

Evaluation of the potential for biogas generation from human excrement as a sustainable energy solution in the Villa El Ángel settlement, Independencia

Sarmiento Ramos, Luciano Julián¹; Cuya Poma, Ángel Armando²

Gonza Mendiguri, Jessary Suhei³; Quinto Yupanqui, Nicole

Karen⁴; Duran Janampa, Darwin Dean, Mg.⁵

^{1,2,3,4}Universidad Científica del Sur, Lima - Perú.

100073357@cientifica.edu.pe, 100049495@cientifica.edu.pe,

100108543@cientifica.edu.pe, 100034154@cientifica.edu.pe

⁵Universidad Privada del Norte – Perú. darwin.duran@upn.pe

Abstract– This study estimates the potential for generating biogas from human excreta in the Villa El Ángel settlement, in a vulnerable urban context with limitations in basic services and predominant use of firewood for cooking. Considering a population of approximately 1000 people, a daily production of 216 kg of excreta was estimated. A total of 6.7237324 Nm³ of biogas was obtained using the Buswell equation, equivalent to 12.10 kWh per day with a conversion efficiency of 30%. The results show that anaerobic digestion can be a renewable energy source with environmental and health benefits. However, limitations such as the irregularity of the terrain and community approval for the installation of biodigesters were identified, so it is recommended to implement pilot projects and carry out soil studies to ensure their proper operation.

Keywords– Biogas, human excrement, biodigester, energy conversion.

Evaluación del potencial de generación de biogás a partir de excretas humanas como solución energética sostenible en el asentamiento Villa El Ángel, Independencia

Sarmiento Ramos, Luciano Julián¹; Cuya Poma, Ángel Armando²
Gonza Mendiguri, Jessary Suhei³; Quinto Yupanqui, Nicole
Karen⁴; Duran Janampa, Darwin Dean, Mg.⁵
^{1,2,3,4}Universidad Científica del Sur, Lima - Perú.
100073357@cientifica.edu.pe, 100049495@cientifica.edu.pe,
100108543@cientifica.edu.pe, 100034154@cientifica.edu.pe
⁵Universidad Privada del Norte – Perú. darwin.duran@upn.pe

Resumen– Este estudio estima el potencial de generación de biogás a partir de excretas humanas en el asentamiento Villa El Ángel, en un contexto urbano vulnerable con limitaciones en servicios básicos y uso predominante de leña para cocinar. Considerando una población aproximada de 1000 personas, se estimó una producción diaria de 216 kg de excretas. Mediante la ecuación de Buswell se obtuvo un total de 6.7237324 Nm³ de biogás, equivalente a 12.10 kWh diarios con una eficiencia de conversión del 30 %. Los resultados muestran que la digestión anaerobia puede ser una fuente de energía renovable con beneficios ambientales y sanitarios. Sin embargo, se identificaron limitaciones como la irregularidad del terreno y la aprobación comunitaria para la instalación de biodigestores, por lo que se recomienda implementar proyectos piloto y realizar estudios de suelos para garantizar su adecuada operación.

Palabras clave-- Biogás, excremento humano, biodigestor, conversión de energía.

I. INTRODUCCIÓN

Con el transcurso del tiempo, los avances tecnológicos y el desarrollo de nuevos métodos de investigación han dado paso a alternativas que han favorecido la sostenibilidad y el surgimiento de actividades enfocadas en disminuir la producción de biocombustibles que afectan negativamente tanto al medio ambiente como a la salud humana.

A partir de esta necesidad, se plantea un proyecto de investigación orientado al diseño de un sistema de biogás como alternativa energética para el A.H. Villa El Ángel, ubicado en el distrito de Independencia. Este asentamiento se localiza en las laderas de las estribaciones andinas, en el borde sureste de la zona denominada La Unificada, y se encuentra íntegramente sobre terrenos con fuertes pendientes (mayores al 30%), condición que genera inestabilidad en las masas de suelo y roca y lo expone a un nivel de peligro alto [11].

Asimismo, la zona presenta deficiencias en el sistema de distribución de gas, lo que ha llevado a los pobladores a emplear métodos tradicionales, como fogones de leña para cocinar, práctica que incrementa la contaminación atmosférica por la quema de madera y genera riesgos para la salud debido a la exposición prolongada al dióxido de carbono [1]. Además, en zonas donde se emplea leña como principal fuente energética, la falta de ventilación adecuada en los hogares provoca una acumulación excesiva de humo. Este humo contiene partículas finas en concentraciones que pueden superar por amplio margen los niveles seguros para la salud, alcanzando valores hasta cien veces mayores de lo recomendado por organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud. [1]

Aunque en el pasado no se le ha dado mucha importancia, el uso de excretas humanas para la producción de biogás ha demostrado ser una opción energética con gran potencial. Por tal motivo estudios realizados en África y Asia, se ha estimado que puede generarse entre 0,35 y 0,5 m³ de biogás por cada kilogramo de excreta, lo cual lo convierte en una alternativa viable como fuente doméstica de energía [2]. En el ámbito económico, su costo de producción se sitúa entre 0.40 y 0.60 USD/Nm³, siendo entre 30% y 50% más económico que el diésel [18], mientras que su costo energético oscila entre 57 y 129 EUR/MWh ($\approx 0.06 - 0.14$ USD/kWh) [19].

El diseño del sistema detalla el proceso y los componentes necesarios para producir biogás a partir de excretas humanas, con el objetivo de abastecer de energía a los hogares. Además de reducir la contaminación, el sistema permite un ahorro económico al disminuir el consumo de gas comercial y genera residuos aprovechables como bioabono. No obstante, debido a la posible presencia de patógenos, se recomienda aplicar tratamientos complementarios, como almacenamiento o compostaje, y destinar inicialmente el

bioabono a áreas verdes o cultivos no destinados al consumo humano [20].

II. ANTECEDENTES

En cuanto a investigaciones a nivel internacional, estudios recientes han evidenciado que la codigestión anaerobia de excretas humanas junto con residuos agrícolas, como la paja de arroz, representa una alternativa eficaz para mejorar la generación de biogás. Un claro ejemplo es el estudio “Anaerobic Co-Digestion of Human Feces with Rice Straw for Biogas Production: A Case Study in Sunyani”, en el cual analizaron diversas proporciones de mezcla entre ambos sustratos, concluyendo que la proporción equitativa de 50 % excretas humanas y 50 % paja de arroz fue la más eficiente para la producción de metano. Este resultado se atribuye al adecuado balance de la relación carbono-nitrógeno y a la acción conjunta de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos. Por tal motivo la combinación evaluada alcanzó no sólo una elevada producción de metano de 6390,7 ml en 30 días, con un 61 % de concentración de CH_4 , sino que también logró mantener una proporción adecuada de carbono a nitrógeno cercana a 26:1, lo cual optimizó el entorno para el desarrollo de microorganismos metanogénicos, reduciendo al mismo tiempo la formación de subproductos no deseados como amoníaco (NH_3) y dióxido de carbono (CO_2) [3]. Asimismo, otra investigación titulada “Diseño de un sistema de producción de biogás a partir de excretas humanas y de animales, con la distribución a la zona rural de Barrancabermeja”, en Santander, Colombia, diseñó un sistema de biodigestor como alternativa energética. El estudio se apoyó en un enfoque metodológico cuantitativo y descriptivo, aplicando encuestas para conocer las condiciones sociales, económicas y ambientales de la comunidad. Entre los resultados más relevantes, se evidenció que la totalidad de los hogares encuestados utilizaban leña o gas licuado de petróleo (GLP) para cocinar, lo que implicaba un gasto aproximado de hasta \$95.000 cada veinte días. Asimismo, se observó una alta aceptación del proyecto, ya que el 87% de los participantes mostró disposición para adoptar el uso de biodigestores. Por tal motivo, dadas las condiciones, se diseñó un sistema funcional utilizando el software SolidWorks, capaz de procesar residuos orgánicos humanos y animales para generar biogás, junto con un subproducto útil como fertilizante natural. Las conclusiones del estudio destacaron que esta tecnología permitiría reducir significativamente el consumo de leña, hasta 4 toneladas por familia al año, disminuir la emisión de contaminantes, optimizar el aprovechamiento de residuos y promover mejoras en la salud pública. Además, se estableció que el proyecto representa una alternativa sostenible, con viabilidad técnica y económica, replicable en otras zonas rurales con características similares [4].

En cuanto a estudios a nivel nacional, una investigación analizó el aprovechamiento energético de las excretas

humanas en áreas rurales del departamento de La Libertad, Perú. Una región que alberga varios de los distritos más pobres del país. Por tal motivo con base en una población estimada de 468,979 habitantes en 2017, se calculó que el total de excretas generadas podría producir aproximadamente 1 251,033 Nm^3 de biogás anualmente. Esta cantidad de biogás tendría un potencial energético de 7 506,198 kWh, con posibilidad de transformarse en 2 251,859 kWh de energía eléctrica, valorada en US \$254,685 por año. Además del ahorro económico, se destacó que sustituir combustibles fósiles por biogás permitiría evitar la emisión de más de 2.5 millones de kilogramos de dióxido de carbono (CO_2), posicionando así a las excretas humanas como una alternativa energética renovable con impacto positivo tanto ambiental como social en contextos rurales [5].

III. METODOLOGIA

Se utilizaron datos demográficos y territoriales en base al Plan de Preparación y Respuesta a nivel comunal [6]. Así como referencias científicas [5] y la ecuación de Buswell [7] para determinar la producción promedio diaria de excretas por persona, el contenido de materia seca y el porcentaje de materia orgánica útil.

En cuanto a los modelos de simulación, se aplicó la ecuación de Buswell[7] para estimar el volumen de gas metano generado a partir de la degradación anaeróbica de las excretas humanas. Asimismo, se calculó el volumen de biogás producido por día y su conversión a energía eléctrica (kWh), empleando factores de eficiencia de conversión energética obtenidos de la literatura. [8]. Por tal motivo se utilizó como valor referencial el poder calórico del metano, estimado en 6 kWh por m^3 . En cuanto a los cálculos económicos, se estimó el valor económico potencial de la energía producida, considerando el costo promedio de la electricidad en Perú: US \$0.1135/kWh. [9]

En base al procesamiento de la información se llevó a cabo mediante cálculos estequiométricos y energéticos que permitieron estimar la cantidad de metano diario generado, conversión a energía eléctrica útil y el ahorro económico que implicaría para la comunidad. Por lo que también se contempló el impacto ambiental mediante la estimación de la reducción potencial de emisiones de CO_2 al reemplazar combustibles fósiles.

Para el desarrollo de este artículo científico, se empleó una metodología basada en la revisión de literatura especializada, consultando fuentes académicas disponibles en bases de datos como Scopus, Google Scholar y repositorios institucionales nacionales. Esta estrategia permitió reunir diversas perspectivas y estudios relacionados con la capacidad para generar energía sostenible, enfocándose en el análisis de información proveniente de fuentes confiables sobre el

aprovechamiento de excretas humanas mediante tecnologías como la digestión anaeróbica y la gasificación.

Se seleccionaron aquellos estudios que aportan datos relevantes sobre la producción sostenible de energía, con un enfoque específico en la generación de biogás a partir de excretas humanas, aplicados en contextos de asentamientos humanos. Además, se excluyeron investigaciones que no presentaban datos experimentales o aquellas centradas únicamente en aspectos teóricos sin validación local.

TABLA I. PREGUNTA PICO

Elemento	Definición
P(Población)	Pobladores del asentamiento humano Villa El Ángel, distrito de Independencia, Lima.
I(Intervención)	Uso de excretas humanas para la producción de biogás como fuente de energía renovable.
C(Comparación)	Tecnologías tradicionales como fogones de leña o electricidad de red
O(Resultado)	Generación de energía eléctrica renovable, reducción de residuos y emisiones, y beneficios económicos para la comunidad.
Pregunta Pico	¿En los pobladores del asentamiento Villa El Ángel, el uso de excretas humanas para la producción de biogás mejora el acceso a energía sostenible en comparación con no utilizarlas?

PALABRAS CLAVES

Se definieron palabras clave en inglés relacionadas con el aprovechamiento de residuos orgánicos, especialmente excretas humanas, producción de biogás, para la generación de energía sostenible. Además, se consideraron términos vinculados a tecnologías como la digestión anaerobia y la gasificación, esenciales en la producción sostenible de energía para zonas urbanas vulnerables.

TABLA II. PALABRAS CLAVES

Componente	Palabras Claves
Población	Human settlements, vulnerable communities, urban slums
Intervención	Human excreta, biogas production, anaerobic digestion
Comparación	Conventional energy sources, firewood, traditional electricity
Resultado	Sustainable energy, renewable energy, emission reduction, energy access

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron estudios publicados entre 2015 y 2024 que analizan la producción sostenible de energía en zonas urbanas vulnerables, específicamente enfocándose en la generación de biogás a partir de excretas humanas.

Se excluyeron artículos que no presentaban datos experimentales, publicaciones de carácter exclusivamente teórico y documentos que no ofrecían acceso completo al contenido.

TABLA III. CRITERIOS DE INCLUSION Y EXCLUSION

Tipo	Criterios
Inclusión	-Estudios entre 2015 y 2024 -Estudios aplicados al contexto nacional e internacional - Resultados experimentales o estudios de caso - Artículos en español o inglés
Exclusión	- Artículos sólo teóricos - Estudios no relacionados con la generación de biogás a partir de excretas humanas - Documentos anteriores a 2015

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

A. Población del Asentamiento Humano Villa El Ángel - Independencia

El distrito de Independencia, ubicado en Lima Norte, es uno de los distritos menos poblados de Lima Metropolitana, con una extensión territorial aproximada de 14.56 km² [10]. Dentro de este distrito, el asentamiento humano Villa El Ángel tiene una población aproximada de 1,000 personas, distribuidas en 270 lotes sobre una extensión de 65,480.50 m². [11]

A raíz de que los datos censales y proyecciones que realiza el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) son reportados a nivel distrital, no existen proyecciones para asentamientos humanos como el de Villa El Ángel. Además, los asentamientos humanos en Lima tienden a estabilizar su población tras un crecimiento inicial, creciendo más por densificación que por expansión territorial. Estos procesos de consolidación limitan el aumento poblacional, salvo en casos excepcionales como nuevas invasiones o reubicaciones [12]. A partir de estas razones, para propósitos técnicos y de planificación, se considera válida la población estimada actual como referencia, reconociendo la ausencia de proyecciones oficiales específicas del presente año (2026) para este asentamiento.

B. Aprovechamiento energético de excretas humanas en Villa El Ángel, distrito de Independencia

Según Linares-Luján, Echeverría-Pérez y Cespedes-Aguilar [5], los excrementos humanos presentan un alto potencial para la producción de biogás similar al excremento de ganado, como se puede observar en el cuadro 4. Lo que se debe a que ambos tipos de excrementos provienen de procesos de degradación anaerobia en el tracto gastrointestinal, lo que permite la presencia de bacteria anaeróbicas fecales. Por otro lado, en el cuadro 4 se puede observar los componentes de las excretas humanas para realizar el análisis del potencial de producción de biogás.

TABLA IV. COMPARACIÓN DE BIOGÁS GENERADO POR DIFERENTES FUENTES

Fuente	Excreta (Kg/día)	%Agua	% Materia Seca	Biogás (Nm ³ /kg materia seca)
Vaca	20-30 (28)	80	20	0.023-0.04 0
Gallina	0.15-0.20 (0.18)	72	28	0.065-0.11 6
Cerdo	3.00-4.00 (3.40)	67	9	0.04-0.059
Humano	0.10-0.40 (0.15)	77	23	0.02-0.028

TABLA V. CONTENIDO Y COMPOSICIÓN DEL EXCREMENTO HUMANO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Componente	Unidad (por masa húmeda)	Cantidad
Masa seca en la excreción	g/kg	216
Total de nitrógeno	g/kg	11
Total de fósforo	g/kg	4
Potasio	g/kg	8
Contenido de humedad	%	78
Contenido de materia seca	%	22
pH	-	7-9

Como se mencionó previamente, en base a los datos que se observan en el cuadro 3, hay una posibilidad de poder obtener biogás a través de un kg de excretas humanas. Además, el pH de las excretas humanas es aproximadamente 7.3, un valor óptimo para la actividad de las bacterias metanogénicas responsables de la producción de biogás [5]. Información que se puede contrastar con el Manual de Biogás

de la FAO [13], que menciona que el pH óptimo para el proceso de digestión anaerobia se encuentra en el rango de 6.8 a 7.4, siendo el pH neutro el ideal para maximizar la producción de metano.

C. Potencial de utilización de excretas humanas para la generación de biogás en la zona urbana vulnerable en Villa El Ángel, Independencia.

La ecuación de Buswell es una herramienta estequiométrica que permite estimar la cantidad de metano y dióxido de carbono que se puede obtener al descomponer anaeróbicamente un sustrato orgánico, como en este caso de las excretas humanas. La composición química ($C_{400}H_{2050}O_{950}N_{12}S_1$) para la estimación de 1000 personas que producen heces alrededor de 250 gramos/persona/día, por esta razón las heces totales producidas son alrededor de 250 Kg/día. Además, se debe tener en consideración que 100 – 400 g de excretas humanas, contienen de 30 a 60 g de materia seca[14].

De acuerdo a las investigaciones realizadas por “Laboratorios Normon S.A.” del crucero Oasis of the Seas, que pertenece a la empresa naviera Royal Caribbean International, se pudo comprender que una persona que se encuentra en un estado de salud estable puede producir entre 50 y 100 gramos por día de excretas, siempre y cuando siga una dieta vegetariana, pero si la alimentación es basada en carne va entre 250 y 400 gramos por día, y entre 100 y 200 gramos si es una alimentación mixta [15].

Se asume que la gran mayoría de personas tienen una dieta mixta y realizan las tres comidas que se consideran del día (desayuno, almuerzo y cena). Según los estudios de Buswell, se considera que una persona genera aproximadamente 225 gramos/diarios de excretas. Es importante considerar el porcentaje de la materia seca, ya que el contenido líquido en los residuos no contribuye a la producción de biogás. Las excretas humanas el 77% corresponde a agua, por lo tanto, el 23% representa sólo biomasa útil (materia seca). Además, se debe controlar la masa volátil, que es la porción de la materia orgánica de la biomasa y es responsable de generar el biogás. Las heces de los humanos contienen entre 80% y 95% de materia orgánica [15].

Entonces, en el distrito de independencia, en el asentamiento humano Villa El Ángel se producirá una cantidad estimada de 216 Kg de excretas por día, lo que equivale a 49.68 kg de materia seca por día. La materia orgánica es el 95% de la materia seca, siendo así esto equivale a 47.20kg de materia orgánica por día.

La metodología propuesta por Linares-Luján, donde se considera que el carbono representa el 24% de la materia orgánica presente en las excretas de los humanos, y el 60% de este carbono es degradable durante el proceso de digestión

anaerobia [14]. A su vez, del carbono degradado, se estima que el 53% se convierte en metano (CH_4)

Para el cálculo de biogás que es generado por las excretas humanas, se aplicó la ecuación de Buswell. Si 1 mol de gas metano en condiciones normales es 22.4 litros (16 g de CH_4 equivale a 1 mol). En el cuadro 6, se muestra la cantidad de metano obtenida a través de las excretas humanas. Entonces, los 4.802666 Kg de metano generados en Independencia corresponden a 300.166625 moles CH_4 y se puede convertir en $300.166625 \times 22.4 = 6723.7324$ litros CH_4 . Por lo tanto, el metano estimado producido a partir de 216 kg por día de excretas humanas es 6.7237324 Nm^3 .

A partir de este volumen de biogás, se estimó el potencial de generación de energía eléctrica mediante sistemas de cogeneración, aplicando la ecuación correspondiente para transformar el volumen de CH_4 en energía aprovechable.

$$\epsilon_{Biogás} = E_{Biogás} \times \eta \quad \dots (1)$$

Dónde:

- $\epsilon_{Biogás}$: Cantidad de electricidad generada (KWh/año)
- $E_{Biogás}$: Energía en bruto de la conversión del biogás (kWh/año).
- η : Eficiencia global de la conversión del biogás a electricidad (%).

TABLA VI. CANTIDAD DE METANO OBTENIDO DE LAS HECES HUMANAS DEL ASENTAMIENTO HUMANO VILLA EL ÁNGEL EN EL DISTRITO DE INDEPENDENCIA

Parámetro	Porcentaje (%)	Cantidad (Kg)
Heces humanas (HH)	100%	216
Materia seca (MS)	23% de HH	49.68
Materia orgánica (MO)	95% de MS	47.196
Carbono (C)	24% de MO	11.327
Carbono biodegradable (CB)	60% de C	6.796

Carbono transformado a metano	53% de CB	3.602
Metano (CH_4)	16 CH_4 /12C	4.802.666

La eficiencia global en la conversión de biogás a electricidad puede depender del sistema utilizado. En operaciones con turbinas de gran escala, la eficiencia puede encontrarse entre el 35% y el 42%, sin embargo, generadores de menor capacidad rinde aproximadamente el 25% [17].

$$\epsilon_{\text{Biogás}} = \text{Cont. energético}_{\text{metano}} \times m_{\text{metano}} \quad (2)$$

Dónde:

- *Contenido energético*_{metano}: Poder calórico de metano (KWh/m^3)
- m_{metano} : Cantidad de metano producido en un día ($\text{m}^3/\text{día}$)

De acuerdo con el cálculo, se estima un potencial energético bruto de 40.3423 kWh diarios ($6.7237324 \text{ Nm}^3/\text{día} \times 6 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$), siendo $6 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$ la cantidad del *contenido energético metano* asumido [17]. Aplicando una eficiencia de conversión de 30%, la energía eléctrica disponible sería aproximadamente 12.10 kWh diarios.

V. CONCLUSION

Este estudio evidencia que hay un potencial energético significativo en el uso de excretas humanas como insumo en procesos de digestión anaerobia en contextos urbanos con limitaciones en el acceso a servicios básicos. Del mismo modo aplicando la ecuación de Buswell y utilizando datos físico químicos representativos del residuo, se estimó un volumen aproximado de 6.72 Nm^3 de metano por día, evidenciando su potencial como fuente renovable. Con base en estos resultados, y tomando en cuenta una eficiencia del 30 % en la conversión energética, se proyectó una generación de 12.10 kWh diarios de electricidad, cantidad suficiente para cubrir parcialmente las necesidades energéticas de una comunidad, como la iluminación o la cocción de alimentos. Finalmente, la sustitución del uso de leña por biogás ayudaría a reducir la exposición prolongada a partículas contaminantes dentro del hogar, lo cual tendría un impacto positivo sobre la salud respiratoria, particularmente en familias que cocinan en espacios cerrados y mal ventilados. Sin embargo, para transformar este potencial en una solución práctica, es fundamental desarrollar proyectos piloto y realizar estudios de

suelos específicos que consideren la topografía y el contexto social. En este caso, la irregularidad del terreno permite optar por la implementación de biodigestores familiares tubulares o taiwaneses, los cuales se caracterizan por su fácil instalación y movilidad, además de adecuarse a las condiciones sociales del asentamiento el cual es bastante rústico.

REFERENCES

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS), "Contaminación del aire en los hogares y salud," OMS, 2018. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- [2] E. Awuah, K. Nyarko, and P. A. Owusu, "Water and sanitation in Ghana," *Desalination*, vol. 248, no. 1–3, pp. 460–467, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.088>
- [3] Adjama, N. Derkyi, F. Uba, G. Akolgo, and R. Opuko, "Anaerobic co-digestion of human feces with rice straw for biogas production: A case study in Sunyani," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2022, Article ID 2608045, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2022/2608045>
- [4] A. Berrio, C. Porto, and J. Rodríguez, "Diseño de un sistema de producción de biogás a partir de excretas humanas y de animales, con la distribución a la zona rural de Barrancabermeja," Trabajo de grado, Unidades Tecnológicas de Santander, 2017. [Online]. Available: <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/4790>
- [5] G. A. Linares-Luján, C. Echeverría-Pérez, and T. Céspedes-Aguilar, "Potencial energético de la zona rural del Departamento de La Libertad (Perú) producido por biogás obtenido de excretas humanas," *Tecnología en Marcha*, vol. 30, no. 4, pp. 108–117, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3415>
- [6] PREDES, Plan de Preparación y Respuesta a nivel comunal del Asentamiento Humano Villa El Ángel, distrito de Independencia, Lima, Perú: Centro de Estudios y Prevención de Desastres – PREDES, 2018. [Online]. Available: <https://predes.org.pe/wp-content/uploads/2018/11/H.-Plan-de-Preparaci%C3%B3n-y-Respuesta-A.H.-Villa-El-Angel.pdf>
- [7] A. Bosch, Manual de biogás: generación y aprovechamiento, 2ª ed. Barcelona, España: Editorial Mundi-Prensa, 2011.
- [8] M. Poeschl, S. Ward, and P. Owende, "Prospects for expanded utilization of biogas in Germany," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 1782–1797, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.010>
- [9] Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), *Reporte de Inflación – Junio 2019, Recuadro 7: Evolución de precios de energía eléctrica*, 2019. [Online]. Available: <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Reporte-Inflacion/2019/junio/ri-junio-2019-recuadro-7.pdf>
- [10] Municipalidad Distrital de Independencia, "Aspectos generales – EDUCCA," *MuniIndependencia.gob.pe*. [En línea]. Disponible en: <https://www.muniindependencia.gob.pe/educca/aspectos.php>. [Accedido: 20-jun-2025].
- [11] PREDES, Plan de Preparación y Respuesta – A.H. Villa El Ángel. Lima, Perú: Predes, nov. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://predes.org.pe/wp-content/uploads/2018/11/H.-Plan-de-Preparaci%C3%B3n-y-Respuesta-A.H.-Villa-El-Angel.pdf>
- [12] E. Sáez Giráldez, *La ciudad progresiva: una lectura de los asentamientos humanos de Lima*, Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2015. [En línea]. Disponible: https://oa.upm.es/39172/1/ELIA_SAEZ_GIRALDEZ_01.pdf
- [13] M. T. Vamero Moreno, *Manual de Biogás*, Proyecto CHI/00/G32, Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Global Environment Facility, Santiago de Chile, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>

- [14] P. Haq y E. Soedjono, "Human manure potential as a biogas producer," 2010.
- [15] A. Bosch, "Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero," 2011.
- [16] R. Baquerizo, J. Pagés, e I. Pereda, "El modelo de Buswell. Aplicación y comparación. Principales factores que influyen en su aplicación," *Gestión Ambiental*, vol. 2, pp. 1–22, 2016.
- [17] M. Poeschl, S. Ward, y P. Owende, "Prospects for expanded utilization of biogas in Germany," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 1782–1797, 2010.
- [18] Un, C. (2025). Assessing Biogas from Wastewater Treatment Plants for Sustainable Transportation Fuel: A Detailed Analysis of Energy Potential and Emission Reductions. *Gases*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/gases5010006>
- [19] Kraussler, M., Pontzen, F., Müller-Hagedorn, M. *et al.* Techno-economic assessment of biomass-based natural gas substitutes against the background of the EU 2018 renewable energy directive. *Biomass Conv. Bioref.* **8**, 935–944 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13399-018-0333-7>
- [20] Oishi W., Vinnerås B. and Sano D. (2023). Resource recovery technologies as microbial risk barriers: Towards safe use of excreta in agriculture. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* **9**:1008–1029. DOI:10.1039/D2EW00832G