cogeneración simultánea de energía térmica y electricidad, y combustible de transporte (Furtado *et al.*, 2020; Bernardo *et al.*, 2019). También, el biometano es un producto valioso para los mercados de energía y combustible de transporte y puede incorporarse fácilmente a los sistemas de energía renovable (Lamb, 2020).

Por último, la producción de biogás, permite reutilizar los residuos pecuarios, por lo que, se estaría hablando de economía circular siendo esta una solución promisoriosa a largo plazo, para la gestión adecuada de los residuos pecuarios (Kapoor *et al.*, 2020). En este sentido, una economía circular de base biológica considera los desechos orgánicos y los residuos como recursos potenciales que pueden ser utilizados para suministrar productos químicos, nutrientes y combustibles que necesita la humanidad (Wainaina *et al.*, 2020).

3. Conclusiones

En conclusión, la digestión anaerobia aporta diferentes beneficios reduciendo el impacto ambiental de la actividad ganadera, al capturar el metano para emplearlo como combustible de cocina o iluminación en zonas rurales, siendo la producción de biogás una alternativa viable que aporta diferentes beneficios sociales, ambientales y económicos. La mayor capacidad de producción de biogás se da en zonas cálidas donde el valor asciende a los 900 l/día de biogás con tan solo 20 Kg de residuos pecuarios, por otro lado, en zonas frías la generación de biogás es entre 700 – 750 l/día aproximadamente, y esta producción se puede mejorar teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: el tipo de biodigestor, TRH, tipo de sustrato y el pH, por lo que, la temperatura no representa una limitación para la aplicación de este método.

Finalmente, se recomienda que se realicen más investigaciones sobre la digestión anaeróbica de los residuos pecuarios, con el fin de mejorar su proceso y diseño, para incrementar la eficiencia de esta alternativa.

4. Referencias

- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Soltanian, S., Ghanavati, H., & Dadak, A. (2019). Comprehensive exergoeconomic analysis of a municipal solid waste digestion plant equipped with a biogas genset. *ScienceDirect*, 485-486. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.029>
- Arhoun, B. (2017). Digestion y codigestion anaerobia de residuos agricolas, ganaderos y lodos de depuradora.
- Arrieta, W. (Junio de 2016). Diseñor en un biodigestor domestico para el aprovechamiento energetico del estiercol de ganado. *PIRHUA*. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2575/IME_200.pdf?sequence=1
- Barahona, M. F., & Salas, G. R. (2013). *Plan de manejo ambiental del area pecuaria y procesamiento de alimentos de la Carrera de ciencias agropecuarias_IASA I, hacienda el Prado*. Sangolquí.
- Bautista, A., & Aznar, A. (Octubre de 2010). Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos.
- Bi, S., Qiao, W., Xiong, L., Ricci, M., Adani, F., & Dong, R. (Agosto de 2019). Effects of organic loading rate on anaerobic digestion of chicken manure under mesophilic and thermophilic conditions. *Renewable Energy*, 139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.083>
- Bonilla, J. A., & Lemus, C. (Junio de 2012). Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. Revisión. *Scielo*, 3. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242012000200006
- Casanovas, G., Della, F., Reymundo, F., & Serafini, R. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. (A. Groba, Ed.) *FAO*. Obtenido de http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf
- Chavez, A., & Rodriguez, A. (2016). Aprovechamiento de residuos organicos agricolas y forestales en Iberoamerica. *Academia y Virtualidad*. doi:<https://doi.org/10.18359/ravi.2004>
- Dana, R. (2010). *Micro-Scale Biogas Production: A Beginners Guide*. Recuperado de: <https://attra.ncat.org/product/micro-scale-biogas-production-a-beginners-guide/>.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable resources: An Introduction. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA*.
- FAO. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile: FAO.
- FAO. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Buenos Aires: FAO.

- Fernandez, J., & Miranda, I. (2009). *Diseño y construcción de un biodigestor ecológico para generar biogas a partir de excreta de ganado vacuno en el tropico humedo*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Forget , A. (16 de Junio de 2011). Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares.
- Furtado, A., Previtali, D., Bassani , A., Italiano, C., Palella, A., Pino, L., . . . Manenti, F. (2020). Biogas beyond CHP: The HPC (heat, power & chemicals) process. *Energy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117820>
- Garcia, A. M., & Gomez, J. (04 de Noviembre de 2016). Evaluacion de la produccion de biogas a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogota mediante la digestion anaerobia.
- Gomez , A., Sanchez , J., & Matallana, G. (Diciembre de 2019). Resíduos urbanos, agrícolas e pecuários no contexto das biorrefinarias. *SciELO*. doi:<http://dx.doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9705>
- Gómez-Soto, J. A., Sánchez-Toro, Ó. J., & Matallana-Pérez, L. G. (2019). Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías. *Redalyc*. doi:<https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9705>
- Gonzales, E., Castillo, F., Correa, S. d., & Retto, C. (18 de Noviembre de 2017). Sistema de aprovechamiento de residuos organicos de ganado vacuno y su aplicacion en la agropecuaria campos de Chira E.I.R.L. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3223/PYT_Informe_Final_Proyecto_Biogas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Herrero, J. M. (2008). Biodigestores familiares guia de diseño y manual de instalacion; Biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para tropico, valle y altiplano. *GTZ*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/282156621_Biodigestores_familiares_Guia_de_diseno_y_manual_de_instalacion_2008
- Huerga , I. (2019). Residuos pecuarios. Actualidad de normativas y lineamientos para regulaciones provinciales. *INTA*. Obtenido de <https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-oliveros.residuos-pecuarios.actualidad-normativas-y-lineamientos-regulaciones-provinciales.pdf>
- IPCC. (2019). *Calentamiento global de 1,5°C*. Obtenido de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- Khanal, S. K. (2008). *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production Principles and Applications*. Iowa: Editorial Office. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=347701>
- Kothari, R., Pandey, A. K., Kumar, S., Tyagi, V. V., & Tyagi, S. K. (2014). *Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>
- Martí, J. (2010). Biodigestores de bajo costo para producir biogás y fertilizante natural a partir de residuos orgánicos. *International Center of Numerical Methods in Engineering*. Obtenido de <https://www.ideassonline.org/public/pdf/BrochureBiodigestoresESP.pdf>
- MINAGRI. (2017). *Diagnóstico de crianzas Priorizadas para el Plan Ganadero 2017 - 2021*. Lima. Cercado de Lima: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Montenegro, K. T., Rojas, A. S., Cabeza, I., & Hernandez, M. A. (Diciembre de 2016). Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. *SciELO*, 29 no.2. doi:<http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016002>
- Núñez, D. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Redalyc*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257024712012.pdf>
- Orhorhoro, E. K., Okechukwu, P., & Ejuvwedia, G. (Setiembre de 2018). Effect of Organic Loading Rate (OLR) on Biogas Yield Using a Single and Three-Stages Continuous Anaerobic Digestion Reactors. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 39. doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.39.147
- Parra, D. L., Botero , M. A., & Botero, J. M. (27 de Agosto de 2018). Livestock residual biomass: review of anaerobic digestion as a method of energy production and others byproducts. *Revista UIS Ingenierías* . doi:<https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019013>
- Parra, D., Botero, M., & Botero, J. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*. doi:<https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019013>
- Quinchia, Y. A., Perez , J., Doria, G. M., & Sanchez, Y. Y. (2017). Parametros de calidad de produccion de biogas a partir de pulpa de cafe. *Agricolae & Habitad*.
- Rajendran, K., Aslanzadeh, S., & Taherzadeh . (2012). Household Biogas Digesters—A Review. *Energies*. doi:10.3390/en5082911
- REN21. (2017). *Renewables 2017 Global Status Report*. REN21.
- Ruiz, R. C. (2017). Aprovechamiento del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal-Nariño para obtener energía renovable mediante digestión anaerobia.
- Salazar, J. L., Amusquivar, C., Llave , J. J., & Rivasplata, C. (2012). Producción de biogás y biol a partir de excretas de ganado: experiencias en la ciudad de Tacna. *XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente*. Obtenido de <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/6.pdf>
- Salazar, J., Amusquivar, C., Llave, J., & Rivasplata, C. (2012). *Producción de biogás y biol a partir de excretas de ganado: experiencias en la ciudad de Tacna*. XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente.
- Schlaefli, F. (2010). Tratamiento de residuos orgánicos del comedor universitario de la UNALM en un biodigestor semicontinuo para la producción de biogás y biol. *Universidad Nacional Agraria La Molina*.
- Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2003). Starch: composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*. doi:10.1016/j.jcs.2003.12.001
- Toor, M., Kumar, S. S., Malyan, S. K., Bishnoi, N. R., Mathimani, T., Rajendran, K., & Pugazhendhi, A. (2019). An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Chemosphere*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125080>

- Tufaner, F., & Avsar, Y. (9 de Julio de 2016). Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure:a review. *Springer*. doi:10.1007/s13762-016-1069-1
- Valdez , B. (2016). *Evaluacion de la calidad de biogas y biol producido en biodigestores usando excretas de animales del parque zoológico de Huachipa*. Lima. Obtenido de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2009/P06-V34-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wainaina, S., Kumar Awasthi, M., Sarsaiya, S., Chen, H., Singh, E., Kumar, A., . . . Taherzadeh , M. J. (2020). Resource Recovery and Circular Economy from Organic Solid Waste using Aerobic and Anaerobic Digestion Technologies. *Bioresource Technology*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>
- Wang, Y., Song, S., Sun, S., Chen, R., Huang, S., & Li, G. (2017). Effects of pH and temperature on biogas production using three kinds of animal dung. *Agricultural Science & Technology*.
- Yao, Y., Zhang, R., Wang, B., & Zhang, S. (2017). Modeling and optimization of anaerobic digestion of corn stover on biogas production: Initial pH and carbon to nitrogen ratio. *Energy Sources*. doi:10.1080/15567036.2017.1336821
- Zahariev, A., Penkov, D., & Aladjajjyan, A. (20 de Noviembre de 2013). Biogas from Animal Manure – Perspectives and Barriers in Bulgaria. *Annual Research & Review in Biology*, 4. doi:<https://doi.org/10.9734/ARRB/2014/6505>