



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE



TESIS

**PRODUCCIÓN DE METANO DE LA EXCRETA ANIMAL PARA EL
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN LA REGIÓN ALTOANDINA**

PRESENTADA POR:

VÍCTOR ROMÁN SALINAS

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2021



DEDICATORIA

Tesis dedicada a mis queridos progenitores Martín (†) y Juana (†). A Jilma Rosario y Emanuel, a mis hermanos y amigos. Gracias a todos.



AGRADECIMIENTOS

Al señor nuestro creador por darme la vida, salud y sabiduría para lograr el desarrollo exitoso de la tesis.

Quiero expresar mi gratitud a los fundadores del programa de doctorado de Ciencia Tecnología y medio ambiente (CTMA), a las autoridades que conducen y a todos los docentes que imparten su experiencia académica para el desarrollo de la ciencia y la tecnología en la prestigiosa Universidad Nacional Altiplano de Puno.

A PhD. Bernardo Roque Huanca, asesor de la tesis, por su apoyo incesante que ha permitido la conclusión del trabajo.

A los Doctores integrantes de jurado dictaminador, quienes contribuyeron con sus sugerencias para mejorar el proyecto y la tesis.

Finalmente, agradezco a todos mis familiares, amigos y colegas docentes del departamento académico de Ciencias Físico Matemáticas, por brindarme su apoyo y amistad desinteresada.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico	3
1.1.1. Gas metano	3
1.1.2. Metano de origen natural	4
1.1.3. Metano de origen antropogénico	4
1.1.4. Principales impactos ambientales que producen las excretas de animales domésticos por emanación del metano	5
1.1.5. Tecnología de la digestión anaeróbica	6
1.1.6. Procesos de la biomasa	6
1.1.7. Digestión anaeróbica	7
1.1.8. Biogás	8
1.1.9. Biosol	10
1.1.10. Biol	10
1.1.11. Etapas del proceso anaerobio	10
1.1.12. Influencia de parámetros ambientales y control del proceso	12
1.1.13. La temperatura	13
1.1.14. El pH	14
1.1.15. Tiempo de retención	14
1.1.16. Biodigestores y su clasificación	15
1.1.17. Biodigestor sistema batch o discontinuo	16
1.1.18. Ventajas de los biodigestores	17
1.1.19. Sustancias inhibitoras de la reacción	17
	iii



1.1.20. Sistema de agitación	18
1.1.21. Beneficios ambientales y económicos de los pobladores de la zona con la tecnología de digestión anaerobia con desarrollo sostenible	19
1.1.22. Invernadero	20
1.2. Antecedentes	22

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema	33
2.2. Enunciados del problema	34
2.2.1. Pregunta General	35
2.2.2. Preguntas específicas	35
2.3. Justificación	35
2.4. Objetivos	37
2.4.1. Objetivo General	37
2.4.2. Objetivos Específicos	37
2.5. Hipótesis	38
2.5.1. Hipótesis General	38
2.5.2. Hipótesis Específica	38

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio	39
3.1.1. Material biológico	39
3.2. Población	40
3.3. Muestra	41
3.3.1. Construcción del invernadero	42
3.3.2. Construcción del biodigestor discontinuo sistema Batch	46
3.4. Método de investigación	48
3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	49
3.5.1. Producción de metano	49
3.5.2. Parámetros fundamentales que influyen en la producción de metano: pH y temperatura de fermentación	51
3.5.3. Beneficios que genera la tecnología de digestión anaerobia	51
3.5.4. Balance de masa	53
3.5.5. Características del efluente	53



3.5.6. Equipos e instrumentos	54
3.5.7. Prueba estadística inferencial	55
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1 Producción de metano	59
4.1.1. Cuantificación de la producción de metano	60
4.2. Parámetros que influyen en la producción de metano	66
4.2.1. Potencial de hidrogeno (pH)	66
4.2.2. Temperatura de trabajo	67
4.2.3. Relación ente Carbono Nitrógeno (C/N)	69
4.3. Rentabilidad ambiental y económica que genera la tecnología de digestión anaeróbica	69
4.3.1. Beneficios ambientales	69
4.3.2. Beneficios económicos	72
CONCLUSIONES	76
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	91

Puno, 09 de noviembre de 2021

ÁREA: Ciencias de la ingeniería.

TEMA: Producción de metano de la excreta animal.

LÍNEA: Recursos Naturales y Medio Ambiente.



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Características generales del biogás	9
2. Compuestos inorgánicos inhibitorios del proceso anaeróbico	18
3. Producción diaria de excreta fresca por cada 100 kg de peso del animal.	27
4. Condiciones meteorológicas del lugar de estudio	40
5. Características de la sustancia afluyente.	42
6. Dimensiones de la estructura sólida del invernadero.	45
7. Materiales para la construcción de estructura sólida.	45
8. Materiales para el techo del invernadero.	45
9. Materiales para el aislamiento térmico.	46
10. Dimensiones del biodigestor sistema batch.	46
11. Materiales para la construcción del biodigestor.	48
12. Proceso del experimento.	49
13. La medición de las propiedades físicas y químicas.	55
14. Resultados de la digestión anaeróbica.	58
15. Valores de metano (CH ₄) y dióxido de carbono CO ₂ , a los 30 días del proceso	58
16. Características físico-químicas de la sustancia afluyente y efluente.	58
17. Variación promedio de ph y temperatura de trabajo (T _{diges}).	59
18. Características de afluyente y efluente del substrato en el biodigestor	60
19. Contenido de carbono en el substrato	61
20. Características generales del biogás obtenido	64
21. Razón de metano y bióxido de carbono (CH ₄ /CO ₂).	64
22. Variación promedio de pH.	66
23. Temperatura de trabajo (T _{diges}).	68
24. Cantidad de bovino que produce excreta y biogás en la región altoandina.	73
25. Rentabilidad económica de biogás comparado con la energía eléctrica.	73



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Procesos de la Biomasa.	7
2. Procesos de descomposición de los Residuos Sólidos Orgánicos	12
3. Tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos.	14
4. Biodigestor sistema Batch.	16
5. Invernadero diseñado y construido por Juan J. Estrada Paredes para FAO.	22
6. Fotografía de establo de abastecimiento de excreta de bovino	40
7. Fotografía de mezcla de excreta ganado de vacuno con agua.	42
8. Estructura sólida y fotografía del invernadero.	44
9. Fotografía del invernadero cubierto con plástico Agrotel transparente.	44
10. Biodigestor y sus componentes.	47
11. Biogás obtenido de excreta vacuno.	50
12. Diagrama de balance de materia	53
13. Fotografía de instrumento de medición (SPARK PS-2008 y sensores).	55
14. Producción de metano	57
15. Fotografía de combustión del biogás.	59
16. Concentración de CH ₄ y CO ₂ , a los 30 días del proceso.	60
17. Variación de pH durante el proceso de digestión anaerobia.	66
18. Temperatura promedio en el interior del biodigestor.	68
19. Temperaturas (T _{diges}) e invernadero (T _{inv}) durante 24 horas.	68



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Tabla de producción de biogás en 3 biodigestores sistema batch.	91
2. Temperatura, pH, y producción de metano (CH_4) y bióxido de carbono (CO_2)	91
3. Cálculo de contenido de metano en el biogás mediante balance de materia.	92
4. Tabla para calcular el poder calórico de metano	94
5. Temperatura en el interior del biodigestor durante el proceso.	94
6. Temperatura en el interior del invernadero.	102
7. Rentabilidad económica del uso de metano de la excreta de ganado vacuno	104
8. Preparación del substrato afluente.	105
9. Biodigestor y sus componentes.	106
10. Producción del biogás acumulado para cada biodigestor en 45 días.	108
11. Producción del biogás para cada biodigestor en 45 días.	108
12. Documentos.	109

RESUMEN

La excreta fecal del ganado puede ser perjudicial para el medio ambiente si no se tiene un manejo adecuado. El trabajo tuvo como objetivo determinar la producción de metano (CH_4) a partir de la excreta de ganado vacuno, como fuente alternativa de energía para uso doméstico. El método consistió en someter 8,9 kg de excreta fresca a digestión anaeróbica en biodigestor discontinuo, durante 45 días. Los resultados indican que la fermentación desarrolla a una temperatura de $31,20 \pm 0,49$ °C y un pH de $6,98 \pm 0,17$; la relación entre la producción de biogás y el tiempo de fermentación fue alta ($R^2 = 0,985$) y significativa ($p < 0,05$), obteniéndose $184,87 \pm 1,09$ L de biogás, con un contenido de $62,07 \pm 1,24$ % de CH_4 , $31,05 \pm 0,53$ % de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases menores, y 32,05 L de sustancia líquida como efluente (biol + biosol), con una demanda química de oxígeno (DQO) reducida en 74% con respecto al afluente. El biogás obtenido tuvo un contenido energético de $3,466$ Mcal/m³. A partir de los resultados se concluye que la fermentación anaeróbica de la excreta fecal de ganado vacuno puede ser una alternativa para la obtención de biogás de uso doméstico y biol como bioabono para la agricultura.

Palabras clave: bioabono, biodigestor, biogás, biol, excreta, metano.



ABSTRACT

Livestock fecal excreta can be harmful to the environment if not properly managed. The research objective was to determine the production of methane (CH₄) from the excreta of cattle, as an alternative source of energy for domestic use. The method consisted of subjecting 8.9 kg of fresh excreta to anaerobic digestion in a batch biodigester for 45 days. The results indicate that the fermentation develops a temperature of 31.20 ± 0.49 °C and a pH of 6.98 ± 0.17 ; the relationship between biogas production and fermentation time was high ($R^2 = 0.985$) and significant ($p < 0.05$), obtaining 184.87 ± 1.09 L of biogas, with a content of $62.07 \pm 1.24\%$ of CH₄, $31.05 \pm 0.53\%$ of carbon dioxide (CO₂) and other minor gases, and 32.05 L of liquid substance as effluent (biol + biosol), with a chemical oxygen demand (COD) reduced by 74% with respect to the influent. The biogas obtained had an energy content of 3,466 Mcal/m³. From the results it is concluded that the anaerobic fermentation of cattle fresh excreta can be an alternative to obtain biogas for domestic use and biol as biofertilizer for agriculture.

Keywords: biofertilizer, biodigester, biogas, biol, methane, waste.

INTRODUCCIÓN

La contaminación fecal de origen ganadero constituye en uno de los problemas ambientales emergentes más importantes, puesto que su deficiente manejo puede conducir a la contaminación del suelo, el agua y del aire con gases de efecto invernadero, por emisión de metano y óxido nitroso (Chadwick *et al.*, 2018). Así mismo, el ingreso de excretas al suelo, el agua y los alimentos puede conducir a la contaminación con bacterias, como *Escherichia coli* (Ercumen *et al.*, 2017), por lo que es necesario mejorar las prácticas de gestión del manejo ganadero, como estrategia para mitigar los efectos de la contaminación ambiental (Grossi *et al.*, 2019).

Las excretas del ganado son los desechos agrícolas ampliamente distribuidos en el mundo, con una producción que varía según la especie y región. La ganadería que domina el planeta tierra son: caprino, ovino y bovino en África, vacuno, ovino y camélido en América del Sur, y el de todos los tipos en Asia (FAO, 2018), con un alto contenido de materia orgánica en forma de lignocelulosa, cuya descomposición genera gases de efecto invernadero con impacto al cambio climático y la salud pública individual y colectiva debido al incremento de la morbilidad y mortalidad (Manisalidis *et al.*, 2020).

La lignocelulosa es el recurso orgánico más abundante en los residuos de las actividades agrícolas, forestales, municipales y otras, así como en las excretas de ganado rumiante alimentado con pastos y forrajes (Yan *et al.*, 2018), la misma que está conformada por tres tipos de polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina, que mediante adecuado procesamiento en ambiente controlado en unidades centrales de digestión anaeróbica, podría producir cantidades significativas de gas metano para el suministro de energía (Zheng *et al.*, 2014; Díaz-Vázquez *et al.*, 2020); sin embargo, no está establecido su viabilidad técnica y económica para la región altoandina, donde coexisten el frío y la baja presión atmosférica (West, 1993).

La región altoandina se caracteriza por su ubicación en altitudes que superan los 3825 m, donde la presión atmosférica representa solo el 62 % de la del nivel del mar (471,8 vs. 760 mm Hg, respectivamente); la temperatura y la disponibilidad de oxígeno son también relativamente menores, las mismas que condicionan el comportamiento de los gases (Shi *et al.*, 2018), así como los procesos biológicos fermentativos que ocurren a nivel de rumen, como los observados en el yak (*Bos grunniens*) criado a 4700 m, donde la capacidad de fermentación microbiana de la hierba fue más fuerte, con relación al yak

criado a 2800 m, mejorando su capacidad para utilizar el pasto en respuesta a su elevado requerimiento de energía (Fan *et al.*, 2020).

La energía es el elemento esencial para la actividad humana en el mundo, puesto que constituye el corazón del desarrollo humano y aumenta la productividad al acelerar la mejora social, sería imposible alcanzar los objetivos del desarrollo social y económico sostenible, sin garantizar y acceder a una energía limpia, fiable y asequible (Sasmaz *et al.*, 2020). La energía influye en las tres dimensiones del desarrollo humano: vida larga y saludable, educación y nivel de vida, lo que requiere centrarse en obtener fuentes de energía limpia y renovable, mejorando su eficiencia de uso y reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero que provienen directamente de su uso (Amer, 2020).

La producción de energía es un asunto que ha atraído la atención de los investigadores en los últimos años, debido a que los recursos energéticos disponibles son agotables y dañan el medio ambiente de diversas formas, por lo que es necesario investigar las fuentes alternativas de energías renovables y limpias, a partir de recursos renovables (Gielen *et al.*, 2019). Los residuos ganaderos, tales como el estiércol de cerdo (Konrad *et al.*, 2014), aves (Baltrénas *et al.*, 2019), llamas (Alvarez *et al.*, 2006) y vacunos (Matos *et al.*, 2017) constituyen recursos orgánicos potenciales, que con un debido tratamiento podrían utilizarse como materias primas para la producción de energía como biogás.

El trabajo tuvo como objetivo realizar el tratamiento de las excretas de ganado, mediante la digestión anaeróbica en unidades de fermentación para la obtención de metano como biogás para el aprovechamiento energético renovable, así como la producción de abono orgánico para la agricultura en la región altoandina, especialmente de la región de Puno. El informe se ha organizado en conformidad al formato y estilo de tesis de la Escuela de Posgrado, en cuatro capítulos que, previa a una sucinta introducción, incluye la revisión de la literatura sobre el tema, con énfasis en el marco teórico y los antecedentes, los materiales y métodos, y los resultados y discusión. Las citas y referencias fueron organizadas con el gestor bibliográfico Mendeley.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico

1.1.1. Gas metano

Fernández (2004) afirma que el **metano** es el hidrocarburo alcano más sencillo, cuya fórmula química es CH_4 , es incoloro, inodoro, insoluble en el agua y no polar que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias. Se origina fundamentalmente de la descomposición anaerobia de la materia orgánica en los sistemas biológicos (procesos agrícolas, cultivo de arroz, fermentación entérica en los animales y desechos orgánicos en general), tiene un tiempo de vida de 12 años y es eliminado de la atmósfera por reacciones químicas.

Por otro lado, FAO (2011) menciona que el metano (CH_4) fue descubierto y aislado por el físico italiano Alessandro Volta entre 1776-1778, como el gas inflamable en las burbujas que emergían de los pantanos del lago Maggiore. El metano alcanzó una especial importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles. Finalizada la guerra y debido a la fácil disponibilidad de combustibles fósiles, la mayoría de las instalaciones fueron cesando en su funcionamiento. Sin embargo, en las décadas 60 y 70 en los países asiáticos como India y China se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir de estiércol bovino con el doble propósito del aprovechamiento energético y la obtención de un biofertilizante.

1.1.2. Metano de origen natural

El metano se origina en forma natural a través de la producción metabólica, a partir del dióxido de carbono y del hidrógeno, generada por las bacterias anaerobias que descomponen la materia de origen vegetal, por ello, el metano se encuentra en las charcas formadas en el suelo y en el tracto digestivo de los rumiantes como las vacas.

Bonilla y Lemus (2012) resaltan que la producción de metano (CH_4) por los rumiantes se deriva de manera natural del proceso digestivo, el cual constituye una pérdida de energía y contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que han aumentado las investigaciones a fin de reducir la metanogénesis ruminal para mitigar las emisiones de CH_4 generadas por el ganado que contribuyen al calentamiento global y en el cambio climático.

1.1.3. Metano de origen antropogénico

Höglund-Isaksson *et al.* (2020) aseveran, que el metano es el segundo gas de efecto invernadero más importante, después del dióxido de carbono, que contribuye al calentamiento global provocado por el hombre, para controlar las emisiones de este gas, requiere soluciones técnicas como los cambios de dieta humana que reducen el consumo de leche y carne.

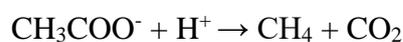
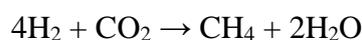
Carmona *et al.* (2005) indican que la agricultura y la producción pecuaria contribuyen ampliamente a las emisiones antropogénicas de metano (CH_4), el aumento de las concentraciones este gas, provoca el calentamiento de la superficie terrestre y la destrucción de la capa de ozono en la estratósfera. Hoy en día las concentraciones de metano son inferiores a las de CO_2 , sin embargo, se está incrementando rápidamente y además posee un efecto 21-30 veces más contaminante con respecto al CO_2 , cerca de 500 millones de toneladas métricas/año de metano ingresan a la atmósfera debido a actividades antropogénicas y fenómenos naturales

Así mismo, Kebreab *et al.* (2006) mencionan que las emisiones de gases de efecto invernadero del sector agrícola, relacionados con la producción animal, comprenden el metano (CH_4) emitido directamente de animales domésticos por la

excreta y tierras de pastoreo, y N₂O por los suelos después de aplicación del estiércol.

Knapp *et al.* (2014) atestiguan que, las fuentes antropogénicas representan aproximadamente el 58% de las emisiones globales totales de CH₄, la conversión de los bosques o pastos naturales en cultivos anuales y combinados con la agricultura existente, representa del 14 al 22% de las emisiones antropógenas globales de GEI. Aproximadamente el 37% de los CH₄ y N₂O agrícolas globales provienen de emisiones directas de animales y estiércol, y el resto está asociado con el cultivo y la deforestación

Por último, Carmona *et al.* (2005) afirman que, el metano es producido por los microorganismos metanógenos “archaeas”, un grupo microbial filogenéticamente distinto de las eubacterias (verdaderas bacterias), las Archaeas no tienen polímeros de peptidoglicanos en su pared celular y los lípidos intracelulares son diferentes en composición. La producción de metano en la naturaleza se da principalmente por dos vías:



En la primera vía es la producción de metano en el rumen, debido a que requiere menos tiempo para la generación de las poblaciones y segunda vía, denominada acetilclástica, los tiempos de generación para las poblaciones metanógenas son mayores.

1.1.4. Principales impactos ambientales que producen las excretas de animales domésticos por emanación del metano

Se ha investigado para cuantificar la evolución de las emisiones de CH₄ del ganado rumiante como contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Los resultados indican que la contribución a las emisiones totales de metano durante los años 1890-2014 en las regiones en desarrollo (África, Asia y América Latina) había aumentado del 51,7% en la década de 1890 y al 72,5% en la de 2010, debido al incremento en el número de ganado hasta en un 121%, lo que indican que los aumentos futuros en la producción ganadera,

probablemente contribuirían a mayores emisiones de CH₄ a menos que se implementen estrategias efectivas para mitigar las emisiones de GEI en el sistema ganadero (Shree *et al.*, 2016).

Los bovinos poseen un sistema digestivo que tiene la capacidad de aprovechar y convertir material fibroso con altos contenidos de carbohidratos estructurales en alimentos de alta calidad nutritiva. El metano se origina a partir de procesos de fermentación microbiana anaeróbica en el tracto gastrointestinal de animales rumiantes. En una vaca adulta, el rumen ocupa un volumen de más de 100 L, de los cuales generalmente 85 a 90% es fluido, el alto contenido de humedad y una temperatura casi constante de alrededor de 37 °C, favorece la sobrevivencia y crecimiento de los microbios. La alimentación ingerida por un rumiante es atacada por los microbios y degradada en una amplia gama de productos finales (Tamminga *et al.*, 2007).

1.1.5. Tecnología de la digestión anaeróbica

La tecnología de digestión anaeróbica es un tratamiento ecológico de residuos sólidos, con el fin de aprovechar del potencial de biomasa presente en ellos para producir biogás.

El uso de esta tecnología es de bajo costo, para lograr la gestión ecológica de residuos agroindustriales y fecales de los bovinos como biomasa orgánica para producir biogás. Los diseños utilizados para digestión anaerobia son los biodigestores, que se clasifican en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor. El biodigestor o reactor más simple y más utilizado para tratar residuos sólidos es el de mezcla completa.

1.1.6. Procesos de la biomasa

La biomasa se transforma en combustible, energía calorífica o energía eléctrica, que son utilizadas como una energía útil en cada caso. El tratamiento adecuado de la biomasa, se estructura de acuerdo el esquema que se representa en la Figura 1.

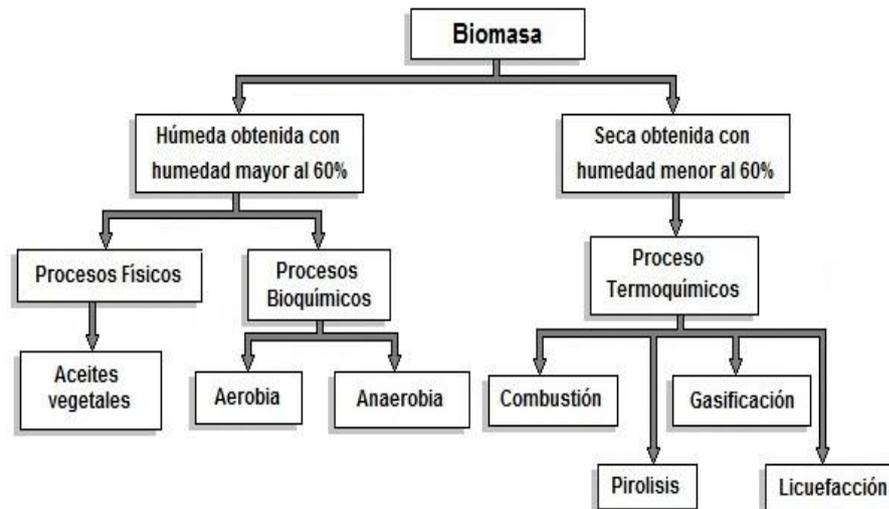


Figura 1. Procesos de la Biomasa.

1.1.7. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica (ausencia de oxígeno) es un proceso biológico complejo y degradativo, en donde parte de la materia orgánica de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, compuesto de CO_2 y CH_4 en mayor porcentaje y trazas de otros elementos (Parra, 2015), por un grupo microorganismos metanogénicos sensibles a la presencia del oxígeno. Mediante este proceso es posible convertir de los residuos vegetales, estiércoles, efluentes de las industrias alimentarias, papeleras y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles.

Durante la digestión anaeróbica de la biomasa, mediante una serie de reacciones bioquímicas, se genera el biogás compuesto principalmente por metano (CH_4) entre (50 – 70%) y dióxido de carbono (CO_2) entre (30 - 40%), el cual puede ser capturado y utilizado como combustible y/o electricidad (Reyes, 2017). De esta forma, la digestión anaeróbica es uno de los métodos más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero, mediante el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos, el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados (IDAE y Energía, 2007).

En el proceso anaeróbico, la materia orgánica actúa como dador y receptor de electrones, el sustrato es parcialmente oxidado implicando que sólo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato se conserva, se conoce como **fermentación anaerobia**, cuando la materia orgánica es catabolizada en ausencia

de un aceptor de electrones externos, mediante microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción, bajo condiciones de oscuridad y **respiración anaeróbica** cuando la materia orgánica es sometida a un proceso biológico de óxido-reducción de monosacáridos y otros compuestos en el que el aceptor terminal de electrones es una molécula inorgánica distinta del oxígeno y raramente una molécula orgánica. La respiración anaeróbica requiere aceptores de electrones externos para la disposición de los electrones liberados durante la degradación de la materia orgánica, la energía liberada en respiración anaeróbica es mucho mayor a la que se produce durante la fermentación anaeróbica (FAO, 2011).

1.1.8. Biogás

Es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, mediante reacciones de biodegradación de la materia orgánica, por la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de oxígeno (ambiente anaeróbico), el biogás está constituida principalmente por metano (CH_4) en una proporción que oscila entre un 55% a 70%, y dióxido carbono (CO_2) en 30 a 45%, y en pequeñas proporciones de otros gases como nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Roubík y Mazancová, 2020). El biogás tiene como promedio un poder calorífico entre 18,8 y 23,4 MJ/m^3 , que puede ser utilizada para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas; así como en hornos, estufas, secadores, calderas u otros sistemas de combustión a gas, debidamente adaptados para tal efecto (Deublein y Steinhauser, 2008). En la siguiente tabla 1, se representa características generales del biogás.

Tabla 1

Características Generales del Biogás

Composición	(55 – 70) % (CH₄), (30 – 45) % (CO₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	(6,0 – 6,5) kW h/ m ³
Equivalente de combustible	0,60 – 0,65 L de petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	(6 – 12) % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	(650 – 750°) C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	(74 – 88) atm
Temperatura crítica	-82,5°C
Densidad normal	1,2 kg /m ³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16,043 kg /kmol

Fuente: (Deublein y Steinhäuser, 2008).

La composición de biogás depende del tipo de materia prima, de la temperatura, presión y pH en el interior del tanque de reacción. Una composición aproximada de biogás incluye, metano (CH₄) entre 50 a 70%, bióxido de carbono (CO₂) entre 30 a 40%, hidrogeno (H₂) 5 a 10%, nitrógeno (N₂) de (1 a 2%, agua 0,3% y trazas de H₂S (Mamun *et al.*, 2016).

Los alimentos principales de las bacterias anaeróbicas son, el carbono (forma de carbohidratos) y el nitrógeno (proteínas, nitratos, amoníaco, etc.). El carbono se utiliza para obtener energía y el nitrógeno para la construcción de las estructuras celulares, por lo que la relación apropiada entre el carbono y nitrógeno (C/N) debe ser entre 20 a 30. Si el nitrógeno es menor al necesario, la velocidad de producción del biogás disminuye; cuando está en exceso, se produce más amoníaco del requerido, el cual es tóxico e inhibidor del proceso; para la excreta de los bovinos la relación (C/N) recomendable promedio es de 25/1 (Varnero y Arellano, 1991).

Como resultado de la fermentación anaeróbica, se obtiene el sustrato efluente con alta calidad fertilizante compuesta de una parte líquida llamado biol y la parte

sólida biosol, dependiendo de las características de la sustancia a fermentar, se obtiene un fango saliente de aproximadamente de 85 a 90% del afluente, de esto, el 90% corresponde al biol y el 10% a biosol (Carhuancho *et al.*, 2012).

1.1.9. Biosol

Es la parte sólida del sustrato sometido a la fermentación anaeróbica en el biodigestor, dependiendo de la tecnología empleada, el biosol tratado puede alcanzar entre 25% a solo 10% de humedad, su composición depende de los residuos que se emplean para la digestión. En el caso se ganado vacuno, las características generales del biosol fresco son: 16% de agua, 60% sustancia orgánica seca, a pH promedio de 7,6 y tiene bajo contenido de nutrientes debido a que la excreta es un material ya digerido (Aparcana y Jansen, 2008).

1.1.10. Biol

Residuos orgánicos degradados que están mezclados en el agua, también constituye un fertilizante orgánico de buena calidad para cultivos agrícolas (INDAP, 2016).

El biol es la parte líquida del sustrato que se descarga de un digestor y se utiliza como abono foliar, fuente orgánica de Fitoregulador que permite promover actividades fisiológicas y estimula el desarrollo de las plantas; la dosificación apropiada es el 100% que corresponde a 2 litros de biol en 20 litros de agua y 50% que corresponde a 1 litro de biol en 20 litros de agua (Gómez *et al.*, 2006).

1.1.11. Etapas del proceso anaerobio

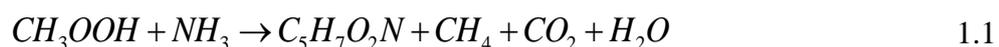
Los estudios bioquímicos y microbiológicos dividen el proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica en cuatro etapas, dentro de cada una de ellas existe una comunidad específica de microorganismos anaeróbicos o facultativos. Estas etapas en la que se llevan a cabo el proceso de digestión anaeróbica son: Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Martí, 2006).

- **Hidrólisis o licuefacción.** Etapa donde los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular, por lo que se consideran exoenzimas, por tanto, la

conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros. Esta etapa puede ser limitante del proceso de digestión anaerobia, debido a la lignocelulosa, hemicelulosa, celulosa y lignina son resistentes a la degradación anaerobia y su descomposición se produce de manera lenta e incompleta. Por lo tanto, la hidrólisis de estos compuestos puede llegar a demorar incluso semanas pero aumenta la velocidad con la temperatura (FAO, 2011)

- **Acidogénesis.** es un proceso microbiano anaeróbico donde los monosacáridos y aminoácidos se degradan a compuestos más simples, produciendo los ácidos grasos volátiles o de cadena corta, alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno, los principales ácidos son: acético, butírico, valérico y propiónico. Los factores más importantes para esta etapa son el nivel de pH en el digestato y la presión parcial de hidrógeno (Núñez, 2017).
- **Acetogénesis.** Conocido también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO₂ (Colomer *et al.*, 2019)
- **Metanogénesis.** Es la fase en donde se lleva a cabo la producción de metano y dióxido de carbono a partir de productos intermedios por microorganismos metanogénicos bajo condiciones anaeróbicas estrictas. En este proceso la reacción bioquímica es más lenta por lo que es un paso crítico en la totalidad del proceso de digestión anaeróbica (Parra, 2015).

En el proceso de metanogénesis, los ácidos orgánicos simples producidos en la etapa anterior, son transformados por la acción microbiana metanogénica en substratos para la descomposición, estabilización y producción de metano y anhídrido carbónico, tal como se muestra en la siguiente reacción (Esquivel, 1999).



Las archaeas metanogénicas, son las responsables de la formación de metano a partir de los sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unido por enlace covalente. La producción de metano se muestra en las siguientes reacciones.

- A partir de reactivos como el etanol y dióxido de carbono:



- A partir de la reacción de hidrógeno con el dióxido de carbono:



Las tres etapas del proceso ocurren simultáneamente dentro del sistema tal como se muestra en la siguiente figura 2.

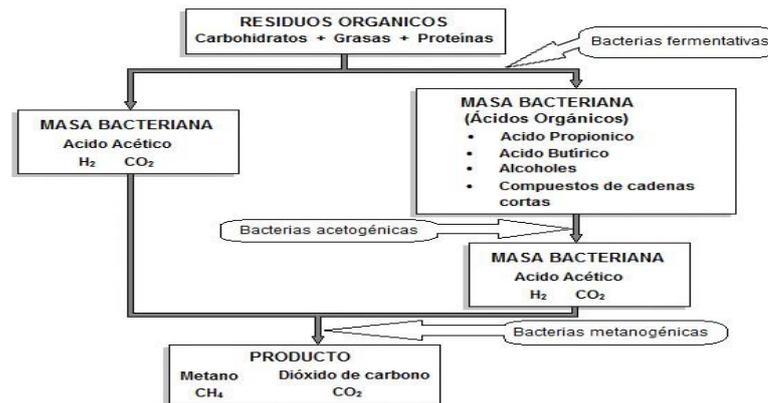


Figura 2. Procesos de descomposición de los Residuos Sólidos Orgánicos
Fuente: (Medina, 2001).

Desde una perspectiva de los países desarrollados y en desarrollo, la biotecnología anaeróbica contribuye a cumplir tres necesidades básicas: a) Mejorar las condiciones sanitarias mediante el control de la contaminación; b) generación de energías renovables para actividades domésticas; y c) suministrar materiales estabilizados como biofertilizante para los cultivos. Por lo tanto, la biotecnología anaeróbica juega papel importante en el control de la contaminación y la obtención de valiosos recursos: energía y productos con valor agregado (FAO, 2011).

1.1.12. Influencia de parámetros ambientales y control del proceso

En el proceso de la digestión anaeróbica, es necesario mantener las condiciones que permitan asegurar y optimizar su ciclo biológico de las bacterias que realizan el proceso de transformación. Para mantener un sistema de tratamiento anaeróbico que establezca eficazmente un residuo orgánico, todas las bacterias no metanogénicas y metanogénicas que intervienen en el proceso, deben mantener el estado de equilibrio dinámico, las sustancias que están dentro del biodigestor deben estar libres de oxígeno disuelto y de concentraciones inhibitorias de amoníaco libre y de constituyentes como metales pesados y sulfitos (Martí, 2006).

Los parámetros ambientales como condiciones del aseguramiento del proceso anaeróbico eficiente, son la temperatura de trabajo en rango propuesto (psicrofílico, mesofílico o termofílico), pH cercano a la neutralidad, tiempo de retención, tóxicos e inhibidores de concentración mínima posible y sistema de agitación para homogenizar la temperatura y transferencia de sustrato a cada población bacteriana y mantener concentraciones bajas de inhibidores (IDAE y Energía, 2007).

1.1.13. La temperatura

La temperatura afecta directamente en la proporción de crecimiento microbiano, las tasas más rápidas de reacción química y biológica se producen mayores a 30 °C, menores a 20 °C, las reacciones son más lentas y por debajo de 10 °C la digestión cesa completamente, los excrementos de bovinos compuestos de materia orgánica de difícil descomposición, requieren mínimo de 20 días de digestión (Paucar y Quispe, 2015), el incremento de la temperatura ocasiona la velocidad de crecimiento de los microorganismos y acelera el proceso generando mayor producción de biogás. Pero variaciones bruscas de temperatura en el digestor provoca desestabilización de proceso, por lo que es indispensable el sistema de agitación y control de la temperatura (FAO, 2011). Existen tres rangos de temperatura de trabajo para los microorganismos anaerobios, dependiendo del rango óptimo para su crecimiento son: Psicrofílicas: Temperatura < 25 °C, con un óptimo a 15 °C, Mesofílicas: 25 °C < Temperatura < 45 °C, con un óptimo a 35 °C y Termofílicas: 45 °C < Temperatura < 65 °C, con óptimo a 55 °C. En cada rango de temperatura óptima, alcanza la máxima actividad microbiana y en consecuencia la máxima eficacia depurativa para las características del proceso, por lo general requiere de menor energía a mayor temperatura y el proceso de digestión es más rápido (Martí, 2006). En la figura 3 muestran las temperaturas de operación del proceso.

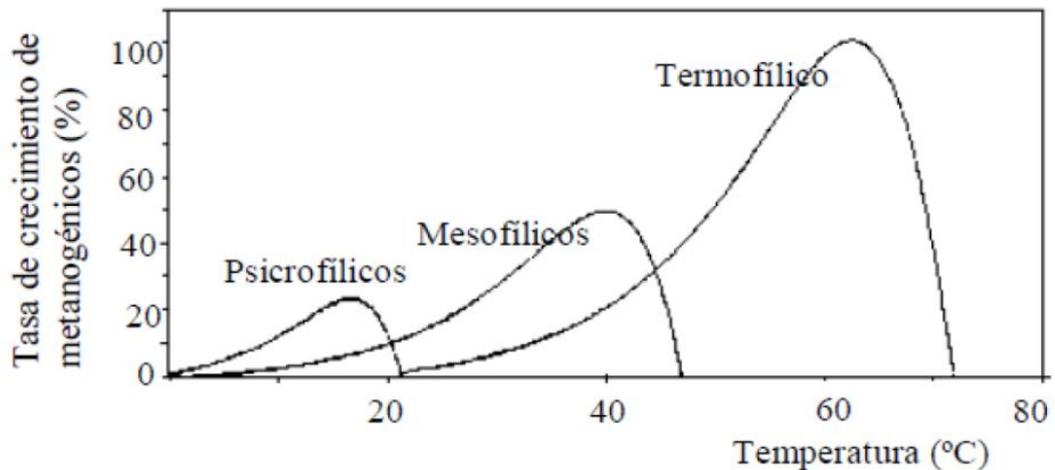


Figura 3. Tasa de crecimiento de los microorganismos metanogénicos.
Fuente: Speece (1996).

1.1.14. El pH

Los microorganismos anaeróbicos para el desarrollo satisfactorio del proceso, necesitan un pH en torno al valor neutral ideal que se encuentra en el rango de 6,6 hasta 7,6, si tiene valores inferiores a 6, el biogás generado es muy pobre en metano y tiene menores cualidades energéticas. En general, los valores bajos de pH reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando acumulación de ácido acético y H_2 , particularmente ácidos propiónico y butírico, el incremento de pH favorece a la formación de amoníaco, que en elevadas concentraciones es inhibidor del crecimiento microbiano (Energías Renovables no convencionales, 2012). Si el pH disminuye ya sea por aumento de carga repentino, presencia de materias tóxicas o cambios súbitos de temperatura, se puede corregir suspendiendo de alimentar carga durante un corto tiempo o adicionando sustancias alcalinas, y cuando el pH aumenta, se corrige agregando ácido acético para regular la biodigestión y disminución del pH (FAO, 2011).

1.1.15. Tiempo de retención

El tiempo de retención es la razón existente entre el volumen del biodigestor y la carga diaria de alimentación. En un digestor que opera a régimen estacionario o “discontinuo”, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga. Los tiempos de retención hidráulica (TRH) varían con la temperatura media de cada región y la variación diaria estacional de la siguiente

manera: En clima tropical con regiones planas es de 30 a 40 días, Regiones cálidas con inviernos fríos cortos de 40 a 60 días y en clima temperado con inviernos fríos de 60 a 90 días (FAO, 2011).

El tiempo de retención hidráulica (TRH), indica el tiempo medio de permanencia del sustrato en el biodigestor para producir una determinada cantidad de biogás, en rango psicrófilico se requieren valores de TRH mayores que en rangos mesofílico o termofílico, por lo tanto, para distintos procesos pueden ser muy variables como: Psicrófilico: de 50 a 120 días, Mesofílico: de 25 a 50 días y termofílico: de 15 a 25 días (FAO), 2019).

1.1.16. Biodigestores y su clasificación

Un biodigestor es una instalación, recipiente, reactor o contenedor que puede degradar la materia orgánica contenida en condiciones anaeróbicas, mediante las cuales se obtienen cantidades importantes de biogás y bioabono como aprovechamiento energético (Núñez, 2017).

En general los biodigestores son recipientes cerrados, donde los microorganismos estrictamente anaeróbicos, descomponen la materia orgánica, produciendo metano más otros gases y fertilizantes, disminuyendo el potencial contaminante de los excrementos. Un biodigestor o reactor, puede ser de distintos materiales como plástico, metal, ladrillo o de la combinación de ellos y adoptar formas diferentes como cilíndrica, rectangular u ovoide (Arrieta, 2016).

No se tiene una forma estandarizada de clasificar los biodigestores, en relación a su nivel de tecnológico, los biodigestores, se caracterizan como bajo, medio o alto, lo que se evalúa es la posibilidad de controlar el grado de mezclado, la temperatura del proceso, la automatización y los sistemas de medición de la operación. Independientemente de sus características, en todas las tecnologías de biodigestores, hay aproximadamente entre un 20% y un 50% de volumen libre para el biogás (FAO, 2019).

Los biodigestores según su operación de cargado se clasifican en sistema batch o discontinuo, Semi continuos y continuos (Colomer *et al.*, 2019).

1.1.17. Biodigestor sistema batch o discontinuo

Este tipo de digestor se carga con materia prima una sola vez toda su capacidad deseada y se descarga finalizada la producción del biogás, la figura 4 muestra el biodigestor sistema batch. Normalmente consiste en tanques herméticos con una salida de gas conectada a una bolsa flotante llamada gasómetro, en donde se almacena el biogás. Los biodigestores sistema batch se utilizan a nivel de laboratorio para evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico (Apolo, 2015).

De los sistemas Batch, el más usado es el OLADE-GUATEMALA, por la facilidad de construcción del sistema, la sencillez en el proceso de digestión, la alimentación del digestor que pueden ser con residuos vegetales o mezclando residuos vegetales con pecuarios y por su mayor producción de biogás, en comparación con el modelo chino e hindú (FAO, 2011).

El volumen total del biodigestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa, normalmente el espacio disponible para la fase líquida es del 75% del volumen total y el 25% restante para la parte gaseosa (Martí-Herrero, 2008).

Habitualmente un digestor sistema batch, cuenta con un espacio en la parte superior o en algunas veces separado del mismo para almacenar el biogás producido, este espacio o recipiente es llamado gasómetro (MINENERGIA /PNUD/FAO/GEF, 2011).

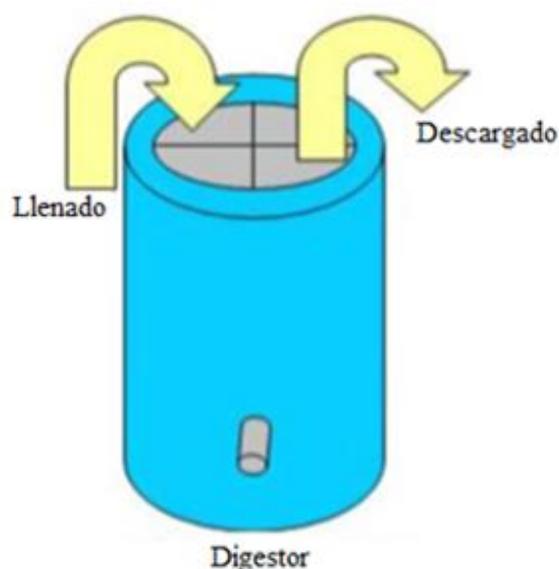


Figura 4. Biodigestor sistema Batch.

1.1.18. Ventajas de los biodigestores

- No producen desequilibrio en la naturaleza, como tala de los bosques al no ser necesario el uso de la leña para cocinar y humaniza el trabajo de las personas dedicadas a la actividad agropecuaria que utilizan el estiércol como leña.
- La sustitución de energía (alumbrado, cocción de alimentos, producción de energía eléctrica, transporte automotor y otros) con el uso de biogás, ocasionando disminución en los costos de producción y facilita la inversión en diferentes áreas de una empresa.
- Produce biofertilizante (efluente de la digestión) rico en nitrógeno, fósforo y potasio, capaz de competir con los fertilizantes químicos, costosos y dañan el medio ambiente.
- Elimina de los desechos orgánicos la carga contaminante de las explotaciones agropecuarias, mejorando su valor fertilizante y controlando los malos olores contaminantes del medio ambiente y fuente de enfermedades para el hombre y los animales.
- Permite el tratamiento de las aguas residuales, mejorando la calidad en las descargas disminuyendo la contaminación del recurso hídrico y el impacto negativo a la biodiversidad existente en los cuerpos receptores.
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales al mantener población más sana implica mayor desarrollo (Samayoa *et al.*, 2012).

Estas ventajas convierten a la biomasa en una de las fuentes potenciales de empleo en el futuro, siendo un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales (IDAE y Energía, 2007).

1.1.19. Sustancias inhibidoras de la reacción

Los sistemas de digestión anaeróbico, son susceptibles a materias tóxicas que envenenan a los microorganismos anaeróbicos si su concentración es mayor a lo necesario. El nitrógeno orgánico durante el proceso de digestión anaeróbica se

hidroliza, produciendo formas amoniacales; siendo esta, necesario para nutrir a los microorganismos, cuya carencia provoca el fracaso en la producción de metano y su exceso puede limitar el crecimiento de los microorganismos (Fernández *et al.*, 2002).

Tabla 2

Compuestos Inorgánicos Inhibitorios del Proceso Anaeróbico

Sustancia	Moderadamente inhibitoria (mg/L)	Fuertemente inhibitoria (mg/L)
Na⁺	3500 – 5500	8000
K⁺	2500 – 4500	12000
Ca²⁺	2500 – 4500	8000
Mg 2+	1000 – 1500	3000
Cobre	200	200 (total); 0,5 (soluble)
Cromo IV	-	50 - 70 (total); 3 soluble
Cromo III	-	200 - 260 (total)
Niquel -	-	180 - 420 (total); 2 (soluble)
Zinc		30 (total); 1 (solubles)

Fuente: (Fernández *et al.*, 2002)

La toxicidad de los metales pesados depende de la forma química que asuma en el biodigestor anaeróbico y los niveles de pH. Los metales pesados causan anomalías en el sistema de digestión, cuando se encuentra en forma de iones libres (en su forma soluble) y exceden ciertas concentraciones limitantes que se ilustran en la tabla 2.

1.1.20. Sistema de agitación

La agitación del material en digestión, es importante para distribuir los sustratos, microorganismos y calor, también ayuda a expulsar las burbujas de gas evitando la formación de capas flotantes o de sedimentación (Energías Renovables no convencionales, 2012). Existen tres formas principales de técnicas de agitación: Mecánica consistente de hélices o paletas que causan la mezclado por el movimiento de rotación, los hidráulicos funcionan creando una fuerte corriente hidráulica que mezcla el material, pero existe el riesgo de obstrucción del sistema

por sustratos demasiado densos o fibrosos y la agitación neumática funciona mediante la inyección de biogás a presión en la parte inferior del digestor (FAO *et al.*, 2011). Dependiendo de las características de la mezcla dentro del reactor, se pueden utilizar distintos tipos de agitadores en los estanques de digestión, estos son agitadores de alta velocidad de mezcla, hasta 1 500 RPM, agitador de rotación semi-rápido 100 a 300 RPM y lento de 10 a 50 RPM de frecuencias de operación (Energías Renovables no convencionales, 2012).

En función de la tipología del biodigestor, es necesario el sistema de agitación para favorecer la transferencia de sustrato a cada población bacteriana (Martí Ortega, 2006), así como homogeneizar la temperatura de trabajo evitando los cambios bruscos repentinos y mantener concentraciones bajas de inhibidores por el descenso de pH (IDAE y Energía, 2007).

En los biodigestores húmedos para maximizar la producción de biogás por metro cúbico, es necesario contar con un sistema de agitación continuo que evite la sedimentación de material inerte y/o la formación de costra superficial por flotación. Con respecto a la temperatura del proceso, a mayor temperatura disminuirá la viscosidad del sustrato dentro del biodigestor y además requerirá menor agitación que un sistema frío con mayor viscosidad (FAO, 2019).

1.1.21. Beneficios ambientales y económicos de los pobladores de la zona con la tecnología de digestión anaerobia con desarrollo sostenible

La digestión anaerobia mediante biodigestores, posibilita la degradación de la fracción orgánica biodegradable presente en los residuos sólidos urbanos, transformándola en biogás con alto contenido en metano de aprovechamiento energético, la destrucción de microorganismos patógenos, para ser utilizado como mejorador del suelo, de esta manera, la digestión anaerobia es un proceso de balance energético positivo en prevención de la contaminación y recuperación sostenible de la energía.

La tecnología de digestión anaerobia para la producción de metano, mejora la calidad de vida del poblador en el área rural dedicada a la actividad agropecuaria, por su independencia económica al aprovechar el metano como fuente de energía para la cocción de alimentos y biofertilizante como una oportunidad de negocio y

que además contribuye a la disminución de la huella de carbono por medio de la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (Cortés, 2019).

La implementación de tecnologías de digestión anaerobia de la excreta de bovino, reduce las enfermedades y contribuye a la calidad de vida de las personas, mediante la generación de biogás como alternativa de energía para cubrir las necesidades de combustible en los hogares de la zona rural de nuestro país, resuelve problemas como la disposición final de desechos, malos olores, fauna nociva, transmisión de enfermedades y contaminación de mantos freáticos (Sanabria *et al.*, 2017).

La tecnología de digestión anaeróbica del estiércol de ganado, es una alternativa de gestión de desechos orgánicos en grandes lotes que provienen de alimentación de animales confinados. En general, las tecnologías de digestión anaeróbica, puede ayudar a preservar e integrar la producción ganadera, creando recursos de energía renovable que contribuye a una bioeconomía en crecimiento en las comunidades rurales (Ileleji *et al.*, 2015).

Los digestores de biogás a pequeña escala pueden generar beneficios ambientales, sanitarios y sociales en las zonas rurales, con un impacto neto positivo en el acceso a la energía. En áreas rurales de los países en desarrollo, se logró una mejora notable en los niveles de vida con pequeñas aportaciones de metano producido a través de la digestión anaeróbica; a pesar de que existen dificultades asociadas con la falta de habilidades técnicas, conciencia y educación que obstruyen el pleno potencial del biogás (Canyon *et al.*, 2013).

1.1.22. Invernadero

Invernadero es el sistema más simple y económico para captar energía solar a favor de los cultivos, consta de una estructura cerrada cubierta por materiales transparentes, en su interior se obtienen un microclima para cultivar plantas en condiciones óptimas y fuera de temporada (MINENERGIA /PNUD/FAO/GEF, 2011).

Invernadero es aquella estructura de cierta altura de madera o metal cubierta de un material transparente, para permitir el ingreso de la radiación solar y cumplir con los requerimientos fotosintéticos y calor, a su vez dejar escapar menor

cantidad de energía, de manera que el balance positivo permite modificar el ambiente y favorecer el crecimiento y desarrollo de las plantas en su interior. Las cubiertas utilizadas de polietileno tienen la propiedad de permitir el paso de la luz e impedir la salida de calor durante el día solar, ocasionando incremento de temperatura en su interior, este fenómeno se conoce como efecto invernadero y durante la noche la temperatura interior tiende a disminuir hasta casi igualarse a la temperatura exterior. El aumento de temperatura durante el día en zonas frías permite cultivar plantas fuera de la estación o producciones tempranas (Lenscak y Iglesias, 2019)

Al momento de construir invernaderos es necesario tener en cuenta los siguientes factores: Exigencias climáticas del cultivo, características climáticas de la zona, disponibilidad de mano de obra e insumos, criterios de eficiencia y funcionalidad; en relación al régimen térmico a mantener en el interior del invernadero, este puede clasificarse en frío, templado o caliente; según el material de cobertura utilizado se pueden distinguir en rígidos (vidrio, policarbonato) o flexibles (polietileno, cloruro de polivinilo) y en cuanto a la estructura de soporte, se puede utilizar madera, metal (acero, aluminio, etc.), hormigón, o una combinación de estos materiales (Gassó y Solomando, 2011).

Los invernaderos son importantes porque permiten la producción de hortalizas durante todo el año en regiones que presentan condiciones de clima extremas, al controlar la temperatura y humedad, aceleran el crecimiento de los cultivos, permitiendo que la cosecha en menor tiempo, los rendimientos son mayores que a campo abierto, se produce más en poco espacio de terreno, facilitando el control de las plagas y enfermedades, al promover el cultivo en el mismo suelo en varias oportunidades, se conservan los suelos y protege a las plantas de las heladas, granizadas, nevadas y bajas temperaturas en general, utilizan el agua eficientemente de forma controlada y, las plantas y los productos están menos expuestos a la contaminación del aire (Estrada, 2012).

Los invernaderos se pueden construir en cualquier lugar, con las condiciones de que reciba por lo menos 5 horas diarias de luz solar, generalmente con orientación de este a oeste en su parte longitudinal, con disponibilidad de agua de buena calidad en forma permanente, protegido de los vientos y el ingreso de animales, y

se debe evitar la instalación de los invernaderos cerca de letrinas o pozos sépticos (Estrada, 2012).

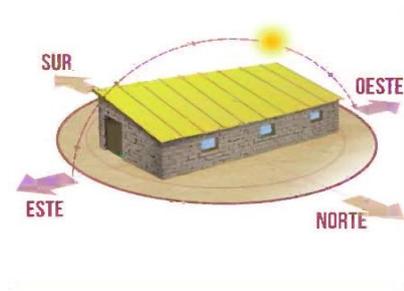


Figura 5. Invernadero diseñado y construido por Juan J. Estrada Paredes para FAO.

Fuente: (Estrada, 2012).

1.2. Antecedentes

La contribución de emisiones de CH_4 del ganado rumiante, como gases de efecto invernadero (GEI), en países en desarrollo de (África, Asia y América Latina) había incrementado en 51,7% en la década de 1890 y al 72,5% en la década de 2010, debido al incremento hasta en 121% de cantidad de ganado en las regiones en desarrollo. Esto indica que los incrementos futuros de la producción ganadera, probablemente contribuirán a mayores emisiones de CH_4 sino se implementan estrategias efectivas para mitigar las emisiones de GEI en el sistema ganadero (Shree *et al.*, 2016).

La transferencia directa de electrones entre especies en comunidades microbianas, desempeñan papel importante en la mejora de la eficiencia de la producción de metano en la digestión anaeróbica, se evaluaron comparativamente los impactos del grafeno conductor en la digestión anaeróbica mesófila y termófila, donde se calculó el flujo máximo de transferencia de electrones a temperaturas mesófilas y termófilas (35 °C y 55 °C), cuyos resultados del potencial de biometano mostraron la mejora significativa, donde las tasas de producción de biometano mejoran en un 25,0% en mesofílica y un 26,4% en termofílica (Lin *et al.*, 2018).

Desde 1950, el dióxido de carbono y metano atmosférico han aumentado en 28% y 70% respectivamente. El metano durante los primeros 20 años después de su liberación, tiene potencial de calentamiento como gas de efecto invernadero 80 veces más que el dióxido de carbono, la fermentación microbiana de vegetales por parte de los rumiantes aporta el 30% del metano liberado a la atmósfera, siendo mayor que cualquier otra fuente, lo que amerita la necesidad urgente que los administradores de las empresas de rumiantes, adopten estrategias que reducen las emisiones de metano entérico y evitar mayores aumentos en antropomorfos que generan el calentamiento global, amenazando los ecosistemas (Black *et al.*, 2021).

Los rumiantes son responsables de gran parte de las emisiones agrícolas de gases de efecto invernadero en forma de metano, mediante el ingrediente alimentario consistente de algas marinas, se puede gestionar para aumentar la productividad ganadera y satisfacer a la población en crecimiento, para eliminar el metano entérico en el ganado de carne alimentado con alta dieta en granos y proporcionar mejor rendimiento de la producción ganadera, generando beneficios para el medio ambiente y la economía en el sector agrícola en general (Kinley *et al.*, 2020).

El ganado es un importante contribuyente a las emisiones de metano (CH₄) a nivel mundial. La combinación de precios del carbono, las gestiones de la alimentación, de la cría del ganado puede ser una estrategia más viable y sostenible de mitigación de emisiones de CH₄ (Kumari *et al.*, 2020).

Un metro cúbico de biogás puede generar una energía eléctrica de 2,5 KWh, la tasa de crecimiento anual del sector ganadero en Pakistán es del 4% y su estiércol puede producir 35,625 millones KWh de energía eléctrica por día, de esta manera se puede superar la crisis energética, utilizando de manera eficiente el biogás como fuente de energía alternativa, cuya instalación de la planta de biogás es beneficioso en lo económico y, reduce las infecciones respiratorias y oculares (Uddin *et al.*, 2016).

El proceso de generación de energía eléctrica a partir de biomasa, genera valor agregado a los residuos previamente desechados, permite la comercialización de excedentes de electricidad, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y promueve el desarrollo rural (Schiochet *et al.*, 2020).

El biogás obtenido de residuos es un recurso renovable significativo en la mitigación de los problemas ambientales, la expansión de plantas de biogás implica prácticas la producción de biogás para la generación de energía eléctrica en áreas rurales y urbanas, contribución a la implementación de las políticas ambientales y sociales (Freitas *et al.*, 2019).

La utilización de desechos animales y agrícolas, son alternativas de fuentes de energía limpia y renovable muy prometedoras de red energética para el desarrollo de una sociedad sostenible, a través del proceso de digestión anaeróbica, se obtienen la bioenergía para convertir en electricidad en una planta de biogás y fertilizantes para ser comercializado (Bijarchiyan *et al.*, 2020).

La tecnología de la digestión anaeróbica alienta para producir biogás de los desechos orgánicos, como una alternativa de sustitución viable de los combustibles fósiles convencionales, sin embargo, como tal no ofrece todo su potencial para la recuperación de bioenergía, debido a algunos factores inhibidores como la sobre acidificación inducida por los ácidos grasos volátiles que provoca caída del pH, que son los inconvenientes más comunes de la digestión anaerobia que conducen a la inestabilidad e incluso en algunos casos, al fracaso de todo el proceso (Alavi-Borazjani *et al.*, 2020).

La digestión anaeróbica es una tecnología adecuada para la gestión de residuos pecuarios, reduce el impacto ambiental y permite producciones sustentables, generando biogás y biofertilizantes, donde los productores pecuarios podrían cubrir sus necesidades de energía térmica para cocción, agua caliente sanitaria y la demanda de nutrientes del suelo (Av *et al.*, 2020).

El pH es uno de los factores que más influye en la producción de metano durante el proceso de digestión anaeróbica, el valor óptimo de pH para el desarrollo de microorganismos formadores de metano está alrededor de 6,7 a 7,5 (Castro *et al.*, 2020).

La digestión anaeróbica de los residuos animales y vegetales (biomasa) mediante reacciones bioquímicas genera el biogás, que está constituido principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), el manejo adecuado de los residuos

(biomasa) puede contribuir significativamente a la producción y conversión de distintas formas de energía (Helguero *et al.*, 2018).

En el proceso de digestión anaerobia en un reactor tipo batch trabajado a 80% de volumen a temperatura mesofílica (35 ± 1 °C) durante 21 días consecutivos, se obtuvieron resultados interesantes para evaluar la optimización de la producción de biogás a partir de tamo de arroz pre tratado, contribuyendo a la prevención y mitigación de impactos ambientales derivados del manejo inadecuada y disposición de los residuos de origen agroindustrial (García *et al.*, 2020).

Uno de los elementos más indeseables del biogás es el sulfuro de hidrógeno (H_2S) por su alto poder corrosivo que afecta a la vida útil de los equipos de uso. A escala doméstica, el método de eliminación de H_2S más empleado está basado en el uso de virutas de hierro (Barrera-Cardoso *et al.*, 2020).

La producción de biogás mediante la digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos, es un método alternativo para obtener energía renovable, algunas variables críticas del proceso que permiten modificar la dinámica de producción de biogás son el pH y la temperatura. El rango de temperatura que permite favorecer el proceso es el termofílico comprendido entre los 30 °C a 40 °C; y el pH entre 6,5 y 7,5 (Criollo, 2017).

La digestión anaeróbica es una tecnología sólida que puede transformar la materia orgánica en una fuente de bioenergía como el biogás compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, su implementación varía significativamente, desde digestores domésticos a pequeña escala en países en desarrollo hasta digestores a gran escala en países desarrollados, estas diferencias se deben a las implicaciones económicas y ambientales , y al estímulo proporcionado por una variedad de políticas e incentivos relacionados con los sistemas agrícolas, la gestión de desechos y la producción de energía renovable (Vasco *et al.*, 2019).

La digestión anaeróbica es ampliamente aceptable para mejorar la eficiencia de la producción de energía y otros productos biológicos de alto valor, como una forma importante de recuperación de recursos de la corriente de desechos para una economía sostenible, la conservación del ecosistema y reducir la dependencia de los recursos naturales finitos (Wainaina *et al.*, 2020).

Las emisiones de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) que produce el sistema ganadero típico de la región central Argentina, provincia de San Luis, en promedio fueron de 1500 kg eq- CO_2 por animal al año. El 76% corresponden a las emisiones de CH_4 y el 24% a las emisiones de N_2O . Estos gases de efecto invernadero producidas por el ganado bovino, podrían reducirse aplicando las estrategias tecnológicas como la alimentación de los rumiantes con manejo de dieta, selección de categorías evitando animales improductivos, observación de la salud del animal, y ajustando la genética del animal al ambiente y al producto que se quiera obtener (Nieto *et al.*, 2014).

Las emisiones de metano son mayores en el estiércol líquido, pero varían en magnitud dependiendo del manejo, captura adecuadamente los impactos de las decisiones de gestión para reflejar la variación entre granjas y regiones en los cálculos de inventario (Vanderzaag *et al.*, 2013).

Para evaluar la eficiencia del proceso de conversión de biomasa en metano, se utiliza los valores de DQO y el volumen de biogás generado en el reactor anaeróbico, resulta que el 50% de la cantidad de DQO ingresada en el sistema se convirtió completamente en gas metano, comparando con los valores teóricos que están en el rango de 50 a 70%, manteniendo la temperatura constante a 37 °C y pH equilibrado, se puede elevar la eficiencia el proceso de digestión anaeróbica, y mejorar las condiciones ambientales en todas las etapas de degradación de la materia orgánica y aumentar la conversión en gas metano (Pinheiro, 2017).

Para la producción de metano en un sistema anaerobio, la DQO (Demanda Química de Oxígeno) puede considerarse un parámetro conservativo, es decir, la suma de las DQO de entrada debe ser igual a la suma de las DQO de salida:

$$\text{DQO}_{\text{afluente}} = \text{DQO}_{\text{efluente}} + \text{DQO}_{\text{biogás}}$$

Si se considera un biogás formado exclusivamente por CH_4 y CO_2 , y teniendo en cuenta que la DQO del CO_2 es nula, la DQO eliminada en el residuo se correspondería con la DQO obtenida en forma de metano (IDAE, 2007).

La excreta de chanco y humano, producen mayor cantidad de biogás, pero el fertilizante es muy ácido, la más equilibrada es del ganado vacuno debido a que el animal produce gran cantidad y es fácil de recoger. Para calcular la cantidad de

excreta que se dispone al día, es necesario considerar el manejo del ganado que se realiza, si es de pastoreo, el ganado duerme en la noche en un corral o establo y solamente se podrá recoger el 25% del estiércol producido por animal a lo largo del día (Martí-Herrero, 2008).

En la tabla 3 se muestra la producción de excreta fresca diario para diferentes animales por cada 100 kilogramos de peso.

Tabla 3

Producción diaria de Excreta fresca por cada 100 kg de Peso del Animal.

Animal	Cerdo	Bovino	Caprino	Conejos	Equino	Humano
Excreta (Kg)	4	8	4	3	7	0,4 (Adulto) y 0,2 (Niño)

Fuente: (Martí-Herrero, 2008).

Conforme a la tabla 3, una vaca de 300 kg de peso produce al día, 24 kg de excreta fresca, pero de ser sólo de pastoreo se recogerá 6 kg de excreta, asimismo cinco chanchos de 70 kg cada uno, producirá 14 kg de estiércol diario.

Desde una perspectiva de los países desarrollados y en desarrollo, la biotecnología anaeróbica contribuye a cumplir tres necesidades básicas: a) Mejorar las condiciones sanitarias mediante el control de la contaminación; b) generación de energías renovables para actividades domésticas y c) suministro de materiales estabilizados como biofertilizante para los cultivos. Por lo tanto, la biotecnología anaeróbica juega un importante papel en el control de la contaminación y para la obtención de valiosos recursos: energía y productos con valor agregado (Helguero *et al.*, 2018).

Una planta prototipo de biogás de 45 litros de capacidad construida en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Energético de la Universidad de Nigeria Nsukka, se utilizó para investigar la digestión anaeróbica de estiércol de vaca, para la generación de biogás en el rango de temperatura mesofílico entre 20 °C a 32 °C, el resultado fue la producción de biogás con 67,9% de metano, el volumen de producción de biogás alcanzó el pico más alto a pH neutro y mínimo a pH

ligeramente ácido y después de los 30 días de tiempo de retención, el residuo continuó produciendo lentamente (Ukpai y Nnabuchi, 2012).

La digestión anaerobia puede ocurrir en amplio rango de temperaturas que van desde 5 °C hasta los 60 °C, este parámetro afecta en forma directa a la velocidad de crecimiento de los microorganismos responsables del proceso. Se definen tres rangos de temperaturas: Psicofílico, menores a 20 °C ó temperatura ambiente; mesofílico, entre 30 a 40 °C, y termofílico entre 50 y 65 °C, el más utilizado es el mesofílico, a pesar que el termofílico tiene ciertas ventajas, como la eliminación de larvas, semillas de malas hierbas, organismos patógenos, mayor hidrólisis de partículas e higienización del residuo (Reyes, 2017).

El proyecto “La biomasa como fuente renovable de energía para el medio rural” (BIOMAS-CUBA) está relacionado con la producción de biogás y bioabonos a partir de los efluentes de biodigestores en fincas agroenergéticas, utilizando 69 biodigestores anaeróbicos de cúpula fija (modelo chino), el tubular plástico o de manga de polietileno con flujo continuo (tipo Taiwán) y la laguna anaeróbica cubierta con una geomembrana de polietileno de alta densidad. La capacidad total de digestión fue de 1 665 m³ y generaron 600 060 m³ de biogás para la cocción de alimentos, la generación de electricidad y la cocción de ladrillos; así como 2601 toneladas de bioabonos, empleados en la mejora de la fertilidad de 1830 hectáreas de suelos; además permitieron eliminar la contaminación provocada por excretas vacunas y porcinas en los escenarios productivos, generando impacto ambiental positivo (Savran *et al.*, 2012).

La importancia de la producción de biogás en Alemania se ha incrementado en los últimos años, elegido por gobierno Germano como uno de los caminos estratégicos para reducir la emisión de gases tóxicos emitidos por los combustibles y proteger el medio ambiente, con este propósito se propone una expresión matemática que describa el proceso de generación de metano en una planta piloto, la experiencia se realizó en el the Institute of Technology and Biosystems Engineering – Branschweig – Germany, utilizando los excrementos de vaca, cerdo y una mezcla de resto de silo y maíz, cuya expresión matemática que permite calcular la productividad de metano de un determinado resto orgánico en un tiempo determinado, es la siguiente (Max, 2003).

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_{reactor}} * t$$

Dónde:

- V_{CH_4} es el volumen de metano generado
- $V_{reactor}$ es el volumen de materia dispuesta en el recinto fermentador
- t es el tiempo considerado

La producción de metano tiene un límite y este depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia dispuesta en el sistema digestor, la fórmula que permite estimar la máxima generación de metano para un producto determinado, es la siguiente:

$$V_{Max} = \frac{V_{CH_4}}{S_{Org\ total}}$$

Dónde:

- V_{CH_4} es el volumen de metano generado
- $S_{org\ total}$ es la cantidad de materia orgánica total utilizado en todo el proceso.

La tasa de biometanización está en relación directa con la cantidad actual de sólidos orgánicos presentes en el sistema, las cepas de bacterias que participan en el proceso de digestión anaeróbica son sensibles al pH, cuando en el sistema $pH < 6$ ó $pH > 8$, la tasa de biometanización es más baja de lo esperado. Cuanto más grandes o complejas son las partículas sólidas orgánicas durante la fase inicial, la tasa de biometanización es menor, debido a que la desintegración y la hidrólisis toma mucho tiempo en completarse, revelando este paso como limitante de todo el proceso (Esposito *et al.*, 2012).

Para determinar la eficiencia del proceso en el biodigestor, se evaluaron resultados experimentales de la demanda química de Oxígeno (DQO), obteniéndose una reducción del 70%, después de ser sometido al proceso de fermentación anaeróbica (DQO inicial 7900 y final 2360). Por ser este parámetro un indicador de contaminación, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango óptimo para la conversión a biogás deseable (Investigaciones y Agua, 2006).

La separación de las etapas de hidrólisis y acidificación, y de acetogénesis y metanogénesis es importante para optimizar el proceso de digestión anaeróbica, las plantas termofílicas a menudo tienen una mayor producción de biogás que las mesofílicas, los niveles de ácidos grasos proporcionan la advertencia temprana necesaria de una posible situación de sobrecarga o aseguran una eficiencia óptima para maximizar el rendimiento (Ward *et al.*, 2008).

El biogás puede ser utilizado como combustible en la generación de energía térmica y/o eléctrica, las aplicaciones típicas son la utilización a pequeña escala o domiciliar para la cocción de alimentos, iluminación, pequeños motores de combustión interna y calentamiento de agua, y otros (Iván *et al.*, 2014).

El valor energético de 1m³ de biogás con un 60% de metano equivale a 0,7 litros de gasolina, 2,4 kWh de electricidad, 0,6 m³ de gas natural o 1,3 kg de madera (Ponce, 2016).

Generalmente, el estiércol fresco tiene alrededor de 17% de sólidos totales, el rango varía en 13% a 20% y los sólidos volátiles del estiércol que están sujetos a pasar a fase gaseosa corresponde aproximadamente de forma general al 77% del sólido total (Martí-Herrero, 2008).

Las cáscaras de arroz y los sustratos de plantas de algas se utilizaron para producir biogás, mediante digestión anaerobia en un biodigestor tipo discontinuo en el rango de temperaturas mesofílica comprendido entre 29,00 °C a 33,45 °C, en 75 días de proceso se ha obtenido 156,25 litros de biogás acumulado con 52,3% de metano (Ezekoye, 2014).

El Biol y Biosol remanentes de una planta de biogás de la Universidad de Santa María instalada en la irrigación de Majes, fueron utilizados en la producción de cebolla de variedad camaneja. El biosol fue aplicado en fertilización de fondo, mientras que el Biol como aplicación foliar al surco húmedo después del trasplante. Las variables evaluadas fueron: altura de planta, diámetro de bulbo, porcentaje de materia seca y rendimiento. Se determinó que la mejor dosis de biosol fue de 2 ton/ha y el mejor nivel de biol fue de 50% (Coaguila *et al.*, 2019).

La digestión anaeróbica es aplicada en ámbito rural debido a su capacidad de estabilizar los procesos de la materia orgánica mientras se recupera biogás y

fertilizante como productos renovables del digestado. La concentración y la naturaleza de la materia orgánica es capaz de influir en la producción de metano, los efluentes del ganado tienen generalmente menor rendimiento de metano debido a los compuestos inhibidores de amoníaco más altos, mientras que los subproductos alimentarios por su naturaleza heterogénea tienen amplio rango de producción de metano (García *et al.*, 2019).

Las emisiones de metano entérico son la fuente más grande emisores directos de gases de efecto invernadero (GEI) en las cadenas de valor de la carne de vacuno y lácteos son contribuyentes sustanciales de emisiones antropogénicas de metano a nivel mundial. El uso de algas marinas para la alimentación de ganado lechero y carne fueron identificados como mitigantes del potencial de metano entérico (Vijn *et al.*, 2020).

El biogás como recurso energético constituye una opción de transición energética, que puede ser utilizada como combustible para generar electricidad, calor y energía mecánica, proveniente desde una fuente renovable como residuos agropecuarios, agroindustriales y municipales, entre otros, desempeñando un papel importante en la mitigación de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, los desechos sólidos con altos contenidos de materia orgánica, deberían ser considerados como una oportunidad de generación de energía renovable y una medida efectiva de mitigación de gases de efecto invernadero (Reyes, 2017).

En un estudio de investigación para mejorar el rendimiento de metano mediante la digestión anaeróbica de sustratos multicomponentes, paja de trigo y estiércoles de vaca y pollo, con base en la composición de alimentación optimizada y la relación C/N. Las relaciones C/N de 25: 1 y 30:1 tuvieron un mejor rendimiento de digestión con un pH estable y bajas concentraciones de nitrógeno amoníaco total y NH_3 libre (Wang *et al.*, 2012).

En la descomposición anaeróbica, el carbono es aprovechado por los microorganismos anaeróbicos, si el carbono está presente en materia prima no biodegradable, entonces no será accesible a los microorganismos. Por lo tanto, los materiales con alto contenido de carbono (mayor a 35:1), tiene bajo contenido de nitrógeno, sufren en su descomposición y conversión a metano (Núñez, 2017).

La biodigestión anaeróbica de estiércol bovino en un reactor geomembrana cilíndrico, durante 21 días, a 20 °C de temperatura ambiente, en una proporción estiércol-agua 1:3 (para 1 L de estiércol 3 L de agua) se ha obtenido biogás y producto efluente sin malos olores que no atrae moscas, compuesto de biol y biosol, como solución orgánica estabilizada utilizada para foliar plantas y fertilizante para cultivos, respectivamente (León *et al.*, 2019).

La fertilización edáfica con biol y biosol balanceados, contraresta en un 67% el ataque de hongo patógeno *Macrophomina phaseolina* a la soya causando pudrición carbonosa. La incorporación de biosol mezclados con uria permite conservar la humedad del suelo reduciendo el estrés hídrico de las plantas (Morales, 2021).

El biol se considera como fitoestimulante complejo para cultivos, donde incrementan mayor capacidad de fotosíntesis y la producción, en la aplicación experimental realizada en Kallutaca Bolivia, se obtuvo un rendimiento equivalente a 10 ton/ha con la aplicación de dosis de 25% de Biol (Condori-Mamani *et al.*, 2017).

El rendimiento del biol y súper biol en la producción agroecológica de lechuga, tiene mejores resultados que lechugas sin aplicación, con características fisicoquímicas, microbiológicas y las organolépticas que están dentro los límites de las normas técnicas estandarizadas y de apariencia originales. Referido al beneficio de costo, la aplicación de biol presenta mayor rentabilidad por el menor costo de producción. Pero referido a la producción de lechuga fue el súper biol que tuvo mejor rendimiento (Cotrina *et al.*, 2020).

El biodigestor como tecnología de digestión anaeróbica de desechos orgánicos, produce biogás energía limpia y renovable, elimina contaminantes patógenos en porcentaje desde el 65% al 100% en algunos casos. En cuanto se refiere al biol como acondicionador de suelos, incrementa la biomasa de las especies vegetales al usar una mezcla de biol con compost (José y Reina, 2020).

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema

La ganadería es una actividad económica que contribuye con la seguridad alimentaria de la población y la disminución de la pobreza, al producir carne, leche, derivados y recursos económicos (Molina-Flores *et al.*, 2020); sin embargo, contamina ampliamente con las emisiones antropogénicas de gases metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O) a la atmósfera, cuyo aumento de las concentraciones de estos gases provoca un calentamiento de la superficie terrestre (Primavesi *et al.*, 2004).

El metano (CH_4) es considerado como un potente gas de efecto invernadero (GEI), con potencial de calentamiento global de 21 veces más de que el dióxido de carbono CO_2 . A nivel mundial, los rumiantes producen unos 80 millones de toneladas de metano cada año, lo que representa alrededor del 28% de las emisiones globales de las actividades relacionadas con humanos (Mirzaei y Maheri, 2016).

Una de las actividades económicas más importantes del poblador en el sector rural del Altiplano Peruano, es la ganadería y la agricultura; con referente a la ganadería están las vacas, ovejas, llamas, alpacas, cerdos, entre otros, estas especies constituyen en una fuente de generación de divisas, proteína para dietas humanas, empleo, abono orgánico para los cultivos y transporte, y como mínimo el poblador rural para alcanzar un nivel de vida aceptable debe poseer 6 vacunos (Paredes y Escobar, 2018).

Los rumiantes (vacunos, cabras y ovejas) son los principales contribuyentes a la producción de metano (CH_4), su producción de metano es el resultado natural e inevitable de la fermentación ruminal. Existen muchos factores que influyen en la producción de

metano (CH_4) de los rumiantes, incluyendo el nivel de ingesta, tipo y calidad de los alimentos, consumo de energía, tamaño de los animales, tasa de crecimiento, nivel de la producción, y la temperatura ambiental (Broucek, 2014).

La producción de metano (CH_4) por los rumiantes se deriva del proceso digestivo de manera natural, constituyendo una pérdida de energía en estos y contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), este hecho ha incrementado el número de investigaciones, con la finalidad de reducir la metanogénesis ruminal y mitigar el calentamiento y el cambio climático global, así como las alternativas existentes para su mitigación (Bonilla y Lemus, 2012).

El protocolo de Kyoto sobre el cambio climático tiene por objetivo de reducir en un 5% las emisiones seis gases generadores del calentamiento global, estos son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y tres gases industriales fluorados como, hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6), en el periodo que va desde el año 2008 a 2012, en comparación a las emisiones de 1990, por ejemplo, si la contaminación de estos gases en el año 1990 fue al 100%, al finalizar el año 2012 debería ser de 95%, esto significa que cada país obligado por el protocolo, tiene sus propios porcentajes de emisión de gases que deben disminuir, de tal manera que reducción global sea del 5% (Naciones Unidas, 1998).

2.2. Enunciados del problema

El metano (CH_4) es uno de los tres gases de efecto invernadero principales, junto con CO_2 y óxido nitroso (N_2O), su potencial de calentamiento global es de 25 veces que de CO_2 . El metano (CH_4) también afecta a la degradación de la capa de ozono (Broucek, 2014).

Un informe de la FAO sobre la ganadería, señala que esta es la principal actividad antropogénica del uso en la tierra, que genera el 18% de las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo responsable del 9% de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), principalmente por deforestación, el 37% de las emisiones de metano (CH_4), en gran parte por la digestión de los rumiantes y el 65% del óxido nitroso, generado en gran medida por el estiércol (Molina *et al.*, 2013).

El estiércol bovino está considerado como uno de los desechos orgánicos más abundantes que amenazan al mundo, debido a que genera gases de efecto invernadero que contamina el agua, recursos agrícolas y malos olores (Editors, 2020), con la implementación de

sistema de biodigestor para la obtención de biogás y bioabono, se puede minimizar los impactos negativos que ocasionan los desechos orgánicos de la ganadería y que resultan ser productos altamente atractivos en términos de energía y fertilizante para la agricultura (Giler y Cedeño, 2020). La tecnología de digestión anaeróbica es adecuada para la gestión de residuos pecuarios, reduce el impacto ambiental y permite producciones sustentables, generando biogás y biofertilizantes, que los productores podrían utilizar para cubrir sus necesidades de energía térmica para cocción y agua caliente sanitaria, además de la demanda de nutrientes del suelo (Av *et al.*, 2020), se plantea las siguientes interrogantes.

2.2.1. Pregunta General

¿Será posible la producción de metano mediante digestión anaerobia de la excreta animal, para el aprovechamiento energético renovable en forma de biogás y mejorar la calidad de vida de los pobladores de la zona rural en la región altoandina?

2.2.2. Preguntas específicas

¿Será posible la producción de metano de la excreta animal, mediante digestión anaeróbica en el biodigestor sistema batch?

¿La producción de metano a partir de la excreta animal, constituirá el aprovechamiento energético renovable en forma de biogás en la región altoandina?

¿Se generará beneficios ambiental y económico de los habitantes de la zona rural altoandina, con el uso biogás como energía renovable obtenida mediante el mediante digestión anaeróbica de la excreta de vaca?

2.3. Justificación

La demanda de energía está incrementando considerablemente debido al crecimiento poblacional acelerado, la sobreexplotación de los recursos y tecnologías que aumentan los hábitos de consumo. El aumento de la demanda de energía, el alza de los precios en los combustibles, sumado al deficiente sistema de abastecimiento en algunos países, limitan el desarrollo de los pequeños y medianos productores.

La excreta de los animales constituyen desechos contaminantes para el medio ambiente, cuyo aprovechamiento mediante la digestión anaerobia en el biodigestor sistema batch, puede constituirse en una alternativa útil para producir energías renovables tales como el biogás y biofertilizantes para los cultivos (León *et al.*, 2019).

El incremento de producción ganadera, provoca el aumento en la cantidad de residuos fecales en áreas reducidas, generando un impacto negativo sobre los recursos naturales (Beily y Aires, 2020).

Las emisiones de metano entérico constituye como fuente principal antropogénica a nivel mundial, que contribuyen a la emisión directa de gases de efecto invernadero (GEI), en las cadenas de valor de la carne de bovino y los lácteos (Vijn *et al.*, 2020).

El gas metano es uno de los gases de efecto invernadero más importantes que puede contribuir al calentamiento global, los datos satelitales de GOSAT y MODIS, utilizaron para analizar los cambios mensuales de metano entre los años 2012 a 2018 en América del Norte, resultando que el metano durante ese período ha aumentado y aumenta de 1789 a 1824 ppb, cuyas concentraciones mensuales fluctúan entre valores máximo en setiembre y octubre, y mínimo en marzo y abril, la estación también reporta el incremento de la temperatura, la disminución de la precipitación y la humedad, esto indica que el aumento de la concentración de metano tiene una relación significativa con la baja cobertura vegetal y alta temperatura, por lo tanto, la conservación de la cubierta vegetal puede contribuir a la reducción de la concentración de metano (Javadinejad *et al.*, 2019).

El gas metano es una de las fuentes de energía renovable económicamente sostenible, al ser utilizado como combustible no genera impacto ambiental, a diferencia del gas licuado de petróleo (energía no renovable), pero el metano sin ser utilizado o quemado, contribuye al efecto invernadero generando calentamiento global. La digestión anaeróbica se aplica en gran parte en el sector rural por su capacidad de estabilizar la materia orgánica y recuperar el biogás como energía y el digestado como un fertilizante renovables (Garcia *et al.*, 2019).

La recuperación y la transformación de metano en calor o en electricidad es una necesidad económica y ambientalmente sostenible; así mismo, la excreta de los animales domésticos puede ser transformado en biol y biosol, los mismos que son sustancias orgánicas sin

metano que pueden ser utilizados como fertilizantes y la alimentación de otros animales como los peces o patos (Reyes, 2017).

El altiplano de Puno es un espacio estratégico para la crianza de ganado bovino de producción de carne y leche, cuyas excretas son almacenadas en los alrededores de los establos, expuestas a la intemperie, generando impacto ambiental por la emisión de gases tóxicos como el metano (CH₄) y el anhídrido carbónico (CO₂), por lo que es necesario buscar alternativas de uso de esos desechos animales para la generación de energía útil para el uso doméstico, a través de tecnologías limpias (Bijarchiyan *et al.*, 2020).

Complementariamente en esta investigación, la utilización de biodigestores ofrece grandes ventajas para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias, además de disminuir la carga contaminante de los mismos, extrae gran parte de la energía contenida en la biomasa, mejorando su valor fertilizante y controlando los malos olores, contribuyendo a la reducción de polución y agregando valor a los excrementos de animales domésticos como ganado vacuno, ovino y porcino (Editors, 2020).

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo General

- Evaluar la producción de metano a partir de la excreta animal doméstico, mediante la digestión anaerobia en el biodigestor sistema batch, como aprovechamiento energético en forma de biogás y analizar la rentabilidad económica de los pobladores de la zona rural en la región altoandina.

2.4.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la producción de metano de la excreta animal, mediante la digestión anaerobia mesofílica como aprovechamiento energético renovable en forma de biogás.
- Determinar los parámetros fundamentales que influyen en la producción del metano de la excreta del ganado vacuno mediante el biodigestor sistema batch.

- Analizar los beneficios ambiental y económico de los pobladores de la zona con la tecnología de digestión anaerobia con desarrollo sostenible.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis General

- La producción de metano de la excreta animal mediante digestión anaerobia en el biodigestor sistema batch, posibilitará el aprovechamiento energético renovable en forma de biogás para mitigar el calentamiento global por emanación del metano y mejorar la rentabilidad económica de los pobladores de la zona rural en la región altoandina.

2.5.2. Hipótesis Específica

- La digestión anaerobia de la excreta animal mediante biodigestor sistema batch, posibilitará la producción de metano a temperatura mesofílica en la región altoandina.
- La producción de metano a partir de la excreta animal, constituirá el aprovechamiento energético renovable en forma de biogás en la región altoandina.
- El uso del biogás como energía renovable mitigará el calentamiento global por emanación metano y mejorará la rentabilidad económica de los habitantes en la zona rural altoandina.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio

El trabajo se realizó en la ciudad de Puno, a una altitud aproximada de 3848 m, entre las coordenadas 17°50'15" de latitud sur y 70°01'18" de longitud oeste del meridiano de Greenwich, a una temperatura del aire que osciló entre -2 °C por las noches y 21 °C al medio día (tabla 4), con una radiación solar en una intensidad próxima a los 1000 W/m², clima subtropical, abundancia de lluvias durante los meses de enero a marzo, donde los productores agropecuarios crían ganado vacuno y ovino como actividad principal, y cultivan papa, quinua, cebada, haba, arveja, avena forrajera, alfalfa, dactilis, trébol y rye grass, fertilizados con abonos naturales como la excreta de animales domésticos sin tratamiento y muchas veces con fertilizantes químicos. Además, la zona cuenta con agua manantial proveniente desde el cerro negro P'eqe, en un volumen abundante en época de lluvia y escaso en época seca.

3.1.1. Material biológico

La materia prima utilizada fue la excreta fecal obtenida de 4 vacunos: 1 vaca de 4 años, una vaquilla de 3 años, dos toretes de 3 y 2 años, de propiedad del señor Guillermo Mamani Yucra (Figura 6), alimentados con pastos naturales de la asociación *Festuca dolychophylla* (ch'illiwa) y *Muhlebergia fastigiata* (ch'iji).



Figura 6. Fotografía de establo de abastecimiento de excreta de bovino

Tabla 4

Condiciones Meteorológicas del lugar de estudio

Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura Setiembre – Marzo	Celsius (°C)	-1 a 21
Temperatura Abril - Agosto	Celsius (°C)	-2 a 16
Humedad	%	60
Precipitación	mm	700

Fuente: SENAMHI, 2012

3.2. Población

La población estuvo dada por la disponibilidad de las excretas del ganado bovino, ovino y porcino. Las ecuaciones matemáticas para calcular la disponibilidad de la excreta fresca de los animales según la permanencia en el establo se presentan en la Tabla 3 de los antecedentes.

Para el ganado fijo en establo durante 24 horas:

$$\left. \begin{aligned} Ex_{\text{bovino}} &= (0,08)W_{\text{vivo}} \\ Ex_{\text{ovino}} &= (0,04)W_{\text{vivo}} \\ Ex_{\text{porcino}} &= (0,04)W_{\text{vivo}} \end{aligned} \right\} 3.1$$

Si el ganado es de pastoreo y solamente en la noche está en el establo, la excreta disponible es el 25% del total (Martí - Herrero, 2008).

$$\left. \begin{aligned} \text{DEX}_{\text{bovino}} &= (0,25)\text{Ex}_{\text{bovino}} \\ \text{DEX}_{\text{ovino}} &= (0,25)\text{Ex}_{\text{ovino}} \\ \text{DEX}_{\text{porcino}} &= (0,25)\text{Ex}_{\text{porcino}} \end{aligned} \right\} \quad 3.2$$

Dónde: Ex es la disponibilidad de la excreta animal, fijo en el establo durante 24 horas.

DEX : es la disponibilidad de la excreta animal, fijo en el establo sólo en la noche

W_{vivo} : es el peso vivo del animal.

La materia prima utilizada fue excretas fecales frescas (H° 85%) de ganado vacuno, por la facilidad de disposición y la cantidad que se produce por animal, luego de ser sometida a la digestión anaeróbica se ha obtenido el gas metano contenido en el biogás y sustancia digerida compuesta de biol y biosol (Yaniris y Cristina, 2005).

La disponibilidad de la materia prima está íntimamente relacionada con la cantidad, peso y alimentación que recibe el ganado, de acuerdo a la tabla 3 de capítulo I, si cada ganado vacuno tiene un peso promedio de 100 kg fijo en el establo, produce 8 kg de excreta diario (Martí - Herrero, 2008), en la localidad de Chacarilla alta Puno ubicada en la zona altoandina, elegido como ámbito de estudio, el ganado vacuno se alimenta de pastos naturales y generalmente es de pastoreo, en el lugar de estudio se cuenta con 4 vacunos aproximadamente de 200 kg de peso vivo promedio y se encuentra en el establo sólo en la noche, acuerdo a la ecuación 3.2, la excreta disponible es de 16 kg como materia orgánica.

3.3. Muestra

Es la mezcla de excreta fresca y el agua en una proporción 1 a 3, (para un kilogramo de excreta fresca de ganado vacuno corresponde 3 litros de agua), esta mezcla o substrato se denominada **afluente** que, en el momento de introducir al biodigestor para el proceso de digestión anaeróbica, tenía pH = 7,35 como valor promedio, una temperatura de 18,10 °C; la Figura 7, muestra la fotografía de substrato preparado para ser introducido en el biodigestor y en el anexo 8 se muestra la preparación del substrato afluente.

La capacidad del biodigestor sistema batch fue de 45 litros aproximadamente, con 75% de volumen disponible para la materia prima y el 25% para el biogás generado. El substrato **afluente** que tiene las siguientes características:

- **Excreta Fresca:** tiene una cantidad de 8,9 kg de masa total y 7,42 litros de volumen, siendo la densidad aproximadamente de 1199,50 kg/m³, determinada por medición directa.
- **Agua.** Tiene una densidad de 1000 kg/m³, proveniente directamente de un manantial conocido como negro P'eqe, no contiene sustancias inhibidoras como cloro, metales pesados y otros, en el momento de someter a la mezcla tiene 26,58 litros de volumen y 26,58 kg de masa. La tabla 5 el resumen de la materia prima que se somete al proceso de digestión anaerobia.



Figura 7. Fotografía de mezcla de excreta ganado de vacuno con agua.

Tabla 5

Características de la Sustancia Afluente.

Materia prima	Masa (kg.)	Volumen (x10⁻³m³)	Densidad (kg/m³)	Temperatura (°C)	pH
Excreta de vaca	8,90	7,42	1199,50	18	7,8
Agua manantial	26,58	26,58	1000	16	8,5
Mezcla	35,48	34,00	1043,5	18,10	7,35

3.3.1. Construcción del invernadero

Por las condiciones meteorológicas del altiplano, el comportamiento del clima en la región altoandina es muy variado y seco, la temperatura varía desde -10°C hasta

21°C en algunas épocas del año, para lograr un clima característico de la zona tropical con temperatura por encima de 20°C, fue necesario el uso del invernadero para establecer un microclima (MINENERGIA /PNUD/FAO/GEF, 2011).

La figura 8 muestra el diseño y la estructura sólida del invernadero apropiado para la región del altiplano y tiene las siguientes características:

- **La estructura sólida;** consta de muros de contención de ladrillo pandereta y un armazón de madera de geometría trapezoidal (Gassó y Solomando, 2011).
- **Ubicación apropiada del terreno con bajo flujo de corriente de aire;** esta característica es importante para que el módulo experimental no pierda calor almacenado, debido al movimiento convectivo causado por el viento exterior en horas de la noche (Gassó y Solomando, 2011).
- **Orientación del techo;** Requisito importante que permita la exposición de por lo menos 10 horas diarias hacia el sol, garantizando el 90% de irradiancia del sol al techo y permite acumulación de calor en los materiales componentes del invernadero (Estrada, 2012). El techo está orientado hacia el norte geográfico adecuando a la inclinación 17°17'30" de latitud sur, siendo la pendiente de 34,33% respecto a la horizontal, para lo cual, la pared hacia el norte tiene 143 cm de altura y la pared hacia el sur tiene 201 cm altura, las paredes laterales tienen 166 cm de ancho alineados a la pendiente.
- **Aislamiento térmico;** para mantener el confort térmico (Lenscak y Iglesias, 2019), la temperatura se mantiene por encima de los 20 °C, los materiales utilizados para el aislamiento son el material Tecnopor o espuma de vidrio que se utiliza para el piso y algunas partes de la pared, lana de oveja y paja del lugar o ichu (Spita ichu) para cubrir los conductos por donde salen los tubos de afluente y efluente.
- **Techo;** la estructura del techo es uniforme con listones de madera cuadrada de 1" de espesor. La figura 9 muestra la fotografía del invernadero cubierto completamente con plástico Agrotel, fijado con clavos a la madera para evitar posible desprendimiento del techo cuando el viento es muy fuerte. La finalidad fue mantener el recinto herméticamente aislado del frío por acción

de viento durante la noche y captar la mayor cantidad de energía radiante durante las horas de sol (Lencsak y Iglesias, 2019). En el interior del invernadero se encuentra el biodigestor discontinuo (sistema Batch), de material polietileno.

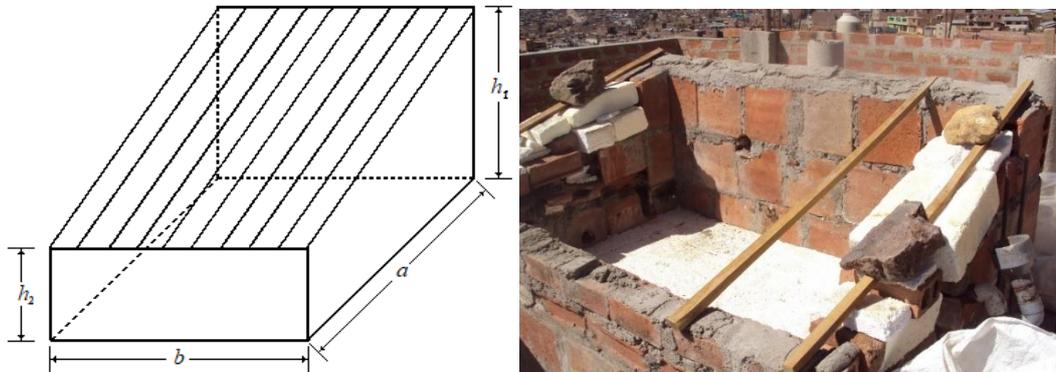


Figura 8. Estructura sólida y fotografía del invernadero.



Figura 9. Fotografía del invernadero cubierto con plástico Agrotel transparente.

Las dimensiones de la estructura sólida del invernadero se detallan en la tabla 6, en las tablas 7 y 8 se cuantifican los materiales utilizados para el invernadero y la tabla 9 detalla los materiales de aislamiento térmico.

Tabla 6

Dimensiones de la estructura sólida del invernadero.

Dimensiones	Valor	Unidad
Ancho (a)	1,66	m
Largo (b)	2,40	m
Altura 1 (h_1)	2,01	m
Altura 2 (h_2)	1,43	m
Longitud de la pendiente (s)	1,75	m
Área de la base = $a \times b$	3,98	m ²
Área lateral sur = $b \times h_1$	4,82	m ²
Área lateral norte = $b \times h_2$	3,43	m ²
Área lateral trapecio = $a \times (h_1 + h_2) / 2$	2,85	m ²
Área del techo = $b \times s$	4,2	m ²
Volumen total = $a' b' (h_1 + h_2) / 2$	6,85	m ³

Tabla 7

Materiales para la Construcción de Estructura Sólida.

Material	Cantidad
Ladrillo hueco de techo	50 unidades
Yeso	Una bolsa (40 kg)
Cemento	Una bolsa (45 kg)
Listones de madera 3"x2,5"	10 pies ³
Piedras pómez	Una carretilla

Tabla 8

Materiales para el techo del invernadero.

Material	Cantidad	Dimensiones
Listones de madera	12	1"x1" de espesor y 2 m de largo
Listones de madera	08	2"x2" de espesor y 2 m de largo
Clavos	1 kg	1" y 2"
Plástico Agrotel	02	4 m x 5 m

Tabla 9

Materiales para el Aislamiento Térmico.

Material	Cantidad	Dimensiones
Espuma de vidrio (Tecnopor)	5 barras:	10 cm x 14 cm de espesor y 3 m de largo
Lana de oveja	4	Kilogramos
Paja del lugar (ichu)	20	Kilogramos

3.3.2. Construcción del biodigestor discontinuo sistema Batch

El biodigestor prototipo experimental sistema Batch consiste de un cilindro vertical de poliestireno (Bidón) de flujo discontinuo (Apolo, 2015), diseñado para un poblador de la zona que cuenta con cuatro (4) vacunos de 150 kg de peso vivo cada uno ó 30 ovejas de 40 kg de peso vivo cada uno. El volumen total del biodigestor es de 46 litros, con 34 L para el sustrato (mezcla de excreta con agua) y 12 L para almacenar metano contenido en el biogás producido, es decir el 75% del total para la materia orgánica y 25% para el biogás (Martí - Herrero, 2008). La proporción de volumen libre para almacenar biogás está dentro del porcentaje recomendable entre 20% a 50% del volumen total (FAO, 2019). Las dimensiones del biodigestor construido se detallan en la tabla 10.

Tabla 10

Dimensiones del Biodigestor Sistema Batch.

Perímetro de la sección transversal S (m)	Altura H(m)	Volumen total V_T (m^3)	Volumen de sustrato V_{sust} (m^3)	Volumen para el gas V_{gas} (m^3)
1,00	0,58	0,046	0,034	0,012

El biodigestor sistema Batch tiene las siguientes componentes:

- Dos (2) tubos de 2 pulgadas diámetro ubicados en las superficies laterales opuestas, uno para el ingreso del sustrato (afluente) y el otro para evacuar la materia degradada (efluente), ambos tubos son material de PVC de agua potable.

- La tapa del biodigestor Bidón tiene una ranura para cerrar herméticamente, donde se construyen dos (2) orificios, en un orificio se instala un tubo de 1" de diámetro y de 30 cm de longitud con salida de tipo campana, por donde sale el eje del agitador manual, y otro tubo de 1/2" de diámetro para la evacuación del biogás contenido en el digestor.
- El agitador manual que consta de un eje de tubo de PVC de 1,40 m de longitud, en donde se fijan dos mariposas a una altura de 15 y 20 cm respectivamente desde la base del biodigestor. El agitador tiene la función de homogenizar el sustrato, evitando la sedimentación del material inerte y la formación de costras en la superficie y así optimizar la producción de metano en el digestor (FAO, 2019). En la figura 10 se muestra el biodigestor descrito y en el anexo 9 se muestran las fotografías del biodigestor y sus componentes.
- El gasómetro consiste en una bolsa plástica, que sirve para almacenar el biogás (MINENERGIA /PNUD/FAO/GEF, 2011), instalado al tubo de conducción para cuantificar el metano contenido en el biogás.

El digestor debe estar herméticamente cerrado, por lo que la ranura de la tapa contiene empaquetadura de material neumático y asegurado con alambre 1/16" para evitar fuga de gas y desequilibrio de la temperatura de trabajo, los tubos de conducción de biogás hacia el gasómetro y las llaves de paso se deterioran rápidamente por acción del calor, por tanto, es necesario renovarlos después de un tiempo prudencial (12 meses) para el normal funcionamiento del biodigestor.

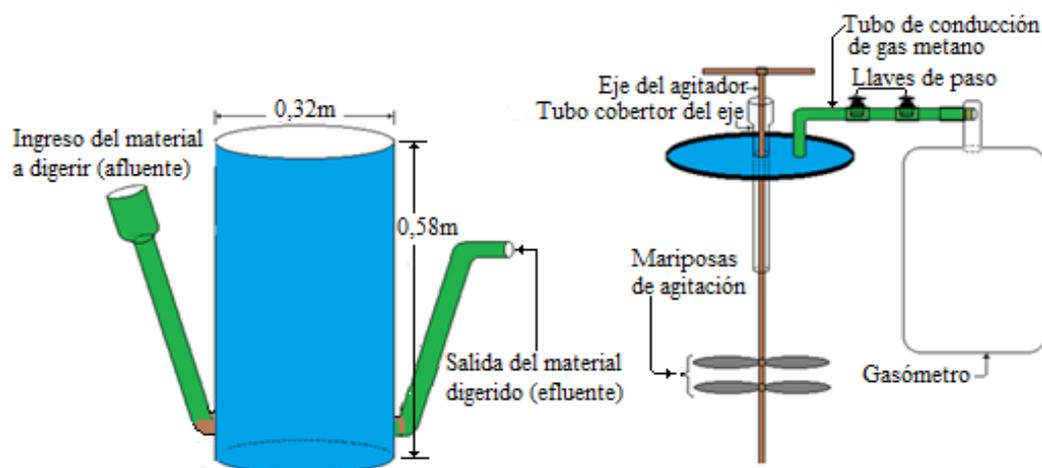


Figura 10. Biodigestor y sus componentes.

Cuando la producción de biogás es en cantidad, por el contenido de metano que tiene el sistema, las tuberías de conducción deben acogerse a las normas internacionales como por ejemplo la Norma Oficial Mexicana NOM-03-SECRE-2002 en su apartado 5.1. En la tabla 11 se muestran los materiales utilizados en la construcción del biodigestor.

Tabla 11

Materiales para la Construcción del Biodigestor.

Material	Cantidad	Dimensiones
Recipiente de plástico de transporte de aceitunas (Bidón)	01	46 litros
Tubo PVC 2" de agua potable	01	1,5 metros
Tubo PVC 1" de agua potable	01	1 metros
Tubo PVC 1/2" de agua potable	01	6 metros
Unión simple PVC agua potable de 2"	02	unidades
Unión simple PVC agua potable de 1"	01	unidades
Unión simple PVC alta densidad de 1/2"	02	unidades
Adaptador PVC alta densidad de 2"	02	unidades
Adaptador PVC alta densidad de 1"	01	unidades
Codo PVC de alta densidad de 1/2"	01	unidades
Codo PVC de agua potable 2"	02	unidades
Llave de paso de 1/2"	03	unidades
Mariposa de radiador de automóvil usado	02	unidades
Pega tubos Adex	02	100 ml
Cintas teflón	06	unidades
Cintas de neumáticos	01	3 metros
Empaques neumáticos	04	20x30 cm ²

3.4. Método de investigación

El trabajo de investigación es de tipo experimental, la metodología utilizada fue la digestión anaerobia de la excreta de ganado vacuno mezclado con agua de manantial, no tratada (sin cloro), en un biodigestor discontinuo (sistema batch), colocado dentro de un invernadero adecuadamente acondicionado con materiales de aisladores térmicos para la estabilización de la temperatura y pH neutro.

Durante el proceso de digestión anaeróbica de la excreta animal para la producción de metano (CH_4), en un tiempo total de retención de 45 días, se ha realizado las mediciones de metano (CH_4), bióxido de carbono (CO_2), el volumen del biogás producido, los parámetros fundamentales que condicionan la producción del metano, como el potencial de hidrógeno (pH) y temperatura en el interior del digestor (T_{digest}), adicionalmente la temperatura dentro del invernadero (T_{inv}) y se analiza los beneficios ambiental y económico de uso de la tecnología de digestión anaerobia con desarrollo sostenible.

El análisis físicoquímico de los sustratos afluente y efluente, se realizaron en laboratorio de la Facultad de ingeniería química, determinando el contenido de materia orgánica (MO), carbono total (C), fosforo total (P), demanda química de oxígeno (DQO) y nitrógeno (N_2) antes y después del proceso. Los instrumentos de medición utilizados son el sensor metano Sampling Data-Looger CM-0191 50% CO_2 y 100% CH_4 para cuantificar el metano producido, sensor PASPORT de temperatura y pH que trabajan con de interface SPARK - PS-2008 y el software SPARKvue.

3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

3.5.1. Producción de metano

Para evaluar la producción de metano de la excreta animal, se ha utilizado la excreta fresca de ganado vacuno recogida en el momento de su evacuación y preparándola con agua en una proporción de 1 a 3 (a un kilogramo de excreta corresponde 3 litros de agua), para la digestión anaerobia en un biodigestor discontinuo (sistema batch), el proceso seguido se muestra en la tabla 12.

Tabla 12

Proceso del Experimento.

Materia	Procedimiento	Proceso	Resultado
Excreta de ganado vacuno	Transporte de excreta casi fresca para mezclar con agua	Excreta disuelta en agua casi líquida	Mezcla o Substrato
Substrato	Control de pH y Temperatura	Digestión anaeróbica	Biogás + bioabono

Las actividades realizadas consistieron en: construcción del invernadero, construcción del biodigestor, preparación de la materia prima, instalación de equipos de medición y seguimiento del proceso durante 45 días.

Para determinar la masa del biogás producido $m_{biogás}$, se ha utilizado el principio de conservación de la masa durante el proceso de digestión.

$$m_{biogás} = (m_{H_2O} + m_{est-hum}) - (m_{biol} + m_{biosol}) \quad 3.4$$

Dónde:

$m_{biogás}$: Masa del biogás.

m_{H_2O} : Masa del agua.

$m_{est-hum}$: Masa de la excreta húmeda.

$m_{biol} + m_{biosol}$: Masa del sustrato efluente.

Todas las cantidades representadas en el segundo miembro de la ecuación (3.4), son determinadas por medición directa. La densidad del biogás, está dada por la siguiente ecuación.

$$\rho_{biogás} = \frac{m_{biogás}}{V_{biogás}} \quad 3.5$$

En esta ecuación, el valor del volumen del biogás $V_{biogás}$, está determinado también por medición directa proporcionada por el gasómetro.



Figura 11. Biogás obtenido de excreta vacuno.

Se realizó el análisis físico-químico en laboratorio de los substratos afluente y efluente, para determinar y cuantificar las componentes del material, como demanda química de oxígeno (DQO), contenido total de carbono, nitrógeno, materia orgánica y otros. Los resultados de este análisis permitieron determinar la cuantificación del carbono del contenido en el biogás.

3.5.2. Parámetros fundamentales que influyen en la producción de metano: pH y temperatura de fermentación

Los parámetros fundamentales de operación registrados en el biodigestor, durante la fermentación del substrato para la producción de biogás fueron:

El potencial de hidrogeno pH, debe mantener en un valor neutro que se encuentra entre 6,5% a 7,5 % durante el proceso de digestión, el cual se ha monitoreado con un medidor de pH digital durante el proceso y el registro de los datos se adjunta en el anexo 2; según (Reyes, 2017), valores bajos de pH pueden inhibir la actividad de las archaeas metanogénicos, dando como resultado una baja producción de metano.

La temperatura de fermentación, denominado como temperatura de trabajo en el interior de digestor, fue en el rango mesofílico, este rango fue escogido por su facilidad de control de los cambios bruscos repentinos, la variación de temperatura en el rango mesofílico no tiene mucho efecto sobre la concentración de metano producido, mientras que altas temperaturas favorecen una mayor producción de metano pero cambios bruscos repentinos alteran el desarrollo de los microorganismos metanogénicos (Reyes, 2017),.

3.5.3. Beneficios que genera la tecnología de digestión anaerobia

La tecnología de la digestión anaeróbica de la excreta de vacuno para la producción de metano, genera beneficios ambientales y económicos.

- **Ambientales:**

El uso de biogás obtenida de estiércol de vaca evita la emisión descontrolada de metano proveniente de la producción animal e incremento de concentración de CO₂ en la atmósfera producido por el uso de combustibles fósiles (S.A., 2007).

El almacenamiento hermético de los estiércoles y purines, reduce la emisión a la atmosfera del amoniaco y óxido nitroso, mejorando la absorción de nitrógeno realizada por los cultivos al aplicar el digestado como abono (INDAP, 2016).

Los compuestos orgánicos que producen malos olores, durante su descomposición se degradan y eliminan del ciclo de nutrientes durante el proceso de digestión anaerobia, por lo tanto mitiga la contaminación del aire (FAO *et al.*, 2011).

A mayor tiempo de retención hidráulica de los estiércoles sometidos a digestión anaerobia, incrementa la concentración de amonio (NH_4) y la probabilidad de ser transformado a nitrato (NO_3^-) que es fácilmente absorbido por la planta y evita la contaminación de las napas freáticas, a diferencia del uso de estiércol animal o purín sin tratamiento como fertilizante orgánico genera contaminación del aire y de napas freáticas (Arrieta-Palacios, 2016).

El tratamiento de los estiércoles con la tecnología de digestión anaerobia, las semillas de malezas son degradadas en gran porcentaje. Por lo tanto, el uso el digestado como fertilizante orgánico podrá reducir la aplicación de herbicidas al ciclo reproductivo de las malezas (INDAP, 2016).

- **Económicos:**

El biogás producido tiene un valor comercial como combustible, que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica y/o térmica o su venta directa como gas en sustitución de combustibles fósiles (Energías Renovables no convencionales, 2012). El digestado biosol contiene cantidades importantes de los nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, como principales fertilizantes para la agricultura que mejora la calidad del cultivo, su aplicación como abono puede ocasionar un significativo ahorro en los costos de fertilización para la actividad agrícola y la demanda química de oxígeno (DQO) reducido mayor al 70% puede ser útil para alimentos de otros animales como patos y chanchos. En consecuencia, el poblador dedicado a la actividad agropecuaria puede tener ingreso económico por la venta del fertilizante (Energías Renovables no convencionales, 2012).

3.5.4. Balance de masa

El material de entrada en el biodigestor bidón es una mezcla de 8,9 kg de excreta fresca de ganado vacuno con 26,70 kg de agua sin potabilizar, siendo una mezcla total de 35,60 kg, al cual se le denominó sustrato. Después de un tiempo de retención de 45 días, se ha producido metano contenido en biogás y una sustancia llamada efluente, que consta de biol + biosol. Este resultado se muestra en el siguiente diagrama (figura 12).

La materia prima utilizada en el trabajo de investigación fue excreta fresca de ganado vacuno, cuyo contenido de sólidos totales es el 17% (Matí-Herrero,2008), por lo tanto, para el balance de masa se consideran 1,513 kg en sólidos totales de excreta como material afluente, el resultado de la digestión anaeróbica para un tiempo de retención de 45 días es biogás y sustancia efluente que consta de biol + biosol (Carhuancho *et al.*, 2012).

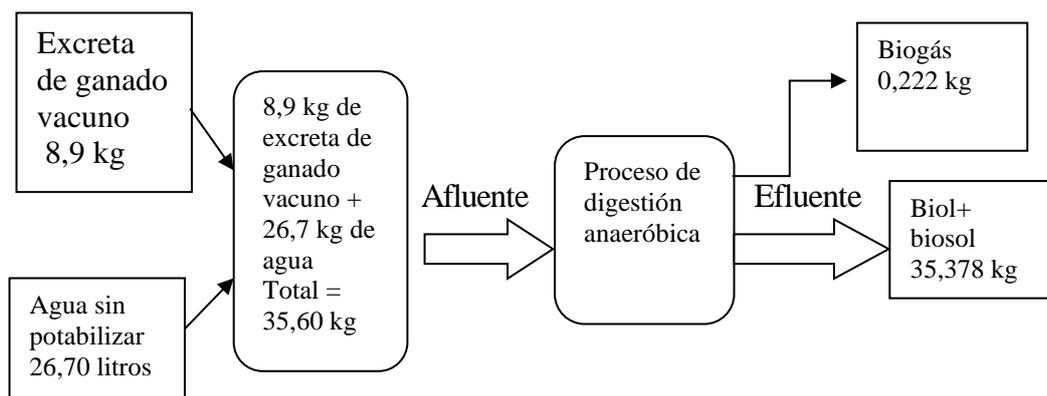


Figura 12. Diagrama de balance de materia

3.5.5. Características del efluente

La materia o sustrato después del proceso de digestión anaeróbica se denomina efluente, que está compuesta de dos partes; la parte líquida llamado biol y la parte sólida llamada biosol, se ha sometido al análisis bioquímico en laboratorio, para determinar la degradación de los componentes al producir metano, la masa de la sustancia efluente se ha calculado mediante el balance de materia obteniendo aproximadamente 35,378 kg y para obtener la masa del biogás se ha utilizado la

ecuación 3.5; también se han realizado las mediciones de los parámetros de temperatura, pH y la temperatura de la sustancia efluente.

3.5.6. Equipos e instrumentos

Durante el desarrollo del trabajo de investigación, se realizaron mediciones de las propiedades físicas y químicas de la sustancia orgánica que se somete a la digestión anaeróbica en el biodigestor, utilizando equipos e instrumentos de medición como sensores de pH, temperatura, metano (CH_4), bióxido de carbono (CO_2), balanza analítica, fórmulas físicas y otros que se mencionan en la tabla 13.

- **Propiedades físicas**

Para cuantificar las propiedades físicas de medición directa se registraron datos de temperatura mediante el uso de los sensores, colocadas en el interior del digestor y en el interior del invernadero, el volumen del biodigestor es determinado mediante el contenido de agua, las otras propiedades físicas, como la densidad se obtienen por el método de medición indirecta, el cual consiste en utilizar ecuaciones matemáticas que describen las propiedades físicas cuantificadas en forma directa y otras cantidades físicas que se consideran constantes físicas ya determinadas en otros trabajos realizados anteriormente.

- **Propiedades químicas**

Las propiedades químicas fueron cuantificadas mediante uso de instrumentos de medición directa, el grado de acidez (pH) y la conductividad de la sustancia orgánica con el pH-metro o sensor de pH, la demanda química de oxígeno (DQO) a través de la técnica de validación analítica, en el cual se emplean reactivos químicos e instrumentos de laboratorio químico.

Las especificaciones de la medición cuantitativa y cualitativa de las propiedades físicas y químicas durante las diferentes etapas del proceso, se especifican en la tabla 13, y los instrumentos utilizados para las mediciones correspondientes, se muestran en las fotografías de la figura 13.

Tabla 13

La medición de las Propiedades Físicas y Químicas.

Propiedades		Instrumentos, materiales y medios	Técnicas de medición	Valores medidos
Físicas	Temperatura	Sensor de temperatura	Directa	Cuantitativo
	Masa	Balanza analítica	Directa	Cuantitativo
	Densidad	Fórmulas físicas	Indirecta	Cuantitativo
	Volumen	Fórmulas físicas	Indirecta	Cuantitativo
Químicas	pH	Sensor de pH	Directa	Cuantitativo
	DQO	Reactivos químicos	Directa	Cuantitativo
	Carbono total (C)	$(K_2Cr_2O_7, Ag_2SO_4)$		
	Nitrógeno (N ₂)			



Figura 13. Fotografía de instrumento de medición (SPARK PS-2008 y sensores).

3.5.7. Prueba estadística inferencial

El ajuste de regresión lineal como prueba de hipótesis, se aplicó a los resultados obtenidos de la producción de metano, parámetros de pH y temperatura de trabajo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la producción de gas metano de la excreta de ganado vacuno, mediante la digestión anaerobia, se obtuvieron como resultado el biogás aproximadamente de $(184,87 \pm 1,09)$ L, en el anexo 1 se muestra los resultados de la producción de biogás en tres biodigestores de las mismas características, en los anexos 10 y 11 se adjuntan las figuras que muestran la producción del biogás en cada biodigestor.

En la figura 14, se muestra la producción de biogás que se ajusta mediante regresión lineal obteniendo a la tendencia lineal con pendiente 5,8745 y $R^2=0,9856$.

La ecuación 4.1 ilustra la relación entre la producción de biogás y el día de la fermentación. En esta ecuación se aprecia que fue significativa ($p < 0,05$), con una alta bondad de ajuste ($R^2 = 0,9855$).

$$y = 5,875x - 76,6 \quad 4.1$$

Dónde: y , producción de biogás; x , día de fermentación.

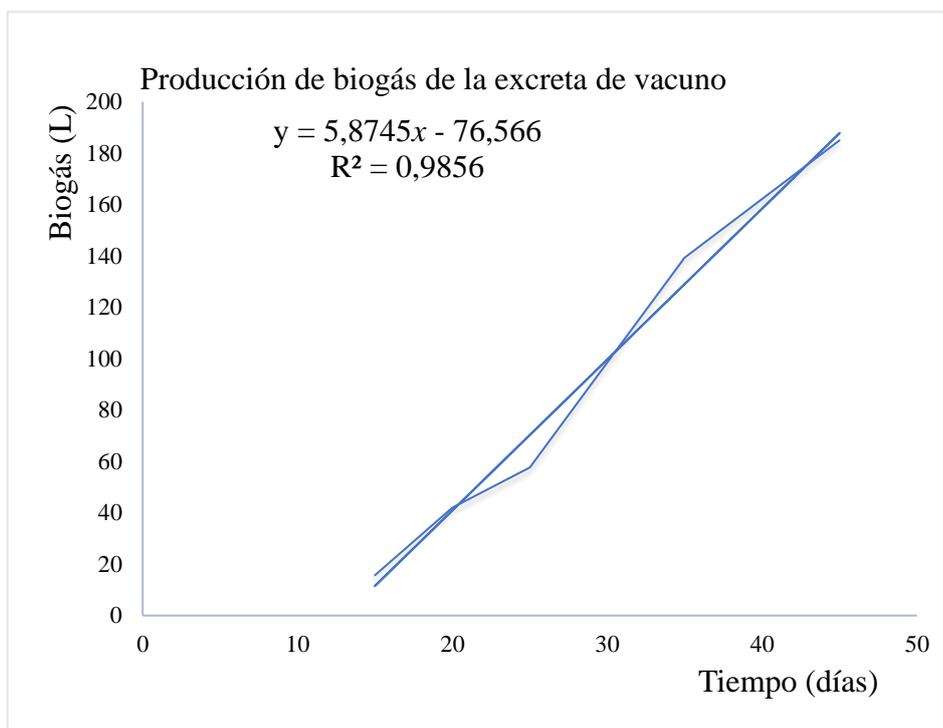


Figura 14. Producción de metano

La temperatura promedio en el interior del digestor, se muestra en la tabla 17 y en la figura 18, al realizar el ajuste lineal se obtiene una pendiente muy pequeña con $R^2=0,143$, cuyo valor promedio fue de $31,20 \pm 0,5$ °C (anexo 2) y sin cambios bruscos durante el proceso, este parámetro se encuentra en el rango mesofílico, y el potencial de hidrógeno pH se ha mantenido neutro con valor promedio de 6,98, los factores de agitación manual y aislamiento térmico del biodigestor fueron importantes para mantener la estabilidad de la temperatura de trabajo y potencial de hidrogeno (pH).

La sustancia efluente de aproximadamente 32,05 L, tiene una demanda química de oxígeno, reducido en 74% con respecto a la sustancia no digerida. En las tablas 14 y 15 se muestran los resultados de la digestión anaeróbica, el gas metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) y en la tabla 17 se muestran las mediciones de temperatura de trabajo y pH como parámetros fundamentales del proceso de digestión anaerobia.

Por otra parte, el resultado del análisis físico químico de las sustancias afluente y efluente se muestran en la tabla 16 y en la figura 15 se muestra la combustión del producto biogás.

Tabla 14

Resultados de la Digestión Anaeróbica.

Biodigestor	Sustancia	Densidad (kg/m ³)	Volumen (x10 ⁻³ m ³)	Masa (10 ⁻³ kg)	Temperatura (°C)	pH
Bidón	Biogás	1,2	185	222	--	--
	Biol +	1100	32,052	35258	31,0°C	7,35
	Biosol					

Tabla 15

Valores de metano (CH₄) y dióxido de carbono CO₂, a los 30 días del proceso.

Tiempo (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
CO₂ (%)	32,1	31,2	30,5	30,9	30,1	31,1	31,6	29,8	31,1	31,1	32,1
CH₄ (%)	62,0	63,0	63,5	63,6	63,9	60,0	63,2	61,1	60,1	61,2	61,2
Promedios(x±s) CH ₄ = 62,07%±1,43 y Promedio CO ₂ = 31,05%±0,73											

Tabla 16

Características Físico-químicas de la Sustancia Afluente y Efluente.

Componentes	Materia orgánica	Carbono total (C)	Fosforo total (P)	Nitrógeno (Org. Amoniacal, NK)	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	(C/N)
Afluente	82,76%	48,12%	9,95%	1,42%	230 mg/L	33,88
Efluente	84,37 %	49,05%	8,92%	1,33%	59,93 mg/L	36,88

Fuente: Laboratorio de Ingeniería Química (U.N.A.- PUNO, 2018).



Figura 15. Fotografía de combustión del biogás.

Tabla 17

Variación Promedio de pH y Temperatura de Trabajo (T_{diges}).

Tiempo (días)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	Prom	Máy	Mín
pH	7,10	7,14	7,12	7,30	6,92	7,02	6,82	6,72	6,67	6,98	7,30	6,67
T_{diges}	31,10	30,50	31,20	32,10	31,60	30,90	32,10	31,20	30,10	31,20	32,10	30,10

4.1 Producción de metano

La producción de metano (CH_4) de la excreta de ganado vacuno fue obtenida mediante tecnología de digestión anaeróbica, en la tabla 18 se aprecia el procedimiento seguido del objetivo, la figura 16 obtenida de la tabla 15 muestra los resultados de la medición del metano (CH_4) y bióxido de carbono (CO_2).

Tabla 18

Características de Afluente y Efluente del Substrato en el Biodigestor

Sustancia sometida al proceso de digestión (Afluente)	Excreta	Masa (kg)	8,9
		Densidad (kg/m ³)	1199,50
	Agua	Masa (kg)	26,70
		Densidad (kg/m ³)	1000,00
Mezcla	Masa (kg)	35,60	
	Densidad (kg/m ³)	1043,37	
Sustancia digerida	Biogás	Masa (g)	222
		Densidad (kg/m ³)	1,2
	biol+biosol (efluente)	Masa (kg)	35,26
		Densidad (kg/m ³)	1100,00

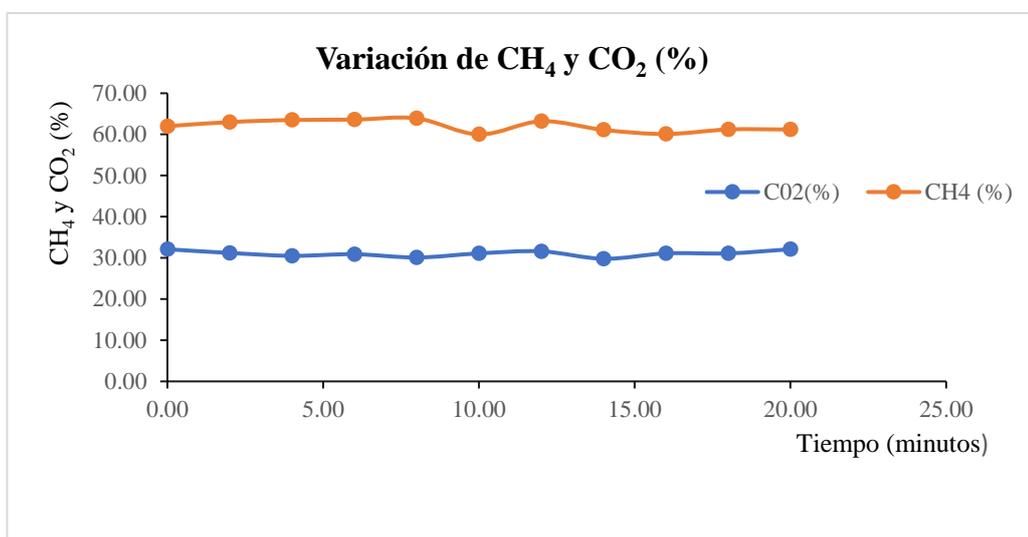


Figura 16, Concentración de CH₄ y CO₂, a los 30 días del proceso.

4.1.1. Cuantificación de la producción de metano

Para la cuantificación de la producción del metano de la excreta de ganado vacuno, se ha procedido de dos formas: Directamente con el sensor metano y mediante

procedimiento teórico con los resultados de análisis físico químico de las muestras y balance de materia.

(a) Cuantificación directa.

Mediante medición directa con el sensor Sampling Data-Looger CM-0191 50%CO₂ y 100%CH₄. Los resultados se muestran en la tabla 15 y en la figura 16.

(b) Cuantificación mediante balance de materia.

Para la cuantificación mediante balance de materia, se recurre al análisis físico químico del substrato afluente y efluente que se han realizado en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería química de la Universidad Nacional del altiplano Puno, cuyos resultados se muestran en la tabla 16, en el anexo 12 se adjunta el certificado de análisis fisicoquímico.

Utilizando los resultados de la tabla 16, se recurre al contenido de carbono en sustrato afluente y efluente, según (Martí, 2008), la excreta fresca de ganado vacuno contiene 17% de sólidos totales, la misma que fue utilizada en una cantidad de 8,9 kg de masa, aporte de 1,513 kg de sólidos totales ($8,9 * 0,17 = 1,513 \text{ kg} = 1513 \text{ g}$), la masa del biogás fue de 222 g, mediante balance de masa, los sólidos totales del efluente es la diferencia ($1513 - 222 \text{ g} = 1291 \text{ g} = 1,291 \text{ kg}$), mediante los resultados del análisis fisicoquímico del laboratorio dados en las tablas 16, la cantidad de carbono que contienen los sólidos totales afluente y efluente son 48,12% y 49,05%, respectivamente. La tabla 19, muestra la masa total de carbono que contiene el biogás.

Tabla 19

Contenido de Carbono en el Substrato

Masa de Afluente(g)	Masa de Efluente(g)	Masa de carbono en Afluente(g)	Masa de carbono en Efluente(g)	Masa de carbono en biogás (g)
1513	1291	728,06	633,24	94,82

Para la determinación del porcentaje de metano CH₄ y CO₂ en el biogás, se utiliza masas molares de CH₄, CO₂ y N₂, contenido en el biogás.

Las masas molares de CH₄, CO₂ y N₂ son respectivamente 16 g/mol, 44 g/mol y 28 g/mol. Efectuando cálculos numéricos para 59,40% de CH₄ y 34,60% de CO₂ y 6% de N₂ y otros gases, se obtiene el valor de la masa de carbono aproximadamente de 94,82 g. El procedimiento del cálculo se adjunta en el anexo 3. El porcentaje de metano obtenido mediante el balance de materia, es más teórico y los resultados son aproximados, debido a que no se tiene la cuantificación de otros gases que contienen el substrato efluente y afluente.

La tasa de producción del biogás definida como volumen total del biogás entre la masa de la sustancia orgánica que la produce, se simboliza por σ .

$$\sigma = \frac{V_{biogás}}{M_{exc}} \quad 4.1$$

Donde $V_{biogás}$ es el volumen del biogás producido y M_{exc} es la masa de la excreta húmeda del ganado vacuno sometido a la digestión anaeróbica.

Mediante la ecuación 4.1 se calcula la tasa de producción del biogás de la excreta del ganado vacuno de la región altoandina, especialmente en la región del altiplano – Puno. Para 185 L de biogás aproximadamente, corresponde 8,9 kg de excreta de ganado vacuno, la tasa de producción del biogás es igual 20,79 litros/kg. En la tabla 20 se muestra las características del biogás obtenido mediante medición directa.

Para calcular el contenido energético del metano contenido en el biogás, se procede de la siguiente manera:

El calor de combustión del metano (CH₄) a condiciones estándar de presión y temperatura es de 890,71 kJ/mol (Pittam y Pilcher, 1972). Considerando que 1kcal=4,184 kJ (Hargrove, 2006), el calor de combustión del metano es de 212,885 kcal/mol. Un mol de cualquier gas en condiciones estándar de temperatura y presión estándar (273,15 K, 0°C o 32°F; 760 mm Hg o 1 atm) ocupa 22,4 L de volumen molar (Helmenstine, 2021). La ley de Boyle establece que, a temperatura constante, el volumen de una masa de gas varía inversamente con la presión, y la presión atmosférica varía en relación inversa con la altitud (West, 1996). A partir de los datos de la NASA se ha generado la siguiente ecuación

polinómica, a fin de calcular la presión atmosférica (y , mmHg), en función de la altitud (x , m):

$$y = 2 \times 10^{-6} x^2 - 0,0811x + 752,78 \quad (R^2 = 0,9995)$$

A partir esta ecuación, para $x = 3812$ m de altitud (nivel del lago Titicaca), la presión atmosférica disminuye a 472,7 mm Hg.

Para comparar las condiciones cambiantes de un gas según el cambio de la presión y temperatura, se utilizó la Ley de Boyle, en donde la presión y volumen inicial, fueron representados por P_1V_1 , después de realizar el cambio, la presión y el volumen final se representaron por P_2V_2 (West, 1999). La relación matemática de la Ley de Boyle, con inclusión de la temperatura (González, 2020), se convierte

en: $\frac{PV_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$, A nivel del mar, $P_1=760$ mmHg de presión constante y $T_1=273,15$

K (0°C) de temperatura constante, 1 mol de cualquier gas ocupa un volumen de $V_1=22,4$ L. A una altitud de 3812 m (nivel de lago), donde la presión atmosférica desciende a $P_2 = 472,7$ mmHg y la temperatura del aire fue de 16°C ($T_2 = 289,15$ K), 1 mol de gas ocupa 38,124 L (Anexo 4).

El volumen de biogás obtenido fue de $184,87 \pm 1,09$ L, conformado por $62,07 \pm 1,24$ % de metano (CH_4) y $31,05 \pm 0,53$ % de dióxido de carbono (CO_2) en volumen, lo que significa 114,75 L de CH_4 , 57,40 L de CO_2 y 12,72 L de otros gases. El procedimiento de cálculos se adjunta en el anexo 2. A partir de los resultados se indica que el biogás obtenido de estiércol de vacunos tiene un contenido de energía de $3,466$ Mcal/ m^3 , correspondiente al 62,07% de metano, lo cual es mucho menor a la energía obtenida en el biogás de estiércol de cuyes, con $6,527$ Mcal/ m^3 , correspondiente a 72,3% de metano (Palacios *et al.*, 2020), por otra parte el metano puro tiene un valor calorífico de 9100 kcal/ m^3 en $15,5^\circ\text{C}$ y 1 atm. El valor calorífico del biogás, donde el metano forma parte del producto, varía desde 4800 hasta 6900 kcal/ m^3 (Semán *et al.*, 2019). La magnitud del valor depende de la concentración de metano. En términos de equivalentes energéticos, $1,33 - 1,87$, y $1,5 - 2,1$ m^3 de biogás son equivalentes a un litro de gasolina y combustible diesel, respectivamente. El biogás de estiércol animal crudo contiene 55 - 65 % de metano (CH_4), 30 - 45 % de dióxido de carbono (CO_2), trazas de

sulfuro de hidrógeno (H_2S) e hidrógeno (H_2) y fracciones de vapor de agua, con un valor calorífico de 20-26 MJ/m^3 (537-700 Btu/ft^3) en comparación con el valor calorífico del gas natural de calidad comercial de 39 MJ/m^3 (1028 Btu/ft^3) (Admin, 2019).

Tabla 20

Características Generales del Biogás obtenido

Propiedades	Valores estimados
Composición (%)	62,07% de CH_4 y 31,05 % de CO_2 .
Tasa de producción (m^3/kg)	0,02079
Olor (en el momento de combustión)	Imperceptible

Tabla 21

Razón de metano y bióxido de carbono (CH_4/CO_2).

CH_4 (%)	62,0	63,0	63,5	63,6	63,9	60,0	63,2	61,1	60,1	61,2	61,2
CO_2 (%)	32,1	31,2	30,5	30,9	30,1	31,1	31,6	20,8	31,1	31,1	32,1
CH_4/CO_2	1,93	2,02	2,08	2,06	2,12	1,93	2,00	2,05	1,93	1,97	1,91

La figura 16 muestra que la concentración del metano (CH_4), con valor promedio de 62,07% y mediante el balance de materia se ha obtenido 59,4%, ambos valores se encuentran dentro del intervalo que 55 a 70 %, su poder calorífico se encuentra entre 3,58 y 7,17 $Mcal/m^3$ (Pannucharenwong *et al.*, 2017). Bajo condiciones de pH neutro y temperatura mesofílica óptima (35 °C) promedio en el mismo tiempo, el poder calorífico se encontraría superior a los 7,93 $Mcal/m^3$ (Unpaprom *et al.*, 2021, Kulkarni y Ghanegaonkar, 2019 y Bond y Templeton, 2011). Otro criterio específico que se utiliza para determinar el poder calorífico del biogás es la relación metano bióxido de carbono ($R=CH_4/CO_2$) (Gheorghe *et al.*, 2017), en donde para $R= 0,71$, corresponde 3,44 $Mcal/m^3$ de poder calorífico, tomando este criterio, los resultados de la tabla 21 indican que el poder calorífico de biogás obtenido en el presente experimento, se encuentra en un valor mayor a 9,08 $Mcal/m^3$, lo que indica que el biogás es de buena calidad, constituyendo a la excreta de ganado

vacuno en materia prima potencial para la obtención de biogás mediante digestión anaeróbica. El biogás con más de 60% de metano, siempre contiene sulfuro de hidrógeno (H_2S) que se elimina con una esponja de hierro para evitar el deterioro de las componentes de conducción del biogás por corrosión (Barrera-Cardoso *et al.*, 2020). El ganado rumiante es la fuente de emisiones de metano, su estiércol que produce metano, depende de la forma física de las heces, cantidad de material digestible, clima y del tiempo que permanecieron intactas (Broucek, 2014).

La excreta del ganado vacuno como fuente de emisión de metano (CH_4) que genera efecto invernadero (GEI) a nivel mundial (Vijn *et al.*, 2020), está considerado como uno de los desechos orgánicos más abundantes que amenaza al mundo, que contamina el agua, recursos agrícolas y genera malos olores, pero presenta muchas propiedades de utilidad de producción de biogás como energía renovable y biofertilizantes, mediante métodos bioquímicos como la digestión anaeróbica (Editors, 2020), el almacenamiento del estiércol contribuye 28 veces más que CO_2 al calentamiento global (Grossi *et al.*, 2019), como estrategia efectiva más viable y sostenible (Kumari *et al.*, 2020) de mitigar de estos gases del sistema ganadero (Shree *et al.*, 2016) es mediante la tecnología de digestión anaeróbica que recupera en forma de biogás y fertilizante en el ámbito rural (García *et al.*, 2019) y proporcionar la oportunidad de desarrollar modelos comerciales dinámicos y fluctuantes de uso de biogás (Heiker *et al.*, 2021).

El metano es un potente gas de efecto invernadero, cuya fuente de emisiones antropogénicas en todo el mundo de este gas es el ganado rumiante, como resultado natural e inevitable de la fermentación ruminal. La producción de CH_4 se debe a los factores de nivel de ingesta, consumo de tipo de calidad de alimentos, tamaño del animal, tasa de crecimiento, nivel de producción y la temperatura ambiental, y el estiércol animal produce metano que depende de la forma física de las heces, cantidad de material digestible, clima y de tiempo que permanecieron intactas (Broucek, 2014).

La tecnología de digestión anaerobia mediante biodigestores, es una opción ecológicamente racional que proporciona fuente de energía limpia y barata, que genera beneficios ambientales para la sociedad mediante el uso de biogás como fuente de energía renovable (Fatin y Kalsum, 2021), para la cocina y generación

de electricidad (Haryanto *et al.*, 2018), como energía limpia renovable que contribuye a la mitigación del cambio climático, la contaminación y la inseguridad energética (Indrawan *et al.*, 2018).

4.2. Parámetros que influyen en la producción de metano

Los parámetros que influyen en la digestión anaeróbica para la producción de metano son fundamentalmente, factor pH y la temperatura.

4.2.1. Potencial de hidrogeno (pH)

El valor de pH en el proceso de digestión anaerobia para la producción de metano se muestran en la tabla 22 y en la figura 17, donde se encontraron valores, máximo de 7,30, mínimo de 6,67 y promedio 6,98, significa que el proceso se ha desarrollado con pH neutro, generando óptima de tasa de biometanización, debido a que la desintegración y la hidrólisis no llegaron a completarse, ya que tardan mucho tiempo en el proceso (Esposito *et al.*, 2012).

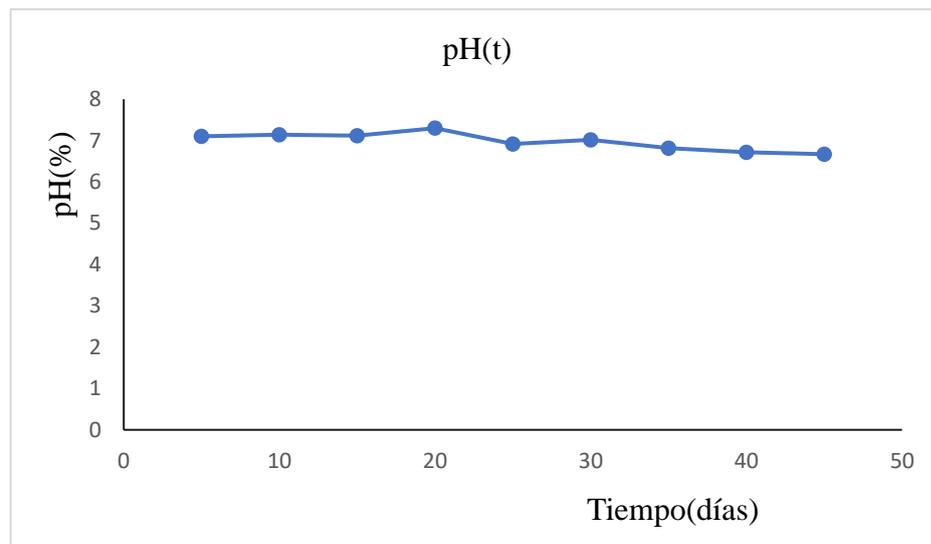


Figura 17. Variación de pH durante el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 22

Variación promedio de pH.

Tiempo (días)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	Prom	Máx	Mín
pH	7,10	7,14	7,12	7,30	6,92	7,02	6,82	6,72	6,67	6,98	7,30	6,67

La fermentación anaerobia de estiércol de vaca a 6,7 de pH ha generado biogás con 59,12% de metano (Kalsum y Muchtar, 2020). Según (Castro *et al.*, 2020), la digestión anaeróbica para la producción de biogás de residuos sólidos orgánicos el parámetro pH esta entre 6,5 y 7,5, lo que permite el óptimo crecimiento de los microorganismos metanogénicos (Haryanto *et al.*, 2018), en la digestión anaeróbica, la temperatura y pH son fundamentales, para la fase termofílica el pH aumenta, en algunos casos superan el rango óptimo y el proceso trunca su desarrollo (Moset *et al.*, 2015).

4.2.2. Temperatura de trabajo

La temperatura es el otro parámetro que condiciona el proceso de digestión anaeróbica para la producción de metano, la tabla 23 muestra los datos promedios obtenidos en 24 horas y en la figura 18 se muestra la variación con el tiempo, donde los valores fueron máximo de 32,10 °C, mínimo de 30,10 °C y promedio de 31,2 °C, (anexo 5) el ajuste lineal indica que la pendiente es 0,01774, punto de intersección de 30,946 y $R^2 = 0,1453$, la medición se ha realizado cada 5 días hasta completar los 45 días, los datos se adjuntan el anexo 5, en la figura 18 se puede observar que este parámetro se ha mantenido casi constante. Una temperatura en el proceso de digestión anaeróbica comprendido entre 30 °C y 40 °C, corresponde al rango mesofílico (Criollo, 2017, Reyes, 2017), donde se logra mayor producción de biogás a partir de estiércol de vaca, debido a la presencia de bacterias materiales degradables y carbohidratos necesarias para la fermentación (Achinas *et al.*, 2018); en la digestión anaeróbica para la producción de biometano, se produce la mejor la transferencia de los electrones entre especies en comunidades microbianas a temperaturas mesofílica y termofílica (Lin *et al.*, 2018); la producción de metano de la excreta de vaca en un sistema batch, completa la digestión anaeróbica a temperatura mesofílica de 31,20 °C en 45 días (García *et al.*, 2020, Ukpai y Nnabuchi, 2012), si no se tiene cambios bruscos durante 24 horas, no se genera desestabilización del proceso (Martí, 2006), el sistema de agitación fue importante para homogenizar mezcla y temperatura (IDAE y Energía, 2007), aislamiento térmico del biodigestor y el invernadero permitieron la generación de un microclima en su interior (Lenscak y Iglesias, 2019) y mantener el sustrato en rango mesofílico durante el proceso de digestión anaeróbica para la producción de metano.

Tabla 23

Temperatura de trabajo (T_{diges}).

Tiempo (días)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	Prom	Máx	Mín
T_{diges} (°C)	31,1	30,5	31,2	32,1	31,6	30,9	32,1	31,2	30,1	31,2	32,1	30,1

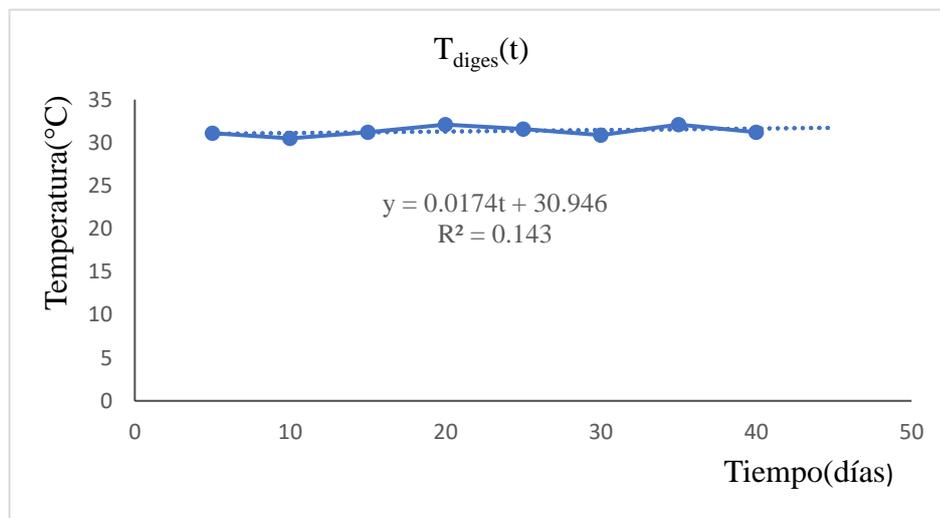


Figura 18. Temperatura promedio en el interior del biodigestor.

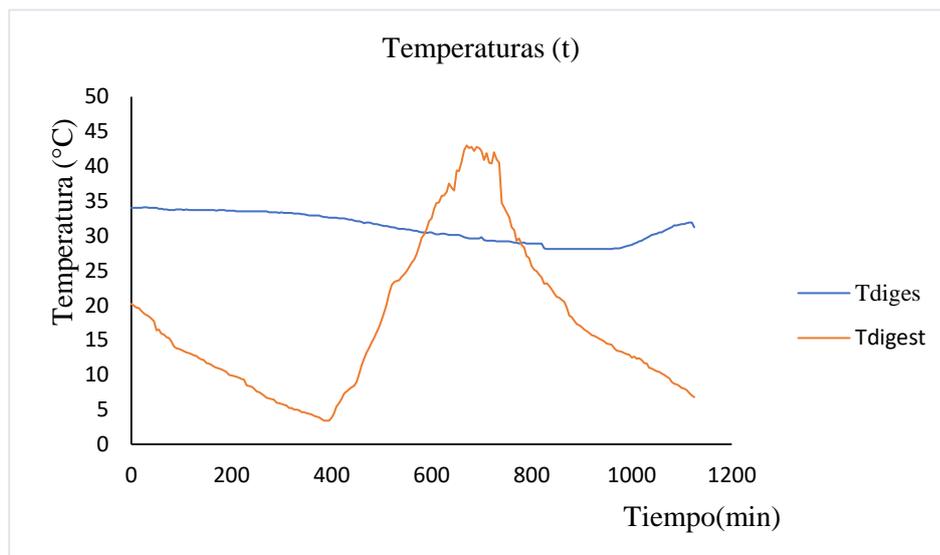


Figura 19. Temperaturas (T_{diges}) e invernadero (T_{inv}) durante 24 horas.

La figura 19 muestra la variación de las temperaturas en el interior del invernadero y en el interior del digestor o temperatura de trabajo durante 24 horas. Esto nos muestra que a pesar de que la temperatura en el interior del invernadero ha sufrido cambios bruscos, la temperatura de trabajo se ha mantenido sin mayores cambios. Los datos de temperatura durante 24 horas, cada 5 días en el interior del biodigestor se adjuntan en el anexo 5, y los datos de temperatura en el interior del invernadero se adjunta en el anexo 6.

4.2.3. Relación ente Carbono Nitrógeno (C/N)

En la tabla 16 se observa que este parámetro para las sustancias afluyente y efluentes son 33,88 y 36,88, respectivamente.

La relación C/N debe de estar comprendida entre 15 y 45 siendo el valor recomendable 30, para un valor mayor a 35 la descomposición de la materia orgánica es muy lenta por falta de nitrógeno y para un valor menor a 8 se inhibe la actividad bacteriana por exceso de amonio considerado como tóxico para los microorganismos metanogénicos (MINENERGIA /PNUD/FAO/GEF, 2011), el mejor rendimiento de metano mediante la digestión anaeróbica a pH estable y NH_3 libre, se encuentra para las relación C/N= 30 (Wang *et al.*, 2012), y con respecto al sustrato efluente con C/N=36,88, se puede indicar que la materia orgánica se descompone muy lentamente por escasa cantidad de energía para su descomposición o ha terminado este proceso (Núñez, 2017).

4.3. Rentabilidad ambiental y económica que genera la tecnología de digestión anaeróbica

La tecnología de la digestión anaeróbica de la excreta de vacuno para la producción de metano, mediante biodigestor sistema batch, genera rentabilidades en beneficios ambientales y económicos.

4.3.1. Beneficios ambientales

El metano obtenido mediante tecnología de digestión anaeróbica, es una energía limpia y renovable, cuya utilización evita la tala indiscriminada de bosques que genera desequilibrio en la naturaleza por la deforestación (Knapp *et al.*, 2014),

humaniza el trabajo de las personas dedicadas a la actividad agropecuaria al utilizar biogás en sustitución leña y bostas para la cocción de alimentos.

Los propietarios de 4 ó 5 bovinos de 200 kg peso vivo netamente de pastoreo, tienen excretas acumuladas aproximadamente entre 16 kg a 20 kg en los alrededores del establo (calculado mediante la ecuación 3.2) durante el tiempo de permanencia del ganado, generando malos olores y contaminación (Savran *et al.*, 2012) a los terrenos circundantes por filtración en épocas de lluvia, esto afecta la salud de otros animales y personas. En el procesamiento de esta materia orgánica en el biodigestor a una temperatura mayor a 25°C (mesófilico) y pH ligeramente neutro (Ukpai y Nnabuchi, 2012), los microorganismos que abundan en la excreta, en algunos casos son eliminados por completo, este hecho evita la propagación de microorganismos infectocontagiosos como el tétano para las personas y phasiola para los bovinos, de esta manera, la biotecnología anaeróbica juega un papel importante en el control de la contaminación, para la obtención de recursos como energía y productos con valor agregado (FAO,2011, Guardado, 2006).

Si cada ganado tiene peso vivo de 200 kg, de alimentación de pastos naturales y son exclusivamente de pastoreo, generaría excreta de aproximadamente 4 kg de uno (Martí, 2008), se requiere 02 bovinos para producir 166 L de biogás con 62,07% de metano que equivale a 103 L de metano, en toda la región de Puno la emanación del metano de origen bovino sería aproximadamente 32 m³; la producción de biogás a partir de estiércol bovino tiene el propósito del aprovechamiento energético y la obtención de un biofertilizante para la agricultura (MINENERGIA /PNUD/FAO/GEF, 2011). El aprovechamiento energético de metano a partir de la excreta animal, mitigaría la contaminación del medio ambiente y, el uso de biol y biosol mejoraría la producción agrícola en la región altoandina.

Sí 1000 L de biogás abastece para cocinar tres comidas durante 6 horas para 6 personas, 2660,67 L es suficiente para la cocción de alimentos para una familia de más de 6 miembros.

El uso de biogás obtenida de estiércol de vaca, evita la emisión descontrolada de metano proveniente de la producción animal, recuperando los recursos biológicos de alto valor considerados como desechos, reducir la dependencia de recursos

naturales finitos y conservación del ecosistema (Wainaina *et al.*, 2020). En general, el biogás es un recurso energético renovable, que puede ser utilizado como combustible para generar electricidad, calor y energía mecánica, proveniente desde fuentes renovables como residuos agropecuarios, agroindustriales y municipales, entre otros, desempeñando un papel importante en la mitigación de gases de efecto invernadero (Reyes, 2017).

El almacenamiento hermético de los estiércoles y purines, para la producción de biogás fermentación anaeróbica, es un recurso renovable significativo para reducir malos olores de los compuestos orgánicos durante su descomposición, genera energía eléctrica en áreas rurales contribuyendo a la implementación de políticas ambientales y sociales (Freitas *et al.*, 2019) y la biodigestión anaeróbica a temperatura ambiente, en una proporción estiércol-agua 1:3 (para 1 kg de estiércol 3 L de agua) a parte de la obtención de biogás, se obtiene efluente con menor emanación de malos olores que no atrae moscas, compuesto de biol y biosol. El biol estabilizada se utilizada en irrigación como foliador y el biosol como fertilizante para cultivos (León *et al.*, 2019).

La tecnología de digestión anaeróbica para la producción de metano del estiércol vacuno, mitiga la emisión de gases de efecto invernadero, causado por el ganado de aproximadamente el 19% del calentamiento total de todas las fuentes antropogénicas y al mismo tiempo genera desarrollo económico y ambiental sostenible, implicando la gestión de residuos sólidos y producción de energía renovable (Vasco *et al.*, 2019), como una forma de recuperar los recursos biológicos de alto valor considerados como desechos, reduciendo la dependencia de recursos naturales finitos y conservación del ecosistema (Wainaina *et al.*, 2020), elimina los contaminantes patógenos en porcentaje desde el 65% al 100% en algunos casos (Jose y Reina, 2020).

El aprovechamiento energético de metano obtenido mediante el proceso de digestión anaerobia, mitiga la contaminación del medio ambiente, el calentamiento global por efecto invernadero por el gas metano 20 a 30 veces mayor que el CO₂ (Bonilla Cárdenas y Lemus Flores, 2012), aunque las concentraciones son inferiores con respecto a CO₂, sin embargo posee efecto

contaminante 30 veces más que contribuye significativamente en el tiempo al cambio climático (Yáñez y Gualdrón, 2014).

En la región del altiplano Puno, 617163 cabezas de ganado bovino en su mayoría criollos y sus cruces, cuyos propietarios son pequeños ganaderos y comunidades campesinas (IV CENAGRO, 2012), la producción pecuaria contribuye ampliamente a las emisiones antropogénicas de metano, bióxido de carbono y óxido nitroso a la atmosfera, provocando el calentamiento de la superficie terrestre y destrucción de la capa de ozono, amenazando los ecosistemas (Black *et al.*, 2021), por sus características innatas de sistema digestivo aproximadamente el 18% del calentamiento global es del sector agrícola (Kinley *et al.*, 2020).

4.3.2. Beneficios económicos

La excreta fresca de ganado vacuno utilizada en este experimento fue de 8,9 kg, del cual se ha obtenido aproximadamente 0,222 kg de biogás, para producir 10 kg de biogás comprimido que contiene un balón de gas comercial requiere 400 kg de excreta, esta cantidad de biomasa, se puede obtener en 7 días, con 4 cabezas de bovino de 180 kg de peso vivo y fijo en el establo durante 24 horas, pero si es de pastoreo, que solo el 25% de la excreta se almacena en el establo, se obtendría en aproximadamente en 27 días. Este resultado puede ser poco rentable para comercializar el biogás en sustitución GLP, pero es altamente rentable cuando se trata de mitigar el calentamiento global generado por efecto invernadero de los gases metano (CH₄) y anhídrido carbónico (CO₂) proveniente del ganado bovino.

La tabla 24, muestra la producción estimada de biogás para un poblador que cuenta con 8 cabezas de ganado vacuno, de aproximadamente de 200 kg de peso vivo, fijo en establo durante 24 horas y exclusivamente de pastoreo. La cantidad de 185 L de biogás con contenido de metano mayor al 55%, acumula energía calorífica entre 0,96 kWh a 1,20 kWh (Deublein y Steinhauser, 2008), y un metro cúbico de biogás puede generar una energía eléctrica de 2,5 KWh (Uddin *et al.*, 2016), con 128 kg de excreta fresca se obtendría 2660,67 L de biogás, esta cantidad de biogás equivale a la energía calorífica acumulada entre 13,895 kWh a 17,294 kWh, el costo de la energía eléctrica en la región de Puno por 1kWh es de S/ 0,4908 nuevos soles (Anexo 12) (recibo de facturación de octubre de 2020, proporcionado por Electro Puno S.A), el poblador de la región altoandina de Puno

con 08 vacas de 200 kg de peso vivo y fijo en el establo, tendría un ingreso mensual entre S/.204,58 a S/. 254,64 al vender el biogás producido en sustitución de la energía eléctrica. La tabla 25 muestra la rentabilidad económica del uso de biogás comparado con la energía eléctrica en la ciudad de Puno, en el anexo 7 se muestran los detalles.

Tabla 24

Cantidad de Bovino que produce Excreta y Biogás en la Región Altoandina.

Cantidad de ganado vacuno de 200 kg de peso vivo promedio	Masa de excreta fresca acumulada (kg)		Biogás acumulado (L)	
	24 horas en el establo	Solo en la noche en el establo	24 horas en el establo	Solo en la noche en el establo
4	64	16	1330,34	332,58
6	96	24	1995,51	498,88
8	128	32	2660,67	665,17
10	160	40	3325,84	831,46
12	192	48	3991,01	997,75
15	240	60	4988,76	1247,19
20	320	80	6651,69	1662,92

Tabla 25

Rentabilidad Económica de Biogás comparado con la Energía Eléctrica.

Cantidad de vacuno	Excreta fresca acumulada (Kg)	Biogás (L)	Energía acumulada (kWh)	Rentabilidad económica mensual (S/).
4	64	1330,34	6,9473 – 8,6472	102,292 - 127,321
6	96	1995,51	10,421 – 12,971	153,438 - 190,982
8	128	2660,67	13,895 – 17,294	204,585 - 254,642
10	160	3325,84	17,368 – 21,618	255,731 - 318,303
12	192	3991,01	20,842 – 25,942	306,877 - 381,964
15	240	4988,76	26,052 – 32,427	383,596 - 477,455
20	320	6651,69	34,737 – 43,236	511,461 - 636,606

El biogás y el fertilizante producido de la excreta de bovino mediante digestión anaeróbica, tiene un valor comercial como combustible, que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica y/o térmica o su venta directa como gas en sustitución de combustibles fósiles.

El biogás es un recurso renovable significativo en la mitigación de problemas ambientales y la generación de energía eléctrica (Freitas *et al.*, 2019), agrega valor a los residuos desechados promoviendo el desarrollo en el sector rural del país (Schiochet *et al.*, 2020).

La utilización de desechos animales y agrícolas son alternativas de energía limpia y renovable (Bijarchiyan *et al.*, 2020), que satisface la demanda interna de energía y fertilizante, como fuentes de recursos muy prometedoras de red energética para el desarrollo de una sociedad sostenible, adecuada para la gestión de residuos pecuarios, que podrían cubrir las necesidades de energía térmica para cocción, agua caliente sanitaria y la demanda de nutrientes del suelo (Av *et al.*, 2020).

La tecnología de la digestión anaeróbica, llama la atención para producir biogás de los desechos orgánicos, animales y vegetales (biomasa) que pueden contribuir significativamente a la producción y conversión de distintas formas de energía (Helguero *et al.*, 2018), como una alternativa de sustitución viable de los combustibles fósiles convencionales (Alavi-Borazjani *et al.*, 2020).

Se ha determinado mediante análisis físicoquímico la composición del biol, obteniendo que la DQO se ha reducido de 230 mg/L a 59,93 mg/L, siendo esta reducción de 74%, este resultado implica que la gran parte de gases tóxicos de la materia orgánica se han convertido en biogás (Investigaciones y Agua, 2006) y que el sustrato efluente, son fertilizantes beneficiosas para la agricultura que sustituyen a los productos sintéticos como nitrato de amonio.

La fertilización edáfica con biol y biosol balanceados, en condiciones de estrés hídrico y alta radiación solar, contrarresta en un 67% el ataque de hongo patógeno *Macrophomina phaseolina* a la soya causando pudrición carbonosa, el biosol mezclado con urea permite conservar la humedad del suelo reduciendo el estrés hídrico de las plantas (Morales, 2021).

El biol se considera como fito estimulante complejo que incrementa mayor capacidad de fotosíntesis y la producción (Condori-Mamani *et al.*, 2017), su aplicación en la producción agroecológica de lechuga, tiene mejores resultados manteniendo características fisicoquímicas, microbiológicas y las organolépticas dentro los límites de las normas técnicas estandarizadas y de apariencia originales (Cotrina *et al.*, 2020), y por lo tanto, se puede considerar al biol como un acondicionador de suelos que incrementa la biomasa de las especies vegetales (Jose y Reina, 2020).

El digestado biosol, contiene cantidades importantes de los nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, como principales fertilizantes para la agricultura que mejora la calidad del cultivo, su aplicación como abono puede ocasionar un significativo ahorro en los costos de fertilización para la actividad agrícola, referido a la demanda química de oxígeno (DQO) reducido mayor al 70% puede ser útil para alimentos de otros animales como patos y chanchos.

En la producción de metano de la excreta animal, la sustancia efluente tuvo un volumen de 32,16 L, el 90% del efluente es biol (Carhuancho *et al.*, 2012), aproximadamente se ha obtenido 28 L de biol, esta sustancia constituye un fertilizante orgánico para cultivos agrícolas (INDAP, 2016), se utiliza como abono foliar y fuente orgánica de Fitoregulador de las planta, la dosificación apropiada es 100% dosis corresponde a 2 L de biol en 20 L de agua y 50% de dosis corresponde a 1 L de biol en 20 L de agua (Gomez *et al.*, 2006). Para fertilizar una hectárea de terreno cultivado de papa requiere 33 000 L de abono foliar, necesita 500 L de biol, que corresponde a 587 kg de excreta de ganado vacuno, si costara S/. 2 nuevos soles el litro de biol, para el poblador dedicado a la crianza de ganado vacuno tendría un ingreso de S/. 3000 por este concepto y las tierras de cultivo no se deterioran con el uso de biol como insecticida.

CONCLUSIONES

- La digestión anaeróbica de 8,9 kg de excreta de vacuno, a temperatura mesofílica, posibilita obtener una producción de 185 litros de biogás compuesto de $62,07 \pm 1,24\%$ de CH_4 y $31,05 \pm 0,53\%$ de CO_2 , con un poder calórico entre 4493,3 y 5592,7 kcal/m³, el mismo que está comprendido entre 52,6 y 56,2% del gas natural.
- Los parámetros fundamentales que influyen en la producción de metano fueron la temperatura de trabajo en rango mesofílico de $31,20 \pm 0,5$ °C, sin cambios bruscos durante el proceso, con un potencial de hidrógeno (pH) neutro de 6,98 y una relación carbono nitrógeno (C/N) de 33,88 afluente y 36,88 efluente.
- Los beneficios que genera la digestión anaeróbica del estiércol de vacuno se expresan con una menor contaminación del suelo y el aire, con beneficios económicos por ser el biogás un sustituto del gas licuado de petróleo, y la producción de biol como bioabono para la agricultura.
- A partir de los resultados se concluye que la fermentación anaeróbica del estiércol de vacuno es una alternativa para la producción de biogás como energía renovable y biol como bioabono para la agricultura.

RECOMENDACIONES

- En el proceso de digestión anaerobia de la excreta animal, mediante el uso de biodigestor sistema batch, es necesario utilizar del agitador de paletas de circulación para homogenizar la temperatura de trabajo y garantizar el desarrollo y actividad microbiana que participan en la digestión.
- Para la producción de metano de la excreta animal, el agua utilizada en el mezclado no debe contener sustancias toxicas que inhiben la producción de microorganismos metanogénicos durante el proceso y mantener la estabilidad de pH.
- Es necesario el uso de sistema de invernadero con estructura sólida de materiales acumuladores de calor y aislamiento térmico del digestor, para evitar cambios bruscos de temperatura de trabajo.
- Hacer más trabajos de investigación en la búsqueda de fuentes de energías limpias y renovables para mitigar el impacto ambiental generado por el metano y bióxido de carbono originado de los desechos orgánicos.
- El uso masivo de los biodigestores en la región altoandina, como tecnología de digestión anaerobia para producir biogás de la excreta animal y de desechos orgánicos en beneficio del medio ambiente y económico por la comercialización de productos digeridos.
- Elaborar proyectos relacionados con la tecnología de digestión anaeróbica para el tratamiento de aguas residuales en la región de Puno.

BIBLIOGRAFÍA

- Achinas, S., Li, Y., Achinas, V., Jan, G., & Euverink, W. (2018). *Influence of sheep manure addition on biogas potential and methanogenic communities during cow dung digestion under mesophilic conditions.* 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.03.003>
- Admin, L. (2019). Biogas Utilization and Cleanup. *Livestock and Poultry Environmental Learning Community*, 1–8.
- Alavi-Borazjani, S. A., Capela, I., & Tarelho, L. A. C. (2020). Over-acidification control strategies for enhanced biogas production from anaerobic digestion: A review. *Biomass and Bioenergy*, 143(June), 105833.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105833>
- Alvarez, R., Villca, S., & Lidén, G. (2006). Biogas production from llama and cow manure at high altitude. *Biomass and Bioenergy*, 30, 66–75.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.10.001>
- Amer, H. (2020). The Impact of Renewable Energy Consumption on the Human Development Index in Selected Countries: Panel Analysis (1990-2015). *International Journal of Economy, Energy and Environment*, 5(4), 47–68.
<https://doi.org/10.11648/j.ijeee.20200504.12>
- Aparcana, S., & Jansen, a. (2008). Estudio sobre el Valor Fertilizante de los Productos del Proceso Fermentación Anaeróbica para Producción de Biogás. *German ProfEC, GmbH*, 10.
- Apolo Yagual, A. D. (2015). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio prototipo de bajo costo.*
- Arrieta-Palacios, W. (2016). Diseño De Un Biodigestor Doméstico Para El Aprovechamiento Energético Del Estiércol De Ganado. *Universidad de Piura*, 1–251. Recuperado de <https://pirhua.udpe.edu.pe/handle/11042/2575%0Ahttps://hdl.handle.net/11042/2575>
- Av, A., Francisco, C. S., Nacional, C., & Cient, I. (2020). *MEDIANTE DIGESTIÓN ANAERÓBICA EN UN VALLE NORPATAGÓNICO.* 24, 280–287.
- Baltrénas, P., Kolodynskij, V., & Urbanas, D. (2019). Biogas production from chicken manure at different organic loadings using a special zeolite additive (ZeoVit sorbent). *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(063101), 1–11.

- <https://doi.org/10.1063/1.5119840>
- Barrera-Cardoso, E., Odales-Bernal, L., Carabeo-Pérez, A., & Alba-Reyes, Y. (2020). Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural. *Tecnología Química*, 40(2), 303–321.
- Beily, M. E., & Aires, B. (2020). *EVALUATION OF THE MESOFILIC ANAEROBIC PROCESS OF A DAIRLY SLURRY CO DIGESTION WITH GLICEROL IN A CONTINUOUS PROCESS*. 45(2018), 33–38.
- Bijarchiyan, M., Sahebi, H., & Mirzamohammadi, S. (2020). A sustainable biomass network design model for bioenergy production by anaerobic digestion technology: Using agricultural residues and livestock manure. *Energy, Sustainability and Society*, 10(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s13705-020-00252-7>
- Black, J. L., Davison, T. M., & Box, I. (2021). Methane emissions from ruminants in australia: Mitigation potential and applicability of mitigation strategies. *Animals*, 11(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ani11040951>
- Bond, T., & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003>
- Bonilla Cárdenas, J. A., & Lemus Flores, C. (2012). Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. Revisión. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 3(2), 215–246.
- Broucek, J. (2014). Production of Methane Emissions from Ruminant Husbandry: A Review. *Journal of Environmental Protection*, 05(15), 1482–1493. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.515141>
- Canyon Hydro, Ferreres, X. R., Font, A. R., Ibrahim, A., Maximilien, N., Lumbroso, D., Hurford, A., Winpenny, J., Wade, S., Sataloff, R. T., Johns, M. M., Kost, K. M., State-of-the-art, T., Motivation, T., Norsuzila Ya'acob¹, Mardina Abdullah^{1, 2} and Mahamod Ismail^{1, 2}, Medina, M., Talarico, T. L., Casas, I. A., Chung, T. C., ... Masuelli, M. (2013). Small-Size Biogas Technology Applications for Rural Areas in the Context of Developing Countries. *Intech*, 32(July), 137–144. <http://www.intechopen.com/books/trends-in-telecommunications-technologies/gps-total-electron-content-ec-prediction-at-ionosphere-layer-over-the-equatorial-region%0AInTec%0A>. Recuperado de <http://www.asociatiamhc.ro/wp-content/uploads/2013/11/Guide-to-Hydropower.pdf>

- Carhuanchu, F. ., Guerrero, J. ., & Ramirez, J. . (2012). Aprovechamiento del Estiércol de Gallina para la Elaboración de Biol en Biodigestores Tipo Batch como Propuesta al Manejo de Residuo Avícola. *XIX Simposio Peruano de Energía Solar y Del Ambiente (XIX - SPES), 2010*, 12-17pp.
- Carmona, J. C., Bolívar, D. M., & Giraldo, L. A. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*.
- Castro Rivera, R., Solís Oba, M. M., Chicatto Gasperín, V., & Solís Oba, A. (2020). Biogas production through co-digestion of cattle waste and agricultural residues of tomato cultivation (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 36(3), 529–539. <https://doi.org/10.20937/RICA.53545>
- Chadwick, D. R., Cardenas, L. M., Dhanoa, M. S., Donovan, N., Misselbrook, T., Williams, J. R., Thorman, R. E., Mcgeough, K. L., Watson, C. J., Bell, M., Anthony, S. G., & Rees, R. M. (2018). The contribution of cattle urine and dung to nitrous oxide emissions: Quantification of country specific emission factors and implications for national inventories. *Science of the Total Environment*, 635, 607–617. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.152>
- Coaguila, P., Bardales, R., & Zeballos, O. (2019). Digestates from the production of biogas from cattle slurry in onion production in arid zones. *Scientia Agropecuaria*, 10(1), 119–124. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.01.13>
- Colomer Mendoza, F. J., Gallardo Izquierdo, A., Arias Aguilar, D., & Campos Rodríguez, R. (2019). Aprovechamiento energético de residuos sólidos. In *Aprovechamiento energético de residuos sólidos*. <https://doi.org/10.6035/mediambient.2019.10>
- Condori-Mamani, P., Loza-Murguía, M. G., Sainz-Mendoza, H. N., Guzmán-Calla, J., Mamani-Pati, F., Marza-Mamani, F., & Gutiérrez-González, D. E. (2017). Evaluación del efecto del biol sobre catorce accesiones de papa nativa (*Solanum* ssp.) en la estación experimental kallutaca. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 5(1), 15–28. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2017.050100015>
- Cortés, S. A. D. S. y H. Y. T. (2019). *Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa energética para familias del área rural*.
- Cotrín Cabello, G. G., Masgo Sanchez, L. N., Tumbay Ambrocio, Y. Y., Alejos Patiño, I. W., Córdova Mendoza, P., & Patiño Rivera, A. R. (2020). Efectos del biol y súper biol en la producción agroecológica de la lechuga (*Lactuca sativa*) variedad seda en el centro poblado de Chinchopampa –Chaglla – Pachitea – Huánuco. *Journal of the*

- Academy*, 3, 17–31. <https://doi.org/10.47058/joa3.2>
- Criollo Brayhan, A. J. D. y N. H. (2017). Control Pid De Temperatura Y Dosificación De Ph Para La Producción De Gas Metano a Partir De La Digestión Anaeróbica De Residuos Sólidos Orgánicos. *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (Rcta)*, 2(24). <https://doi.org/10.24054/16927257.v24.n24.2014.2339>
- Deublein, D. & Steinheuser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources and Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co KGaA. Weinheim. 443p.
- Díaz-Vázquez, D., Alvarado-Cummings, S. C., Meza-Rodríguez, D., Senés-Guerrero, C., de Anda, J., & Gradilla-Hernández, M. S. (2020). Evaluation of biogas potential from livestock manures and multicriteria site selection for centralized anaerobic digester systems: The case of Jalisco, Mexico. *Sustainability*, 12(3527), 1–12. <https://doi.org/10.3390/SU12093527>
- Editors, M. S. M. (2020). *Village Technology* (Issue February). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37794-6>
- Energías Renovables no convencionales. (2012). *GUÍA DE PLANIFICACIÓN PARA PROYECTOS DE BIOGÁS EN CHILE*.
- Ercumen, A., Pickering, A. J., Kwong, L. H., Arnold, B. F., Parvez, S. M., Alam, M., Sen, D., Islam, S., Kullmann, C., Chase, C., Ahmed, R., Unicomb, L., Luby, S. P., & Colford, J. M. (2017). Animal Feces Contribute to Domestic Fecal Contamination: Evidence from E. coli Measured in Water, Hands, Food, Flies, and Soil in Bangladesh. *Environmental Science & Technology*, 91, 8725–8734. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01710>
- Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). *Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates*. 1–8.
- Estrada Paredes, J. J. C. especialista / R. F. B. (2012). invernaderos o fitotoldos. *Guía Para La Construcción de Invernaderos o Fitotoldos Una Alternativa Para Garantizar La Seguridad y Soberanía Alimentaria En Emergencias*.
- Ezekoye, B. A. (2014). *Characterization of Biogas Produced from Rice Husks and Algae using a Metal Fixed-Dome Biodigester*. 14(1).
- Fan, Q., Wanapat, M., Yan, T., & Hou, F. (2020). Altitude influences microbial diversity and herbage fermentation in the rumen of yaks. *BMC Microbiology*, 20(370), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-02054-5>
- FAO. (2018). *World Livestock: Transforming the livestock sector through the Sustainable*

- Development Goals*. Food and Agricultural Organization.
- FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. *Proyecto CHI/00/G32*, 120. <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Fatin, M. H., & Kalsum, A. H. L. (2021). *Effect of Adding Palm Oil Mill Effluent (POME) and Slurry on Biogas From Cow Manure to Produced Methane Gas*. 7, 75–80.
- Fernandez, J. M. y A. (2004). *Cambio Climático Instituto Nacional de Ecología. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales* (Primera Ed).
- Fernández Villagómez, G., Vázquez Borges, E., & Martínez Pereda, P. (2002). Inhibidores del proceso anaerobio: compuestos utilizados en porcicultura. *Ingeniería*, 6(3), 67–71.
- Freitas, F. F., De Souza, S. S., Ferreira, L. R. A., Otto, R. B., Alessio, F. J., De Souza, S. N. M., Venturini, O. J., & Ando Junior, O. H. (2019). The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101(October 2018), 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>
- García, A., Rojas, D., Mosquera, J., Becerra, A. P., Acevedo, P., & Cabeza, I. (2020). Evaluación de la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de tamos de arroz pre-tratado. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería*. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/806>
- Garcia, N. H., Mattioli, A., Gil, A., Frison, N., Battista, F., & Bolzonella, D. (2019). Evaluation of the methane potential of different agricultural and food processing substrates for improved biogas production in rural areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112(August 2018), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.040>
- Gassó Busquets, F., & Solomando Valderrabano, S. (2011). *Estructura E Instalaciones De Un Invernadero. Dm*, 1–115.
- Gheorghe, L., Lucian, M., Mădălina, M., & Andrey, B. (2017). Influence of energy characteristics of biogas obtained by anaerobic fermentation of animal proteins on combustion performance. *2017 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2017 - Proceedings, 2017-Janua*, 245–249. <https://doi.org/10.1109/SIELMEN.2017.8123326>
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>

- Giler, J., & Cedeño, C. (2020). Elaboration of bovine manure biodigester for biogas transformation to electric power. ... *Research Journal of Management, IT and Social ...*, 7(5), 32–37. <https://sloap.org/journals/index.php/irjmis/article/view/967>
- Gomez, A., Bizzozero, F., & Noguez, R. (2006). *Biofertilizantes Nutriendo Cultivos Sanos*. 43–48.
- González, E. G. (2020). *Como Manejar la Medición Volumen Estándar en los Instrumentos de Flujo*.
- Grossi, G., Goglio, P., Vitali, A., & Williams, A. G. (2019). *Livestock and climate change: impact of live- stock on climate and mitigation strategies*. 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1093/af/vfy034>
- Hargrove, J. L. (2006). History of the Calorie in Nutrition. *Journal of Nutrition*, 136(12), 2957–2961. <https://doi.org/10.1093/jn/136.12.2957>
- Haryanto, A., Sugara, B. P., Telaumbanua, M., & Rosadi, R. A. B. (2018). Anaerobic Co-digestion of Cow Dung and Rice Straw to Produce Biogas using Semi-Continuous Flow Digester: Effect of Urea Addition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 147(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/147/1/012032>
- Heiker, M., Kraume, M., Mertins, A., Wawer, T., & Rosenberger, S. (2021). Biogas plants in renewable energy systems—a systematic review of modeling approaches of biogas production. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/app11083361>
- Helguero, A., Lautaro, G., Peña, B., & Hernani, G. (2018). Obtención de biogás mediante la fermentación anaerobia de estiércol. *Revista Estudiantil AGRO-VET*, 2(2), 185–191.
- Helmenstine, A. M. (2021). *Learn About STP in Chemistry: Understanding Standard Temperature and Pressure*. February 01, 2021.
- Höglund-Isaksson, L., Gómez-Sanabria, A., Klimont, Z., Rafaj, P., & Schöpp, W. (2020). Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe –results from the gains model. *Environmental Research Communications*, 2(2). <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab7457>
- IDAE, & Energía), (Instituto Instituto para la Diversificación y Ahorro de la. (2007). Digestores anaerobios. In *Energía De La Biomasa* (Vol. 94, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(83\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0022-5088(83)90035-8)
- Ileleji, K. E., Martin, C., & Jones, D. (2015). Basics of Energy Production through Anaerobic Digestion of Livestock Manure. In *Bioenergy*. Klein E. Ileleji.

- <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-407909-0.00017-1>
- INDAP. (2016). *Biogás de residuos agropecuarios en la región de los ríos*. 100. Recuperado de <https://www.goredelosrios.cl/wp-content/uploads/2018/01/Libro-Biogas-PRDSAP-Región-de-Los-Ríos.pdf>
- Indrawan, N., Thapa, S., Wijaya, M. E., Ridwan, M., & Park, D. H. (2018). The biogas development in the Indonesian power generation sector. *Environmental Development*, 25, 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.10.003>
- Investigaciones, G. De, & Agua, A. (2006). *DESIGN OF A BIODIGESTOR OF GARBAGE CAN TO OBTAIN GAS METHANE AND FERTILIZERS TO LEAVE OF THE FERMENTATION OF EXCREMENTS OF PIG*.
- Iván, V.-R., José, M.-R., Melitón, E.-J., & Agustina, O.-S. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(3), 429–436. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)70352-x](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)70352-x)
- Javadinejad, S., Eslamian, S., & Ostad-Ali-Askari, K. (2019). Investigation of monthly and seasonal changes of methane gas with respect to climate change using satellite data. *Applied Water Science*, 9(8), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1067-9>
- Jose, C., & Reina, R. (2020). *Estudio integral de un biodigestor desde el punto de vista microbiológico y uso del biol como bioabono en Los Llanos Orientales de Colombia the eastern plains of Colombia*. 123–128.
- Juliana Vasco-Correa, Sami Khanal, Ashish Manandhar, A. S. (2019). Anaerobic digestion for bioenergy production: global status, environmental and techno_economic implications, and government policie. *Reseachgate*, 509, 1–21.
- Kalsum, L., & Muchtar, Z. (2020). *The Analysis Of Biogas Fermentation Time From Cow Manure On Fixed Dome Biodigester Batch Systems The Analysis Of Biogas Fermentation Time From Cow Manure On Fixed Dome Biodigester Batch Systems*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012043>
- Kebreab, E., Clark, K., Wagner-Riddle, C., & France, J. (2006). Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture: A review. *Canadian Journal of Animal Science*, 86(2), 135–158. <https://doi.org/10.4141/a05-010>
- Kinley, R. D., Martinez-Fernandez, G., Matthews, M. K., de Nys, R., Magnusson, M., & Tomkins, N. W. (2020). Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120836>

- Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, *97*(6), 3231–3261. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>
- Konrad, O., Koch, F. F., Lumi, M., Tonetto, J. F., & Bezama, A. (2014). Potencial of biogas production from swine manure supplemented with glycerine waste. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, *34*(5), 844–853.
- Kulkarni, M. B., & Ghanegaonkar, P. M. (2019). Methane enrichment of biogas produced from floral waste: A potential energy source for rural India. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, *41*(22), 2757–2768. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1571126>
- Kumari, S., Fagodiya, R. K., Hiloidhari, M., Dahiya, R. P., & Kumar, A. (2020). Methane production and estimation from livestock husbandry: A mechanistic understanding and emerging mitigation options. *Science of the Total Environment*, *709*, 136135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136135>
- Lenscak, M. P., & Iglesias, N. (2019). Invernaderos: Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino (del paralelo 23 al 54). *INTA Ediciones, Colección*, 226.
- León Torres, C. A., Nomberto Rodríguez, C., Mendoza Avalos, G. A., Bardales Vásquez, C. B., Cabos Sánchez, J., & Barrena Gurbillón, M. A. (2019). Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, *Biol y Biosol. Arnaldoa*, *26*(3), 1017–1032. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26311>
- Lin, R., Cheng, J., Ding, L., & Murphy, J. D. (2018). Improved efficiency of anaerobic digestion through direct interspecies electron transfer at mesophilic and thermophilic temperature ranges. *Chemical Engineering Journal*, *350*, 681–691. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.173>
- Mamun, M. R. Al, Karim, M. R., Rahman, M. M., Asiri, A. M., & Torii, S. (2016). Methane enrichment of biogas by carbon dioxide fixation with calcium hydroxide and activated carbon. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *58*, 476–481. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.06.029>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, *8*(14), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Martí-Herrero, J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de

- instalación. In *GTZ-Energía* (Vol. 53, Issue 9).
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Martí Herrero, J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. In *GTZ-Energía* (Vol. 53, Issue 9).
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Martí Ortega, N. (2006). Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. *Digestion*, 25.
- Matos, C. F., Paes, J. L., Pinheiro, É. F. M., & De Campos, D. V. B. (2017). Biogas production from dairy cattle manure, under organic and conventional production systems. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, 37(6), 1081–1090.
- Max, M. (2003). *Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos*. $V_{reactor} * t_{M gen} = M_{max} * \square$. 2, 2–5.
- MINENERGIA /PNUD/FAO/GEF. (2011). *MANUAL DE BIOGÁS* (p. 119).
- Mirzaei-Aghsaghali, A., & Maheri-Sis, N. (2016). Factors affecting mitigation of methane emission from ruminants: Microbiology and biotechnology strategies. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 4(1), 22–31.
<https://doi.org/10.14269/2318-1265/jabb.v4n1p22-31>
- Molina-Flores, B., Manzano-Baena, P., Coulibaly, M. D., & Bedane, B. (2020). *The role of livestock in food security, poverty reduction and wealth creation in West Africa*. Accra. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8385en>
- Molina Botero, I., Cantet, J., Montoya, S., Correa Londoño, G., & Barahona Rosales, R. (2013). Producción de metano in vitro de dos gramíneas tropicales solas y mezcladas con *Leucaena leucocephala* o *Gliricidia sepium*. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 8(2), 15–31. <https://doi.org/10.21615/2677>
- Morales, V. E. (2021). *Macrophomina phaseolina EN SOYA FERTILIZADA CON LOS*. 33(2), 91–104.
- Moset, V., Poulsen, M., Wahid, R., Højberg, O., & Møller, H. B. (2015). Mesophilic versus thermophilic anaerobic digestion of cattle manure: Methane productivity and microbial ecology. *Microbial Biotechnology*, 8(5), 787–800.
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.12271>
- NACIONES UNIDAS. (1998). Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, 61702, 108–117.
<https://doi.org/10.1145/115790.115803>

- Nieto, M. I., Guzmán, M. L., & Steinaker, D. (2014). Emisiones de gases de efecto invernadero: Simulación de un sistema ganadero de carne típico de la región central Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 40(1), 92–101. <https://doi.org/http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84931068462&partnerID=tZOtx3y1>
- Núñez, L. (2017). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE AGRÍCOLAS* Lenin Núñez-Pintado.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*.
- Palacios, L. K., Obregón, G., Valverde, J. W., Castañeda, C. A., & Benites, E. G. (2020). Calorific Value of Biogas Obtained by *Cavia porcellus* Biomass. *Chemical Engineering Transactions*, 80, 271–276. <https://doi.org/10.3303/CET2080046>
- Pannucharoenwong, N., Worasaen, A., Benjapiyaporn, C., Jongpluempiti, J., & Vengsungnle, P. (2017). Comparison of Bio-Methane Gas Wobbe Index in Different Animal Manure Substrate. *Energy Procedia*, 138, 273–277. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.056>
- Paredes Mamani, R. P., & Escobar-Mamani, F. (2018). The role of livestock and poverty in the rural area of Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas-Journal of High Andean Research*, 20(1), 39–60.
- Parra Huertas, R. (2015). Anaerobic digestión: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry. *Producción + Limpia*, 10(2), 142–159. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552015000200014
- Paucar, L., & Quispe, M. (2015). “ *PRODUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL BIOGAS Y BIOL EN UN BIODIGESTOR GRANJA V. A. VELEBIT S. AC. UBICADA EN EL DISTRITO DE LURIGANCHO- CHOSICA* ” Trabajo de Titulación para Optar el Título de : Ingeniero Ambiental Biólogo. 159.
- Pinheiro, I. G. (2017). *Balanço de massa no tratamento de resíduos sólidos orgânicos provenientes de restaurantes em biorreator* Mass balance in the treatment of organic wastes from restaurants in bioreactor. 491–499. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017150094>
- Pittam, D. A., & Pilcher, G. (1972). Measurements of Heats of Combustion by Flame Calorimetry. Part 8.- Methane, etane, propane, n-butane and 2-methylpropane.

- Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 68(0), 2224–2229. <https://doi.org/10.1039/f19726802224>
- Ponce, E. (2016). *Métodos sencillos en obtención de biogás rural y su conversión en electricidad*. 75–80. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292016005000011>
- Primavesi, O., Toyoko, R., Frighetto, S., & Pedreira, S. (2004). *Metano entérico de bovinos leiteiros em condições tropicais brasileiras Dairy cattle enteric methane measured in Brazilian tropical conditions. 1*, 277–283.
- Reyes, E. (2017). Generacion de biogas mediante el proceso de digestion anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustrato organico. *Farem*, 17(5), 11–22.
- Roubík, H., & Mazancová, J. (2020). Suitability of small-scale biogas systems based on livestock manure for the rural areas of Sumatra. *Environmental Development*, 33(April 2019), 100505. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100505>
- S.A., B. (2007). Digestores anaerobios. In *Energía De La Biomasa* (Vol. 94, Issue 2).
- Samayoa, S., Bueso, C., & Viquez, J. (2012). *Guía Implementación de sistemas de biodigestión en ecoempresas*. 69. <http://nebula.wsimg.com/c124319bf4efff857485ba22c79176c5?AccessKeyId=11F7CE3E4517D29E4C81&disposition=0&alloworigin=1>
- Sanabria Vindell, Octavio José, Sanchez Melgara, Ariel Eduardo, Rodas Espinoza, Y. S. (2017). *Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero en Energías Renovables*.
- Sasmaz, M. U., Sakar, E., & Yayla, Y. E. (2020). The Relationship between Renewable Energy and Human Development in OECD Countries : A Panel Data Analysis. *Sustainability*, 12(7450), 1–16.
- Savran, V., Piñón, M. R. D., & Palacios, J. S. A. (2012). *Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores Production of biogas and biofertilizers from biodigester effluents*. 35(2), 219–226.
- Schiochet Pinto, L., Pinheiro Neto, D., de Leles Ferreira Filho, A., & Domingues, E. G. (2020). An alternative methodology for analyzing the risk and sensitivity of the economic viability for generating electrical energy with biogas from the anaerobic bio-digestion of vinasse. *Renewable Energy*, 155, 1401–1410. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.036>
- Seman, S. Z. A., Idris, I., Abdullah, A., Shamsudin, I. K., & Othman, M. R. (2019). Optimizing purity and recovery of biogas methane enrichment process in a closed landfill. *Renewable Energy*, 131, 1117–1127. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.057>

- Shi, Y., Yang, H., Zhou, S., Wang, A., & Lv, X. (2018). Effect of Atmospheric Pressure on Performance of AEA and Air Entraining Concrete. *Hindawi: Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(6528412), 1–7. <https://doi.org/10.1155/2018/6528412>
- Shree R.S. Dungal. Hanqin Tian, Bowen Zhang, Shufen Pan, Chaoqun Lu, J. Y. (2016). Methane emission from global livestock sector during 1890 -2014: magnitude, trends and spatio -temporal patterns. In *International Journal of Laboratory Hematology* (Vol. 38, Issue 1, pp. 42–49). <https://doi.org/10.1111/ijlh.12426>
- Tamminga, S., Bannink, A., Dijkstra, J., & Zom, R. L. G. (2007). Feeding strategies to reduce methane loss in cattle. *Animal Sciences Group Research Report, February*.
- Uddin, W., Khan, B., Shaukat, N., Majid, M., Mujtaba, G., Mehmood, A., Ali, S. M., Younas, U., Anwar, M., & Almeshal, A. M. (2016). Biogas potential for electric power generation in Pakistan: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.083>
- Ukpai, P. A., & Nnabuchi, M. N. (2012). Comparative study of biogas production from cow dung, cow pea and cassava peeling using 45 litres biogas digester. *Advances in Applied Science Research*, 3(3), 1864–1869. www.pelagiaresearchlibrary.com
- Unpaprom, Y., Pimpimol, T., Whangchai, K., & Ramaraj, R. (2021). Sustainability assessment of water hyacinth with swine dung for biogas production, methane enhancement, and biofertilizer. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(3), 849–860. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00850-7>
- Vanderzaag, A. C., MacDonald, J. D., Evans, L., Vergé, X. P. C., & Desjardins, R. L. (2013). Towards an inventory of methane emissions from manure management that is responsive to changes on Canadian farms. *Environmental Research Letters*, 8(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035008>
- Vijn, S., Compart, D. P., Dutta, N., Foukis, A., Hess, M., Hristov, A. N., Kalscheur, K. F., Kebreab, E., Nuzhdin, S. V., Price, N. N., Sun, Y., Tricarico, J. M., Turzillo, A., Weisbjerg, M. R., Yarish, C., & Kurt, T. D. (2020). Key Considerations for the Use of Seaweed to Reduce Enteric Methane Emissions From Cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 7(December), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.597430>
- Wainaina, S., Awasthi, M. K., Sarsaiya, S., Chen, H., Singh, E., Kumar, A., Ravindran, B., Awasthi, S. K., Liu, T., Duan, Y., Kumar, S., Zhang, Z., & Taherzadeh, M. J. (2020). Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. *Bioresource Technology*,



- 301(January), 122778. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>
- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.058>
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). *Bioresource Technology Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources*. 99, 7928–7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- West, J. B. (1993). Acclimatization and tolerance to extreme altitude. *Journal of Wilderness Medicine*, 4, 17–26. <https://doi.org/10.1580/0953-9859-4.1.17>
- West, J. B. (1996). Prediction of barometric pressures at high altitudes with the use of model atmospheres. *J. Appl. Physiol.*, 81(4), 1850–1854. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.81.4.1850>
- West, J. B. (1999). The original presentation of Boyle's law. *J. Appl. Physiol.*, 87(4), 1543–1545. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.4.1543>
- Yan, Q., Liu, X., Wang, Y., Li, H., Li, Z., Zhou, L., Qu, Y., & Li, Z. (2018). Cow manure as a lignocellulosic substrate for fungal cellulase expression and bioethanol production. *AMB Express*, 8(190), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0720-2>
- Yáñez, E. E., & Gualdrón, M. A. (2014). *Metodología para la identificación y cuantificación de emisiones fugitivas de metano en campos de producción*.
- Yaniris, L. A., & Cristina, O. A. M. (2005). Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>. *Icidca*.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35–53. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de producción de biogás en 3 biodigestores sistema batch.

Tiempo(días)	15	20	25	35	45	Total	Desviación
Digestor							
D1	15,7	22,5	17,7	81,5	46,5	183,9	0,97
D2	15,1	23,6	34,5	70,7	40,3	184,2	0,67
D3	16,5	24,5	32,5	73,5	39,5	186,5	1,63
Promedio						184,87	1,09

Anexo 2. Temperatura, pH, Y Producción De Metano (CH₄) Y Bióxido De Carbono (CO₂)

Tiempo (días)	pH (%)	T _{diges} (°C)	D(pH)	D(T _{diges})	Tiempo (minutos)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	ΔCO ₂	ΔCH ₄
5	7.1	31.1	0.12	0.05	0	32.10	62.00	1.05	0.07
10	7.14	30.5	0.16	0.65	2	31.20	63.00	0.15	0.93
15	7.12	31.2	0.14	0.05	4	30.50	63.50	0.55	1.43
20	7.3	32.1	0.32	0.95	6	30.90	63.60	0.15	1.53
25	6.92	31.6	0.06	0.45	8	30.10	63.90	0.95	1.83
30	7.02	30.9	0.04	0.25	10	31.10	60.00	0.05	2.07
35	6.82	32.1	0.16	0.95	12	31.60	63.20	0.55	1.13
40	6.72	31.2	0.26	0.05	14	29.80	61.10	1.25	0.97
45	6.67	30.1	0.31	1.05	16	31.10	60.10	0.05	1.97
					18	31.10	61.20	0.05	0.87

Promedio	6.98	31.20	0.17	0.49	20	32.10	61.20	1.05	0.87
					Promedio	31.05	62.07	0.53	1.24

Anexo 3. Cálculo de contenido de metano en el biogás mediante balance de materia.

Metano(CH ₄)	BIOXIDO DE CARBONO (CO ₂)	Nitrógeno (N ₂)	Masa molar CH ₄	Masa de bióxido de carbono (CO ₂)	Masa molar de Nitrógeno (N ₂)	Suma de las masas molares (CH ₄ ,CO ₂ y N ₂)	%Masa CH ₄	%Masa CO ₂	%Masa N ₂	Masa CH ₄ gas	Masa CO ₂ gas	Masa N ₂ gas	Masa gas	Masa CH ₄	Masa C CO ₂	Masa C TOTAL
0.65	0.338	0.06	10.4	14.85	1.68	26.93	0.3861864	0.55142963	0.06238396	85.7333828	122.4174	13.8492388	222	64.300037	33.386558	97.686595
0.645	0.338	0.06	10.32	14.872	1.68	26.872	0.3840429	0.55343852	0.06251861	85.2575171	122.8634	13.8791307	222	63.943138	33.508187	97.451325
0.64	0.339	0.06	10.24	14.894	1.68	26.814	0.3818901	0.55545611	0.06265384	84.7795928	123.3113	13.9091519	222	63.584695	33.630342	97.215037
0.635	0.339	0.06	10.16	14.916	1.68	26.756	0.3797279	0.55748243	0.06278965	84.2995964	123.7611	13.9393033	222	63.224697	33.753027	96.977725
0.63	0.34	0.06	10.08	14.938	1.68	26.698	0.3775564	0.55951757	0.06292606	83.8175144	124.2129	13.9695857	222	62.863136	33.876245	96.739381
0.625	0.339	0.06	10	14.916	1.68	26.596	0.3759964	0.56083622	0.06316739	83.4711987	124.5056	14.0231614	222	62.603399	33.956084	96.559483
0.62	0.34	0.06	9.92	14.96	1.68	26.56	0.373494	0.56325301	0.06325301	82.9156627	125.0422	14.0421687	222	62.186747	34.10241	96.289157
0.615	0.341	0.06	9.84	15.004	1.68	26.524	0.3709848	0.56567637	0.06333886	82.3586186	125.5802	14.0612276	222	61.768964	34.249133	96.018097
0.61	0.342	0.06	9.76	15.048	1.68	26.488	0.3684687	0.56810631	0.06342495	81.8000604	126.1196	14.0803383	222	61.350045	34.396255	95.7463
0.605	0.343	0.06	9.68	15.092	1.68	26.452	0.3659459	0.57054287	0.06351127	81.2399819	126.6605	14.099501	222	60.929986	34.543777	95.473764

0.601	0.344	0.06	9.608	15.136	1.57	26.312	0.3651566	0.57525084	0.05959258	81.0647613	127.7057	13.2295531	222	60.798571	34.828823	95.627394
0.595	0.345	0.06	9.52	15.18	1.68	26.38	0.3608795	0.57543594	0.06368461	80.1152388	127.7468	14.1379833	222	60.086429	34.84003	94.926459
0.594	0.346	0.06	9.504	15.224	1.68	26.408	0.3598909	0.57649197	0.06361709	79.8957892	127.9812	14.122993	222	59.921842	34.903968	94.82581
0.585	0.347	0.06	9.36	15.268	1.68	26.308	0.3557853	0.58035579	0.0638589	78.9843394	128.839	14.1766763	222	59.238255	35.137905	94.376159
0.58	0.348	0.06	9.28	15.312	1.68	26.272	0.3532278	0.58282582	0.06394641	78.4165652	129.3873	14.1961023	222	58.812424	35.287454	94.099878
0.575	0.349	0.06	9.2	15.356	1.68	26.236	0.3506632	0.58530264	0.06403415	77.8472328	129.9372	14.2155816	222	58.385425	35.437414	93.822839
0.57	0.35	0.06	9.12	15.4	1.68	26.2	0.3480916	0.58778626	0.06412214	77.2763359	130.4885	14.2351145	222	57.957252	35.587786	93.545038
0.565	0.351	0.06	9.04	15.444	1.68	26.164	0.3455129	0.59027672	0.06421037	76.7038679	131.0414	14.2547011	222	57.527901	35.738572	93.266473
0.56	0.352	0.06	8.96	15.488	1.68	26.128	0.3429271	0.59277404	0.06429884	76.1298224	131.5958	14.2743417	222	57.097367	35.889773	92.98714
0.555	0.353	0.06	8.88	15.532	1.68	26.092	0.3403342	0.59527825	0.06438755	75.5541929	132.1518	14.2940365	222	56.665645	36.041392	92.707037
0.55	0.354	0.06	8.8	15.576	1.68	26.056	0.3377341	0.59778938	0.06447651	74.9769727	132.7092	14.3137857	222	56.23273	36.19343	92.426159
0.545	0.348	0.06	8.72	15.312	1.68	25.712	0.3391413	0.5955196	0.06533914	75.2893591	132.2054	14.5052894	222	56.467019	36.056005	92.523024
0.54	0.349	0.06	8.64	15.334	1.68	25.654	0.3367896	0.59772355	0.06548686	74.7672878	132.6946	14.5380837	222	56.075466	36.189444	92.26491
0.535	0.349	0.06	8.56	15.356	1.68	25.596	0.3344273	0.59993749	0.06563526	74.2428504	133.1861	14.5710267	222	55.682138	36.323488	92.005626
0.53	0.35	0.06	8.48	15.378	1.68	25.538	0.3320542	0.60216148	0.06578432	73.716031	133.6798	14.6041194	222	55.287023	36.458141	91.745164
0.525	0.35	0.06	8.4	15.4	1.68	25.48	0.3296703	0.6043956	0.06593407	73.1868132	134.1758	14.6373626	222	54.89011	36.593407	91.483516
0.52	0.351	0.06	8.32	15.422	1.68	25.422	0.3272756	0.60663992	0.06608449	72.6551806	134.6741	14.6707576	222	54.491385	36.72929	91.220675
0.515	0.351	0.06	8.24	15.444	1.68	25.364	0.3248699	0.6088945	0.06623561	72.1211165	135.1746	14.7043053	222	54.090837	36.865794	90.956631
0.51	0.352	0.06	8.16	15.466	1.68	25.306	0.3224532	0.61115941	0.06638742	71.5846044	135.6774	14.7380068	222	53.688453	37.002924	90.691378
0.505	0.352	0.06	8.08	15.488	1.68	25.248	0.3200253	0.61343473	0.06653992	71.0456274	136.1825	14.7718631	222	53.284221	37.140684	90.424905
0.5	0.353	0.06	8	15.51	1.68	25.19	0.3175863	0.61572052	0.06669313	70.5041683	136.69	14.8058753	222	52.878126	37.279079	90.157205
0.495	0.353	0.06	7.92	15.532	1.68	25.132	0.3151361	0.61801687	0.06684705	69.9602101	137.1997	14.8400446	222	52.470158	37.418112	89.88827
0.49	0.354	0.06	7.84	15.554	1.68	25.074	0.3126745	0.62032384	0.06700168	69.4137353	137.7119	14.8743719	222	52.060302	37.557789	89.61809
0.485	0.354	0.06	7.76	15.576	1.68	25.016	0.3102015	0.62264151	0.06715702	68.8647266	138.2264	14.9088583	222	51.648545	37.698113	89.346658
0.48	0.355	0.06	7.68	15.598	1.68	24.958	0.307717	0.62496995	0.06731309	68.3131661	138.7433	14.9435051	222	51.234875	37.83909	89.073964
0.475	0.355	0.06	7.6	15.62	1.68	24.9	0.3052209	0.62730924	0.06746988	67.7590361	139.2627	14.9783133	222	50.819277	37.980723	88.8
0.47	0.356	0.06	7.52	15.642	1.68	24.842	0.3027131	0.62965945	0.06762741	67.2023187	139.7844	15.013284	222	50.401739	38.123017	88.524756
0.465	0.356	0.06	7.44	15.664	1.68	24.784	0.3001937	0.63202066	0.06778567	66.6429955	140.3086	15.0484183	222	49.982247	38.265978	88.248225

0.46	0.357	0.06	7.36	15.686	1.68	24.726	0.2976624	0.63439295	0.06794467	66.0810483	140.8352	15.0837175	222	49.560786	38.409609	87.970396
0.455	0.357	0.06	7.28	15.708	1.68	24.668	0.2951192	0.63677639	0.06810443	65.5164586	141.3644	15.1191827	222	49.137344	38.553916	87.69126
0.45	0.358	0.06	7.2	15.73	1.68	24.61	0.292564	0.63917107	0.06826493	64.9492076	141.896	15.1548151	222	48.711906	38.698903	87.410809

Anexo 4. Tabla para calcular el poder calórico de metano

Gas	%	(Litros)	(moles)	(kcal)
CH ₄	62,07	114,75	3,010	640,8
CO ₂	31,05	57,40	1,506	
Otros	6,88	12,72	0,334	
Total	100	184,87	4.850	640,8

Anexo 5. Temperatura en el interior del biodigestor durante el proceso.

Tiempo (min)	Día 5	Día 10	Día 15	Día 20	Día 25	Día 30	Día 35	Día 40	Día 45
	T _{digest} (°C)								
0	32.2	32	34	34	34	33	34	33.8	30.3
5	32.2	32.1	34	34	34	33.1	34	33.9	30.3
10	32.3	32.2	34	34	34	33.1	34	33.9	30.5
15	32.3	32.1	34	34	34	33.2	34	33.8	30.5
20	32.2	32.2	34	34	34	33.2	33.9	34	30.6
25	32.3	32.3	34.1	34.1	34.1	33.1	34.1	34	30.6
30	32.4	32.3	34.1	34.1	34.1	33.1	34.1	33.9	30.7
35	32.5	32.2	34	34	34	33	34	34	30.7
40	32.5	32.3	34	34	34	33	33.9	34	30.9
45	32.6	32.1	34	34	34	33.1	33.8	33.9	30.9
50	32.7	32.2	34	34	34	32.9	33.9	34	31
55	32.7	32	33.9	33.9	33.9	32.9	33.9	33.9	31

200	33.7	32.3	33.6	33.6	32.8	33.6	33.6	32.7	33.6	32.7
205	33.6	32.4	33.6	33.6	32.9	33.6	33.6	32.7	33.6	32.7
210	33.7	32.5	33.5	33.5	32.8	33.5	33.5	32.7	33.5	32.7
215	33.6	32.4	33.5	33.5	32.7	33.5	33.5	32.8	33.5	32.7
220	33.5	32.4	33.5	33.4	32.8	33.5	33.5	32.7	33.5	32.7
225	33.5	32.3	33.5	33.5	32.7	33.5	33.5	32.6	33.5	32.7
230	33.4	32.3	33.5	33.4	32.6	33.5	33.5	32.5	33.5	32.7
235	33.4	32.2	33.5	33.5	32.5	33.5	33.5	32.4	33.5	32.6
240	33.5	32.5	33.5	33.5	32.4	33.5	33.5	32.3	33.5	32.6
245	33.5	32.4	33.5	33.3	32.3	33.5	33.5	32.2	33.5	32.6
250	33.5	32.3	33.5	33.2	32.4	33.5	33.5	32.1	33.5	32.4
255	33.5	33.3	33.5	33.3	32.2	33.5	33.5	32.1	33.5	32.4
260	33.5	32.3	33.5	33.2	32.1	33.5	33.5	32	33.5	32.1
265	33.5	32.1	33.5	33.1	32.1	33.5	33.5	32	33.5	32.1
270	33.5	32	33.5	33.2	32	33.5	33.5	32	33.5	32
275	33.4	32.1	33.4	33.2	32	33.4	33.4	31.9	33.4	32
280	33.4	32.1	33.4	33.4	31.9	33.4	33.4	31.8	33.4	31.9
285	33.4	31.9	33.4	33.4	31.8	33.4	33.4	31.8	33.4	31.9
290	33.4	31.8	33.4	33.4	31.9	33.4	33.4	31.8	33.4	31.8
295	33.3	31.9	33.3	33.3	31.8	33.3	33.3	31.7	33.3	31.8
300	33.4	31.8	33.4	33.4	31.7	33.4	33.4	31.6	33.4	31.8
305	33.3	31.8	33.3	33.3	31.8	33.3	33.3	31.6	33.3	31.6
310	33.3	31.7	33.3	33.3	31.6	33.3	33.3	31.5	33.3	31.6
315	33.3	31.9	33.3	33.3	31.5	33.3	33.3	31.5	33.3	31.4
320	33.3	31.9	33.3	33.3	31.5	33.3	33.3	31.4	33.3	31.4
325	33.2	31.8	33.2	33.2	31.4	33.2	33.2	31.4	33.2	31.2
330	33.2	31.8	33.2	33.2	31.4	33.2	33.2	31.3	33.2	31.2
335	33.2	31.9	33.2	33.2	31.3	33.2	33.2	31.3	33.2	31.2

340	33.1	31.9	33.1	33.1	33.1	31.3	33.1	33.1	33.1	33.1	31.2
345	33.1	31.8	33.1	33.1	33.1	31.2	33.1	33.1	33.1	33.1	31
350	33	31.8	33	33	33	31.2	33	33	33	33	31
355	32.9	31.7	32.9	32.9	32.9	31.1	33	33	32.9	32.9	31
360	32.9	31.9	32.9	32.9	32.9	31.1	32.9	32.9	32.9	32.9	31
365	32.9	31.8	32.9	32.9	32.9	31	32.9	32.9	32.9	32.9	30.9
370	32.9	31.7	32.9	32.9	32.9	31	32.9	32.9	32.9	32.9	30.9
375	32.9	31.6	32.9	32.9	32.9	30.9	32.9	32.9	32.9	32.9	30.7
380	32.8	31.5	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	30.8
385	32.7	31.4	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	30.7
390	32.7	31.5	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	30.6
395	32.6	31.5	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	30.6
400	32.6	31.4	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	30.6
405	32.6	31.3	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	30.6
410	32.6	31.3	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	30.4
415	32.5	31.4	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	30.5
420	32.5	31.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	30.4
425	32.5	31.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	30.4
430	32.4	31.5	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	30.3
435	32.3	31.6	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	30.2
440	32.3	31.6	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	30.3
445	32.2	31.7	32.2	32.2	32.2	32.2	32.2	32.2	32.2	32.2	30.3
450	32.1	31.7	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	30.1
455	32.1	31.6	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1	30.1
460	32	31.5	32	32	32	32	32	32	32	32	30.1
465	31.8	31.5	31.8	31.8	31.8	31.8	31.8	31.8	31.8	31.8	30.2
470	31.9	31.4	31.9	31.9	31.9	31.9	31.9	31.9	31.9	31.9	30.1
475	31.9	31.3	31.9	31.9	31.9	31.9	31.9	31.9	31.9	31.9	30

760	29.1	29.2	29.1	30	29.1	28.8	29.9	29.1	28
765	29	29.1	29	30	29	28.9	29.8	29	27.9
770	29	29	29	30.1	29	28.8	30	29	27.9
775	28.9	28.9	28.9	30.1	28.9	28.7	30	28.9	27.8
780	28.7	28.8	29	30.2	28.8	28.7	30.1	29	27.8
785	28.8	28.7	29	30.1	28.9	28.8	30.2	29	27.8
790	28.9	28.9	28.9	30.2	28.7	28.7	30.2	28.9	27.9
795	28.9	28.8	28.9	30.3	28.8	28.6	30.4	28.9	27.9
800	28.9	28.7	28.9	30.3	28.9	28.5	30.3	28.9	28
805	28.9	28.7	28.9	30.2	28.9	28.5	30.3	28.9	28
810	28.9	28.8	28.9	30.3	29	28.6	30.4	28.9	28.1
815	28.8	28.6	28.9	30.4	29	28.4	30.3	28.9	28.1
820	28.7	28.7	28.9	30.3	29.1	28.3	30.3	28.9	28.1
825	28.8	28.6	28.2	30.4	29.1	28.3	30.4	28.8	28.3
830	28.6	28.2	28.1	30.5	29.2	28.4	30.6	28.7	28.2
835	28.5	28.2	28.1	30.4	29.3	28.4	30.6	28.6	28.3
840	28.5	28	28.1	30.5	29.3	28.5	30.7	28.5	28.3
845	28.4	28	28.1	30.6	29.4	28.5	30.8	28.4	28.3
850	28.4	28.1	28.1	30.7	29.4	28.6	30.9	28.3	28.4
855	28.3	28.1	28.1	30.6	29.5	28.6	30.8	28.3	28.4
860	28.3	28	28.1	30.6	29.5	28.7	30.9	28.2	28.5
865	28.4	27.9	28.1	30.7	29.6	28.7	31	28.2	28.6
870	28.3	27.9	28.1	30.8	29.7	28.6	31	28.1	28.7
875	28.3	28	28.1	30.9	29.6	28.4	31.1	28.2	28.7
880	28.2	27.9	28.1	30.9	29.7	28.6	31.1	28.1	28.8
885	28.2	27.9	28.1	31	29.8	28.6	31.2	28.1	28.8
890	28.1	27.9	28.1	31	29.9	28.5	31.2	28.1	28.9
895	28.2	27.8	28.1	31.1	29.8	28.7	31.3	28.1	28.9

900	28.1	27.8	28.1	31.1	29.9	28.6	31.5	28.1	28.9
905	28.1	27.8	28.1	31.2	30	28.7	31.6	28.1	28.9
910	28.2	27.9	28.1	31.2	30	28.6	31.9	28.1	29
915	28.1	27.8	28.1	31.3	30.1	28.6	31.8	28.1	29
920	28.2	27.7	28.1	31.3	30.2	28.7	31.9	28.1	29
925	28.1	27.9	28.1	31.4	30.1	28.6	31.9	28.1	29
930	28.2	27.9	28.1	31.4	30.2	28.5	31.8	28.1	29
935	28.3	28	28.1	31.5	30.2	28.7	31.7	28.1	29
940	28.3	28.1	28.1	31.5	30.3	28.6	31.9	28.1	29.1
945	28.3	28	28.1	31.6	30.3	28.7	31.8	28.1	29.1
950	28.4	28.2	28.1	31.6	30.4	28.6	32	28.1	29.2
955	28.4	28.1	28.1	31.7	30.4	28.5	31.9	28.1	29.2
960	28.3	27.9	28.1	31.8	30.5	28.6	31.9	28.1	29.2
965	28.5	28	28.2	31.9	30.6	28.8	31.9	28.2	29.2
970	28.5	28.1	28.2	31.9	30.5	28.7	32	28.2	29.3
975	28.4	28.3	28.2	32	30.6	28.6	32	28.2	29.3
980	28.5	28.2	28.3	32	30.7	28.6	32.1	28.3	29.3
985	28.4	28.1	28.4	32.1	30.7	28.7	32.1	28.4	29.4
990	28.5	28.2	28.5	32.1	30.5	28.9	32.3	28.5	29.4
995	28.6	28.1	28.6	32.3	30.6	28.8	32.4	28.6	29.4
1000	28.7	28.2	28.7	32.4	30.7	28.8	32.5	28.7	29.5
1005	28.9	28.3	28.9	32.5	30.8	28.9	32.4	28.9	29.5
1010	29	28.4	29	32.6	30.8	29	32.5	29	29.6
1015	29.2	28.6	29.2	32.7	30.9	29	32.5	29.2	29.6
1020	29.3	28.8	29.3	32.8	30.9	29.1	32.6	29.2	29.6
1025	29.5	28.8	29.5	32.7	31	29.2	32.8	29.3	29.7
1030	29.7	28.9	29.7	32.8	31	29.4	32.8	29.5	29.7
1035	29.9	29	29.9	32.9	31.1	29.6	32.7	29.6	29.7

5	19.9	150	11.7	295	5.9	440	8.2	585	30.2	730	41	875	18.5	1020	12.1
10	19.7	155	11.6	300	5.8	445	8.4	590	30.9	735	40.5	880	18.3	1025	11.7
15	19.6	160	11.4	305	5.7	450	9	595	32.1	740	34.7	885	17.8	1030	11.6
20	19.2	165	11.2	310	5.6	455	10	600	32.5	745	34.1	890	17.3	1035	11
25	18.8	170	11	315	5.2	460	11.3	605	33.9	750	33.4	895	17.1	1040	10.9
30	18.6	175	10.9	320	5.2	465	12.3	610	34.7	755	32.7	900	16.9	1045	10.7
35	18.4	180	10.8	325	5	470	13.2	615	34.8	760	31.2	905	16.5	1050	10.5
40	18.1	185	10.6	330	5	475	13.9	620	35.7	765	30.8	910	16.3	1055	10.4
45	17.7	190	10.4	335	4.9	480	14.6	625	35.8	770	29.3	915	16	1060	10.2
50	16.4	195	10	340	4.6	485	15.3	630	36.3	775	29.6	920	15.7	1065	10
55	16.5	200	9.9	345	4.6	490	16.1	635	37.5	780	28.7	925	15.6	1070	9.7
60	15.9	205	9.8	350	4.5	495	16.9	640	36.9	785	28.3	930	15.4	1075	9.5
65	15.8	210	9.7	355	4.4	500	17.8	645	36.5	790	27.1	935	15.2	1080	9
70	15.4	215	9.6	360	4.3	505	18.9	650	39.4	795	26.8	940	15	1085	8.7
75	15.3	220	9.4	365	4.1	510	20.1	655	39.3	800	25.6	945	14.8	1090	8.6
80	14.8	225	9.3	370	4	515	21.7	660	40.6	805	25.1	950	14.5	1095	8.4
85	14.1	230	8.5	375	3.9	520	22.9	665	42.3	810	24.9	955	14.4	1100	8.1
90	13.8	235	8.4	380	3.6	525	23.3	670	43	815	24.4	960	14.3	1105	8
95	13.7	240	8.3	385	3.4	530	23.5	675	42.6	820	24	965	13.8	1110	7.8
100	13.6	245	8	390	3.4	535	23.6	680	42.8	825	23.1	970	13.5	1115	7.4
105	13.4	250	7.6	395	3.4	540	24.1	685	42.2	830	23.2	975	13.4	1120	7
110	13.2	255	7.5	400	3.8	545	24.4	690	42.8	835	22.8	980	13.3	1125	6.8
115	13.1	260	7.3	405	4.5	550	24.9	695	42.6	840	22.3	985	13.1	1130	15.80
120	13	265	7	410	5.4	555	25.5	700	42.2	845	21.7	990	13		
125	12.8	270	6.7	415	5.9	560	26.1	705	40.9	850	21.2	995	12.9		
130	12.7	275	6.6	420	6.5	565	26.6	710	41.9	855	21.1	1000	12.5		
135	12.4	280	6.5	425	7.3	570	27.3	715	40.5	860	20.8	1005	12.6		
140	12.2	285	6.4	430	7.6	575	28.4	720	40.4	865	20.5	1010	12.3		

Anexo 7. Rentabilidad de económica del uso de metano de la excreta de ganado vacuno.

cantidad de ganado vacuno	excreta acumulada durante 24 horas (kg)	excreta acumulada solo en la noche(kg)	razón de biogás y la excreta	Cantidad de excreta acumulada (L/kg)	cantidad de biogás producido vacunos durante 24 horas en establo (L)	cantidad de biogás para vacunos sólo en la noche en establo (L)	Contenido energético (kWh/L)	Energía acumulada para vacuno durante 24 horas en establo (kWh)	Energía acumulada para vacuno solo en la noche en establo (kWh)	Rentabilidad económica respecto a la energía eléctrica en Puno durante 24 horas en establo (S/.)	Rentabilidad económica respecto a la energía eléctrica en Puno durante 24 horas en establo (S/.)
4	64	16	20.7865	1330.34	332.584	0.006	0.0065	8.64719	1.99551	117.527	29.3818
6	96	24	20.7865	1995.51	498.876	0.006	0.0065	12.9708	2.99326	176.291	44.0727
8	128	32	20.7865	2660.67	665.169	0.006	0.0065	17.2944	3.99101	235.055	58.7636
10	160	40	20.7865	3325.84	831.461	0.006	0.0065	21.618	4.98876	293.818	73.4546
12	192	48	20.7865	3991.01	997.753	0.006	0.0065	25.9416	5.98652	352.582	88.1455
15	240	60	20.7865	4988.76	1247.19	0.006	0.0065	32.427	7.48315	440.727	110.182
20	320	80	20.7865	6651.69	1662.92	0.006	0.0065	43.236	9.97753	587.636	146.909

Anexo 8. preparación del sustrato afluente.

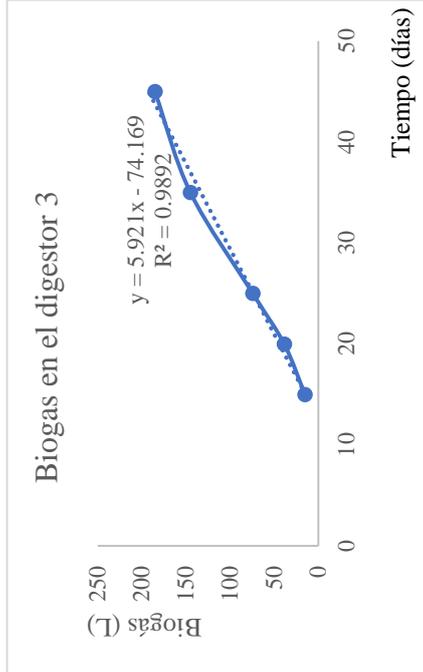
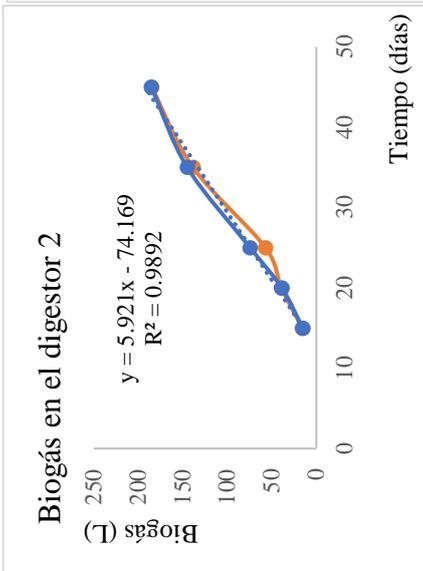
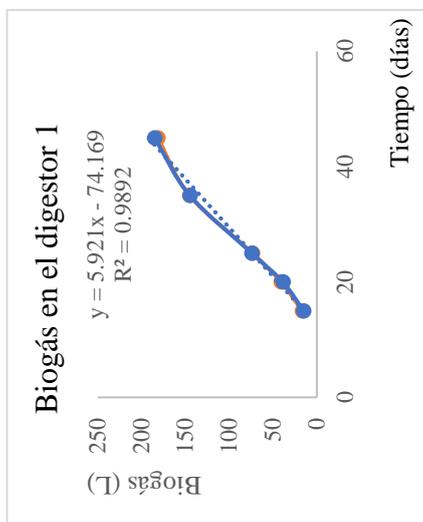


Anexo 9. Biodigestor y sus componentes.

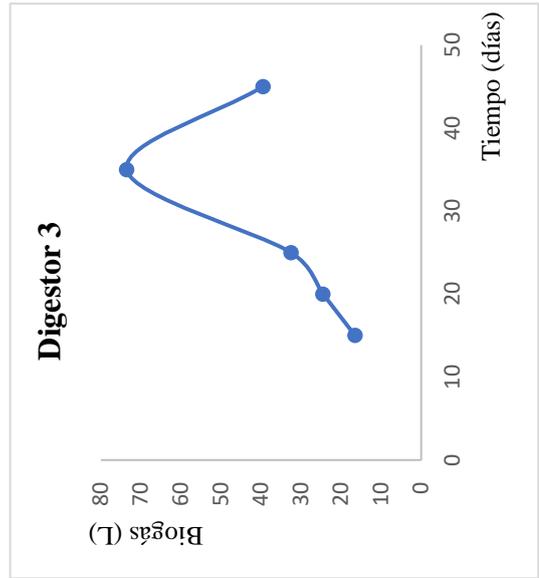
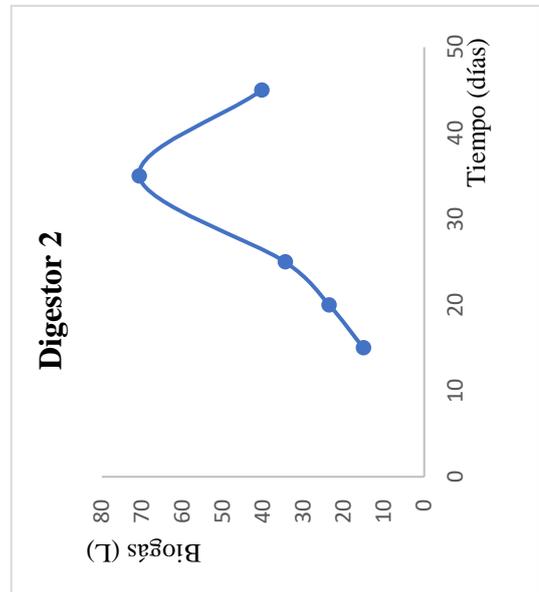
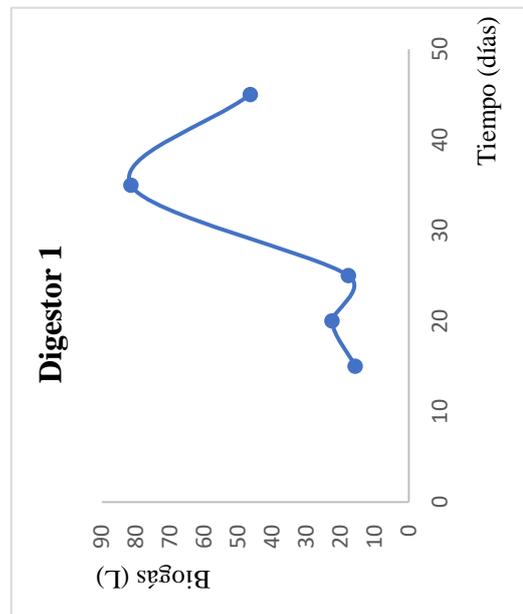




Anexo 10. Producción del biogás acumulado para cada biodigestor en 45 días.



Anexo 11. Producción del biogás para cada biodigestor en 45 días.



Anexo 12. Documentos.

Certificado de análisis fisicoquímico de las muestras afluente y efluente.



Universidad Nacional del Altiplano - Puno
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



LQ-2018

N° 0550

Certificado de Análisis

ASUNTO : Análisis Físico Químico de: **SUSTRATO FRESCO, AFLUENTE AL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO**

PROCEDENCIA : LOCALIDAD DE CHACARILLA ALTA, PROVINCIA DE PUNO, DEPARTAMENTO DE PUNO

PROYECTO : "PRODUCCIÓN DE METANO DE LA EXCRETA DE ANIMAL PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN LA REGIÓN ALTO ANDINA"

INTERESADO : Lic. Víctor ROMAN SALINAS

MOTIVO : INVESTIGACION

MUESTREO : 01/10/2018, por el interesado

ANÁLISIS : 01/10/2018

COD. MUESTRA : B009-00000074

CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS

PARAMETROS	UNIDAD	RESULTADOS
1.- Materia Orgánica	%	82.76
2.- Carbono Total	%	48.12
3.- Fosforo Total como P	%	9.95
4.- Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	230.00
5.- Nitrógeno (org. Amoniacal, NK)	%	1.42

Puno, C.U. 25 de octubre del 2018
VºBº



Dña. Edith Tello Palma
DECANA
FACULTAD ING. QUÍMICA
UNA - PUNO

ING. LUZ MARINA TEVES PONCE
ANALISTA DE LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD
FIQ - UNA - CIP - 182393



Universidad Nacional del Altiplano - Puno
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



N° 0549

LQ-2018

Certificado de Análisis

ASUNTO : Análisis Físico Químico de: **SUSTRATO FRESCO, EFLUENTE AL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO ENERGETICO**

PROCEDENCIA : LOCALIDAD DE CHACARILLA ALTA, PROVINCIA DE PUNO, DEPARTAMENTO DE PUNO

PROYECTO : "PRODUCCION DE METANO DE LA EXCRETA DE ANIMAL PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGETICO EN LA REGION ALTO ANDINA"

INTERESADO : Lic. Víctor ROMAN SALINAS

MOTIVO : **INVESTIGACION**

MUESTREO : 01/10/2018, por el interesado

ANÁLISIS : 01/10/2018

COD. MUESTRA : B009-00000074

CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS

PARAMETROS	UNIDAD	RESULTADOS
1.- Materia Orgánica	%	84.37
2.- Carbono Total	%	49.05
3.- Fosforo Total como P	%	8.92
4.- Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	59.93
5.- Nitrógeno (org. Amoniacal, NK)	%	1.33

Puno, C.U. 25 de octubre del 2018
VºBº



Edith Tello Palma
Dra. Edith Tello Palma
DECANA
FACULTAD ING. QUÍMICA
UNA - PUNO



M. Sc. José Miguel Castillo Prado
M. Sc. José Miguel Castillo Prado
Laboratorio de Ingeniería Química
Laboratorio Control de Calidad
UNA-PUNO

Luz Marina Teves Ponce
ING. LUZ MARINA TEVES PONCE
ANALISTA DE LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD
UNA - PUNO

Ciudad Universitaria Av: Floral s/n Facultad de Ing. Química - Pabellón 94 - Telefax (051)366142 -352992 .

Recibo de electro puno S.A., facturación octubre de 2020.