



Universidad de Valladolid

Modelos de negocio sostenible a pequeña-
mediana escala para la gestión de vertidos.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

**MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**NUEVOS MODELOS DE NEGOCIO SOSTENIBLES A PEQUEÑA-MEDIANA
ESCALA PARA LA GESTIÓN DE VERTIDOS Y RECUPERACIÓN DE RECURSOS.**

Autor: Ana María López Hernández

Tutor: D. Sara Isabel Pérez Elvira

Valladolid, septiembre 2025



Universidad de Valladolid

Modelos de negocio sostenible a pequeña-
mediana escala para la gestión de vertidos.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

**MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**NUEVOS MODELOS DE NEGOCIO SOSTENIBLES A PEQUEÑA-MEDIANA
ESCALA PARA LA GESTIÓN DE VERTIDOS Y RECUPERACIÓN DE RECURSOS.**

Autor: Ana María López Hernández

Tutor: D. Sara Isabel Pérez Elvira

Valladolid, septiembre 2025



RESUMEN:

Este Trabajo Fin de Máster realiza una revisión sobre la viabilidad existente económica, técnica y social de la implementación de sistemas de digestión anaerobia para el tratamiento de aguas residuales en poblaciones de escasos recursos. La metodología se basó en el análisis documental y en el estudio de casos reales en Ecuador, Nepal, India, Perú y Ghana, entre otros, con el fin de identificar experiencias exitosas y lecciones aplicables a contextos similares. Los resultados muestran que la digestión anaerobia constituye una alternativa sostenible, capaz de reducir significativamente la contaminación ambiental, generar biogás como fuente de energía renovable y producir digestato utilizable en la agricultura. Asimismo, se identificaron barreras relevantes, como la inversión inicial, la capacitación técnica y la gestión del digestato, pero también oportunidades asociadas a modelos de negocio locales, cofinanciación comunitaria y la economía circular. En conclusión, la digestión anaerobia se presenta como una solución integral y replicable, que no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también promueve la autosuficiencia energética y la mejora de la calidad de vida en comunidades vulnerables.

PALABRAS CLAVES: Digestión anaerobia, aguas residuales, biogás, sostenibilidad.

ABSTRACT

This Master's Thesis reviews the technical, economic, and social feasibility of implementing anaerobic digestion systems for wastewater treatment in low-income communities. The methodology relied on a documentary review and the analysis of real case studies in Ecuador, Nepal, India, Peru, and Ghana, among others, in order to identify successful experiences and lessons applicable to similar contexts. Results show that anaerobic digestion is a sustainable alternative, capable of significantly reducing environmental pollution, generating biogas as a renewable energy source, and producing digestate suitable for agricultural use. Relevant barriers were identified, such as initial investment, technical training, and digestate management, but also opportunities linked to local business models, community co-financing, and the circular economy. In conclusion, anaerobic digestion emerges as an integral and replicable solution that not only contributes to climate change mitigation but also fosters energy self-sufficiency and improves quality of life in vulnerable communities.

KEYWORDS: Anaerobic digestion, wastewater, biogas, sustainability.



CONTENIDO

RESUMEN:	3
PALABRAS CLAVES:	3
ABSTRACT	3
KEYWORDS:.....	3
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Contexto global: desafíos del saneamiento y la gestión de vertidos a pequeña y mediana escala.....	1
1.2. Justificación de la elección de la digestión anaerobia: ventajas comparativas para el contexto de la baja renta.....	4
2. OBJETIVOS	6
2.2. Objetivos específicos	6
3. Estructura del trabajo fin de master	6
4. Generalidades de la digestión anaerobia y aplicación en la gestión de vertidos a pequeña-mediana escala	7
4.1. Descripción del proceso de la digestión anaerobia.....	7
4.1.1. Etapas biológicas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis	7
4.2. Ventajas operacionales y ambientales de la digestión anaerobia	8
4.3. Tecnologías de digestión anaerobia aplicables a pequeña-mediana escala para la gestión de vertidos.....	8
4.4. Desafíos y consideraciones de accesibilidad para la implementación de la digestión anaerobia a pequeña-mediana escala	10
5. Recuperación de recursos y los modelos de negocio sostenibles asociados a la digestión anaerobia	10
6. Casos de éxito en la gestión de vertidos y recuperación de recursos.....	11
6.1. Metodología para el análisis de casos de éxito	11
6.1.1. Criterios de selección y evaluación	11
6.2. Casos de depuración de aguas residuales.....	15
6.2.1. Caso 1: Sistema anaerobio para comunidades rurales en San José de la Parroquia Bellavista, Ecuador.....	15
6.2.2. Caso 2: Uso de reactores UASB Brasil	16
6.2.3. Caso 3: Sistemas DEWATS en Indonesia e India	16
6.3. Casos de tratamiento de residuos sólidos orgánicos con énfasis en co-digestión ..	17
6.3.1. Caso 4: Programa de soporte de Biogás (BSP) en Nepal.....	17
6.3.2. Caso 5: Programa Nacional de Biogás y Gestión de Estiércol en India	18
6.3.3. Caso 6: Programa de biodigestores en la región andina de Perú	19
6.3.4. Caso 7: Pequeños sistemas de biogás y humedales construidos para saneamiento in situ en Ghana	20



Universidad de Valladolid

Modelos de negocio sostenible a pequeña-
mediana escala para la gestión de vertidos.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

7. Recomendaciones para la implementación de DA en comunidades de escasos recursos	21
8. Discusión	22
9. Conclusiones.....	24
10. Referencias.....	24



Universidad de Valladolid

Modelos de negocio sostenible a pequeña-
mediana escala para la gestión de vertidos.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Proceso de digestión anaerobia. Fuente: FAO (2012).....	7
Ilustración 2	Reactor UASB. Fuente: Márquez & Martínez (2011).....	9
Ilustración 3	Mungwe, J. N. (2016). The fixed dome digester: An appropriate design for the context of Sub-Sahara Africa.	9
Ilustración 4	Sistema DEWATS (Indonesia/India) Fuente: BORDA (2019).	17
Ilustración 5	Your Electrical Guide. (2022, octubre)	18



Universidad de Valladolid

Modelos de negocio sostenible a pequeña-
mediana escala para la gestión de vertidos.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Comparativa de los diferentes casos. Elaboración propia.....	15
----------------	--	----



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto global: desafíos del saneamiento y la gestión de vertidos a pequeña y mediana escala.

Este documento se inscribe en un escenario global donde la digitalización y la sostenibilidad ecológica son pilares estratégicos del desarrollo sostenible. En este contexto, la administración eficiente de los residuos sólidos urbanos emerge como un desafío clave y constante para las grandes ciudades. El crecimiento poblacional imparable y el consumismo han propiciado la generación de estos residuos y de manera inexorable, han llevado al límite los sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de los mismos.

Una ciudad limpia en la que el servicio de gestión de residuos sólidos es claramente eficaz es un lugar saludable y agradable para los residentes, atractivo para los turistas y un buen lugar para hacer negocios y atraer inversión extranjera. (PNUMA, 2015, p.8)

La adaptabilidad de la digestión anaerobia no se restringe al manejo de desechos; su auténtico potencial radica en su habilidad para impulsar la recuperación de recursos, lo que a su vez permite la creación de nuevos modelos de negocio sustentables. Esta perspectiva es vital para progresar hacia una economía más cíclica. No obstante, el saneamiento inadecuado sigue siendo un desafío global con severas repercusiones en la salud pública y el desarrollo. La OMS (2024) estima que 1,4 millones de personas fallecen anualmente a causa de la falta de acceso a agua potable, saneamiento e higiene, predominantemente en países de ingreso bajo y mediano. Los riesgos directamente relacionados con el saneamiento son responsables de 564.000 de estas muertes, asociadas principalmente a enfermedades diarreicas, tropicales desatendidas y la malnutrición. (p.1)

A pesar de que desde la academia se han adelantado innumerables iniciativas de reciclaje y valorización energética, una porción significativa de los desechos sigue saturando los rellenos sanitarios. Esto no solo contamina el suelo y el agua y emite gases de efecto invernadero, sino que también propicia la propagación de enfermedades sistémicas.

La deficiente gestión de residuos y aguas residuales impone una considerable carga socioeconómica, exacerbando la pobreza y la desigualdad. Esta situación limita el desarrollo sostenible de las comunidades al afectar su productividad económica, generar costos adicionales en salud y remediación, y restringir el potencial de crecimiento y la participación plena en la fuerza laboral. (Banco Mundial, 2025, p.1-6)

Adicionalmente, la problemática ambiental se agrava por la contribución al cambio climático, ya que la descomposición anaeróbica de la materia orgánica en vertederos y aguas residuales sin tratar es una fuente significativa de metano (CH₄). Este potente gas de efecto invernadero es un foco de atención global, como lo demuestra el



Compromiso Global de Metano (GMP), a los cual 150 países se han sumado con el fin de reducir colectivamente las emisiones de metano en un 30% para 2030 con respecto a los niveles de 2020. (Nguyen et al., 2023, p. 4)

Esta problemática es particularmente nociva en países como Colombia, donde la infraestructura de gestión de residuos es insuficiente y la conciencia ciudadana sobre la separación en la fuente es limitada. La puesta en marcha de soluciones de saneamiento y manejo de desechos eficaces y sostenibles en comunidades de escasos recursos o en áreas rurales e inconexas no solo se topa con la falta de infraestructura, sino también con una serie de obstáculos estructurales y de múltiples aspectos. Estos obstáculos, que van más allá de lo puramente técnico, restringen considerablemente el avance y la escalabilidad de las intervenciones. Incluyen las áreas financieras, tecnológicas, operativas, socioculturales, institucionales y de política pública.

El sector privado podría ser una fuente importante de inversión para servicios de agua y saneamiento sostenibles, pero actualmente solo representa el 1,36% de la financiación privada total en estos sectores. Existen varias barreras que dificultan la financiación, como la falta de capacidad administrativa, corrupción, falta de herramientas analíticas y datos, y altos requisitos de inversión inicial. Es fundamental estudiar y desarrollar fuentes e instrumentos de financiamiento adaptados a las necesidades de inversión en infraestructura de agua y saneamiento. (Machete & Marques, 2024, p. 1)

El desarrollo de modelos de negocio basados en la economía circular refuerza la relevancia de la DA. Según la CEPAL (2019, p. 68), los proyectos que transforman residuos en recursos no solo reducen la presión ambiental, sino que también generan cadenas de valor locales vinculadas al suministro energético, la producción de fertilizantes y la creación de empleo rural. Esto convierte a la digestión anaerobia en un instrumento clave para la transición hacia economías circulares en regiones vulnerables.

A nivel global, esta dificultad económica se agudiza por una brecha de inversión sustancial en función del alcance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de agua y saneamiento para 2030; se requiere una inversión anual del 1.7% del PIB global, mientras que la inversión actual apenas alcanza el 1.1% del mismo. Por su parte, los problemas de asequibilidad están vinculados a infraestructuras deficientes y a la dificultad de los hogares para afrontar los costos. (Gallego et al., 2024, p. 1)

Además de la magnitud de la inversión requerida, la sostenibilidad financiera a largo plazo se ve comprometida por la dificultad de cubrir los costos recurrentes. La falta de solvencia de los proveedores de servicios hídricos, la debilidad de los incentivos para la eficiencia operativa y financiera, y la percepción de que los costos de extender el acceso a hogares de bajos ingresos superan los ingresos potenciales, dificultan significativamente la movilización de capital privado y sabotean la confianza de los



inversores. Esta situación, junto con subsidios insuficientes, hace que sea difícil atraer financiación y conduce a un acceso desigual a servicios esenciales. (Nautiyal, 2024, p. 2)

Las particularidades geográficas y demográficas de las áreas rurales, tales como la dispersión de las viviendas y la baja densidad de población, complican de manera significativa la ampliación de las redes de saneamiento tradicionales.

Esta desintegración eleva los gastos de instalación y conservación de la infraestructura requerida para garantizar el acceso universal a los servicios.

Existe una brecha considerable en la disponibilidad de tecnologías de saneamiento y tratamiento de agua que sean verdaderamente apropiadas para las condiciones específicas de las zonas rurales, incluyendo la disponibilidad limitada de recursos, la capacidad de operación local y la aceptación comunitaria. Muchas soluciones innovadoras o incluso tradicionales pueden no ser sostenibles si no se adaptan a las realidades socio-técnicas y ambientales del entorno. (Castro et al., 2021, p.1-12)

El trabajo comunitario a menudo implica la creación de comités, juntas o entes comunitarios encargados de gestionar servicios, o el fortalecimiento de las instituciones existentes. Es fundamental revisar y simplificar los requisitos administrativos y funciones de estos modelos de gestión, adaptándolos a los niveles de servicio y soluciones tecnológicas, entre otros factores. En áreas rurales dispersas, donde es común el autoabastecimiento, también es crucial capacitar a las familias en aspectos técnicos básicos y uso adecuado de las instalaciones, más allá de los temas de higiene y salud ambiental. (Álvarez, 2019, p. 88)

La confluencia de estas dificultades genera un ambiente complicado que impide progresos importantes en el saneamiento y la administración de desechos en comunidades en situación de vulnerabilidad. Es un sistema interconectado que necesita soluciones completas, innovadoras y ajustadas a situaciones locales particulares.

La persistencia de estas restricciones no solo amenaza la salud pública y el entorno natural, sino que también sostiene ciclos de pobreza e inequidades. Así pues, cualquier intento de progreso en este ámbito debe centrarse en vencer estos desafíos, formulando estrategias que fusionen factibilidad tecnológica con atractivo financiero, aceptación social y apoyo institucional.

Ante la complejidad de los desafíos estructurales asociados con la gestión integral de residuos sólidos en la urbe, la búsqueda y adopción de soluciones innovadoras y - sobre todo- sostenibles se vuelve imperativa para garantizar la sostenibilidad ambiental y el bienestar social. Es así como el presente trabajo adquiere relevancia al centrarse en la necesidad apremiante de realizar una revisión para el desarrollo



modelos de negocio sostenibles a pequeña y mediana escala que permitan una gestión efectiva de residuos y una maximización de la recuperación de recursos naturales.

Dichos modelos tienen como objetivo transformar el enfoque lineal tradicional de producción, consumo y eliminación, convirtiendo los residuos en recursos valiosos y fuentes de energía. La aplicación de tecnologías avanzadas, incluyendo sistemas inteligentes de seguimiento, optimización logística y plataformas de sensibilización ciudadana, desempeña un papel fundamental en la viabilidad y eficiencia de estas iniciativas descentralizadas.

Al promover soluciones adaptadas a las realidades tangibles, se consigue no solo reducir la dependencia de los vertederos sanitarios, sino también generar valor económico y social, lo que impulsa una economía circular genuina en ámbitos locales. La economía circular ofrece una visión convincente para un futuro donde los materiales se mantienen en uso, se retiene el valor y se minimizan los impactos ambientales. (WEF, 2019, p.5)

1.2. Justificación de la elección de la digestión anaerobia: ventajas comparativas para el contexto de la baja renta

En la búsqueda de alternativas de solución de alto impacto para los retos de la gestión de residuos, la digestión anaerobia es concebida como una tecnología biológica relevante. Este proceso, que ocurre en ausencia de oxígeno, permite la descomposición de la materia orgánica presente en los desechos, transformándola eficientemente en biogás –una fuente de energía renovable– y digestato, un biofertilizante orgánico rico en nutrientes.

La gestión de vertidos a pequeña y mediana escala se ha abordado históricamente mediante dos enfoques principales: tratamientos aerobios y tratamientos anaerobios. Los primeros, como los lodos activados o los filtros percoladores, requieren un suministro constante de oxígeno, lo cual implica altos costos energéticos y limitaciones en contextos rurales o de bajos recursos. En contraste, los sistemas anaerobios se caracterizan por su menor consumo energético, su capacidad para generar subproductos de valor y su adaptabilidad a condiciones de operación diversas (Metcalf & Eddy, 2014, p. 725).

Su importancia dentro del marco de este adelanto investigativo radica en su capacidad para ofrecer una respuesta integral a la problemática suscitada. En este sentido, se considera que la digestión anaerobia ofrece una solución integral y beneficiosa para abordar los desafíos de la gestión de vertidos orgánicos, lo que justifica su elección como objeto de estudio.

Entre las ventajas de esta estrategia se destacan su capacidad para recuperar recursos de manera eficiente y reducir significativamente la tasa de residuos orgánicos enviados a rellenos sanitarios. En primer lugar, posibilita una doble recuperación de



recursos; el biogás puede utilizarse para generar electricidad, calor o como combustible vehicular, mientras que el digestato mejora la fertilidad del suelo en la agricultura local.

En segundo lugar, al reducir la cantidad de residuos orgánicos en rellenos sanitarios, se minimiza la generación de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales negativos asociados con la descomposición anaerobia natural en estos sitios.

Si bien esta investigación examina la factibilidad de la digestión anaerobia en comunidades de bajos recursos, un análisis exhaustivo de los casos estudiados muestra que la mayoría de las implementaciones se realizan en áreas rurales o periurbanas. Esta aparente preferencia por ciertas orientaciones geográficas no menoscaba la importancia de los resultados obtenidos para el objetivo general.

De hecho, las experiencias en áreas rurales son especialmente valiosas, ya que suelen poseer características similares a las de las zonas urbanas de bajos ingresos, como la falta de infraestructura adecuada para el saneamiento y la gestión de residuos, el uso de fuentes de energía convencionales y la necesidad de soluciones económicas y descentralizadas.

La capacidad de adaptarse, la posibilidad de replicar y los modelos de negocio desarrollados en estas comunidades rurales proporcionan enseñanzas importantes que pueden ser aplicadas y ajustadas a diversos contextos de bajos ingresos, incluyendo aquellos en áreas urbanas, donde todavía existen limitaciones en infraestructura y la gestión de desechos es un reto significativo para la sostenibilidad ambiental y el bienestar social. En otras palabras, su viabilidad a pequeña y mediana escala, gracias a su naturaleza modular y adaptable, permite implementar configuraciones descentralizadas.

Esto la hace adecuada para comunidades y empresas que buscan una gestión autónoma y localizada de sus residuos orgánicos. La capacidad de generar biogás y digestato localmente puede reducir la dependencia de combustibles fósiles y fertilizantes químicos, y permitir la creación de modelos de negocio basados en la venta de estos subproductos, lo que puede contribuir a la autosuficiencia energética y a una transformación económica a nivel comunitario.

Este TFM examina exhaustivamente la digestión anaeróbica como método efectivo para reducción de las problemáticas subyacentes a problemas de saneamiento básico y vertidos como residuos sólidos y aguas residuales, considerando la gravedad del problema mundial causado por el tratamiento insuficiente de los anteriores, especialmente en regiones de bajos ingresos donde la falta de infraestructura y las limitaciones financieras son problemas importantes, y reconociendo el potencial de la digestión anaeróbica como una tecnología de tratamiento sostenible y de bajo costo.



2. OBJETIVOS

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo general revisar la viabilidad técnica, económica y social de la implementación de sistemas de gestión anaerobia para el tratamiento de vertido en aguas residuales y residuos sólidos en poblaciones de escasos recursos considerando su potencial para la mejora de la calidad de vida, la reducción de la contaminación ambiental y la promoción de la sostenibilidad.

2.2. Objetivos específicos

1. Revisar el impacto social derivado de la adopción e implementación de la digestión anaerobia en términos de aceptación comunitaria, mejora de salud y acceso a recursos.
2. Revisar experiencias y casos de éxito de implementación de digestión anaerobia en contextos similares, con el fin de identificar factores claves que favorecen la sostenibilidad y replicabilidad del modelo.
3. Proponer lineamientos y recomendaciones para la implementación de sistemas de digestión anaerobia en comunidades de bajos recursos, orientados a maximizar beneficios ambientales, sociales y económicos.

3. Estructura del trabajo fin de master

El presente TFM se estructura en cinco capítulos que abordan la viabilidad de la digestión anaerobia para el tratamiento de aguas residuales. La introducción contextualiza la problemática y define los objetivos del estudio.

En el siguiente apartado, se presentan los fundamentos de la digestión anaerobia y su aplicación en la gestión de vertidos, profundizando en los principios científicos y su relevancia para el tratamiento de aguas residuales. Seguidamente, se exploran las oportunidades económicas y de valorización de los subproductos en el apartado sobre la recuperación de recursos y los modelos de negocio sostenibles asociados a la digestión anaerobia.

Esto permite identificar las posibles ventajas y beneficios de la implementación de la digestión anaerobia en poblaciones de escasos recursos. Posteriormente, se analizan los desafíos y consideraciones para la implementación exitosa, identificando las barreras y facilitadores en el contexto de poblaciones de escasos recursos. Esto incluye la evaluación de factores técnicos, económicos y sociales que pueden influir en la viabilidad de la digestión anaerobia.

Más adelante, los estudios de caso en la gestión de vertidos y recuperación de recursos ilustran ejemplos prácticos y extraen lecciones aprendidas, permitiendo una mejor comprensión de la aplicación real de la digestión anaerobia. Finalmente, las conclusiones derivadas de la investigación resumen los hallazgos y presentan las implicaciones de los resultados obtenidos.

4. Generalidades de la digestión anaerobia y aplicación en la gestión de vertidos a pequeña-mediana escala

4.1. Descripción del proceso de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico esencial donde los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, transformando residuos diversos, como los de origen animal, vegetal e industrial, en biogás y bioabonos. Esta biotecnología no solo disminuye la contaminación y estabiliza los residuos, sino que también genera energía renovable en forma de metano y un valioso fertilizante, contribuyendo así a mejorar las condiciones sanitarias y a la producción de recursos sostenibles. (FAO, 2012, p.8-12)

Para comprender completamente la digestión anaerobia, es esencial analizar las complejas fases biológicas que la forman. Este procedimiento no es una respuesta sencilla, sino una serie ordenada de transformaciones microbianas que funcionan de forma interconectada.

4.1.1. Etapas biológicas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis

La DA procede en cuatro fases clave; la hidrólisis que descompone polímeros, seguida por la acidogénesis que forma ácidos orgánicos. Luego, la acetogénesis convierte estos en acetato e hidrógeno. Finalmente, la metanogénesis produce metano a partir de estos precursores. (Lorenzo & Obaya, 2005, p. 35)

Aparte de su intrincado proceso técnico, los beneficios inherentes de la digestión anaerobia la transforman en una opción ambiental y económicamente atractiva. Sus ventajas abarcan desde la eficacia en la generación de energía hasta la administración sostenible de subproductos.

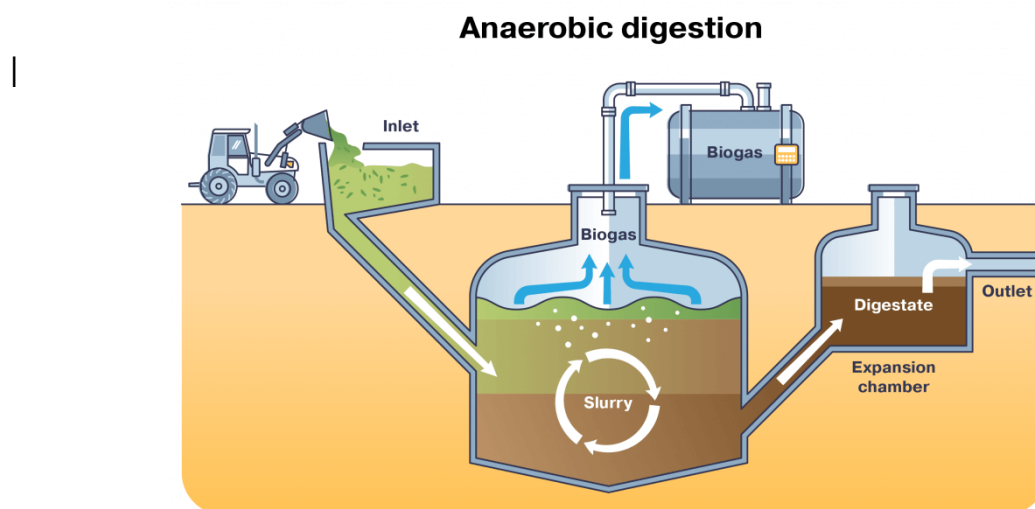


Ilustración 1 Proceso de digestión anaerobia. Fuente: FAO (2012)



4.2. Ventajas operacionales y ambientales de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia ofrece notables ventajas operacionales y ambientales. Permite una eficiente generación de biogás, una fuente de energía renovable, y produce digestato, que a su vez resulta siendo un valioso fertilizante que reduce la necesidad de abonos químicos. Este proceso se distingue por su baja producción de lodos y su adaptabilidad a diversas escalas y condiciones climáticas, consolidándose como una solución sostenible para la gestión de residuos orgánicos. (Parra, 2015, p.142)

4.3. Tecnologías de digestión anaerobia aplicables a pequeña-mediana escala para la gestión de vertidos

Para capitalizar estos beneficios, la digestión anaerobia ha progresado en varias aplicaciones y tecnologías de reactores, cada una concebida para perfeccionar el proceso dependiendo del tipo de desecho y las condiciones de operación. Estas innovaciones facilitan la adaptación de la tecnología a una variedad extensa de requerimientos.

Entre las tecnologías destacadas se encuentran los biodigestores de flujo continuo, que permiten un procesamiento constante de la materia orgánica. Específicamente, los Reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) *“como se muestra en la figura 2”* se caracterizan por el desarrollo de un manto de lodo granular altamente activo, mientras que los filtros anaerobios utilizan un soporte fijo para el crecimiento de biopelículas microbianas. Estos sistemas son fundamentales para la gestión de diversos efluentes, aunque a menudo requieren post-tratamientos para cumplir con los estándares de descarga. (Márquez & Martínez, 2011, p.17).

Así como también los biodigestores de domo fijo, implementada comúnmente en Nepal, China e India *“como se muestra en la figura 3”*. La tecnología de biogás a pequeña escala ofrece una oportunidad para una solución sostenible a largo plazo a los problemas energéticos domésticos en DC. Esta tecnología se basa en la digestión anaeróbica (DA) de materia orgánica para producir una mezcla de gases llamada biogás y digestato rico en nutrientes. Esta tecnología ofrece diversas ventajas económicas, sociales y ambientales. El principio de la DA es el mismo; sin embargo, se podrían utilizar diversos métodos, según el clima, el suelo, la materia orgánica y la disponibilidad de agua. Estos métodos permiten categorizar la tecnología y el proceso según parámetros operativos críticos. (Ndam Mungwe, 2016).

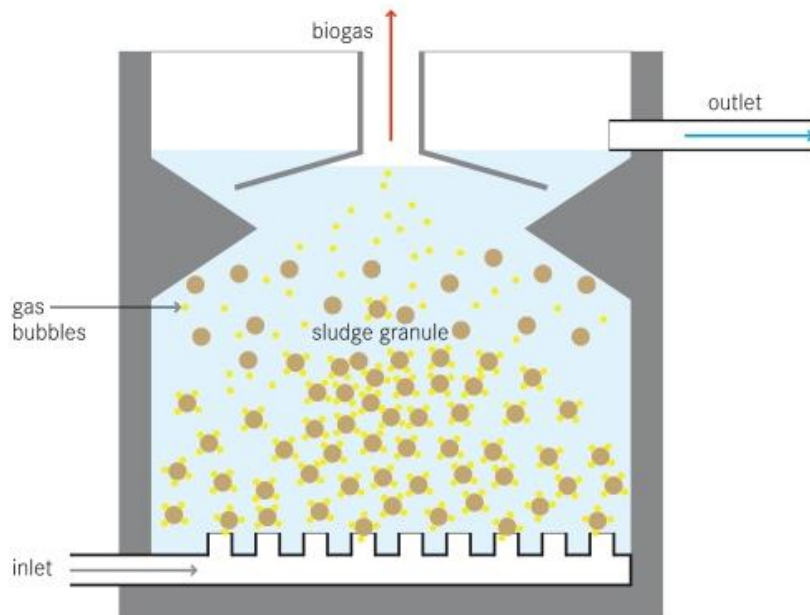


Ilustración 2 Reactor UASB. Fuente: Márquez & Martínez (2011)

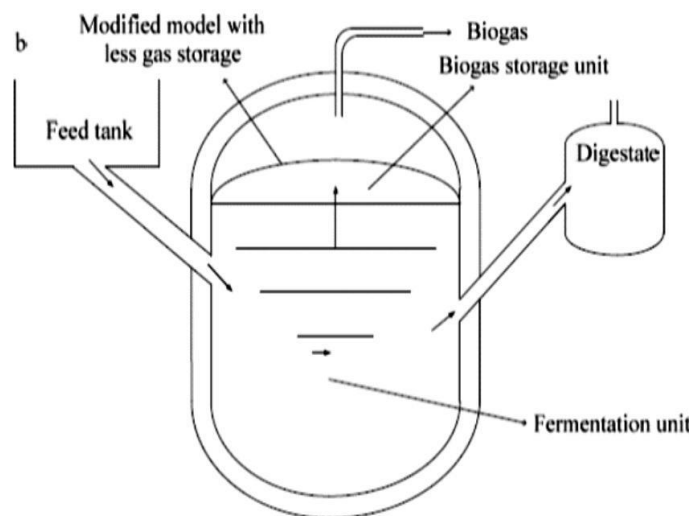


Ilustración 3 Mungwe, J. N. (2016). The fixed dome digester: An appropriate design for the context of Sub-Sahara Africa.

La digestión anaerobia impulsa la economía circular al transformar aguas residuales y residuos orgánicos en recursos valiosos, contribuyendo directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Genera biogás para uso energético y un digestato rico en nutrientes aplicable en agricultura, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y fertilizantes químicos. Esto crea oportunidades de negocio a diversas



escalas, especialmente en el sector rural y agroindustrial, al optimizar la gestión de residuos y generar ingresos a partir de sus subproductos. (CEPAL, 2019, p.57).

4.4. Desafíos y consideraciones de accesibilidad para la implementación de la digestión anaerobia a pequeña-mediana escala

A pesar de sus diversas ventajas y el futuro prometedor de la economía circular, la puesta en marcha eficaz de la digestión anaerobia presenta desafíos. Es crucial identificar y organizar cómo vencer estos obstáculos para garantizar el éxito y la viabilidad de los proyectos.

La puesta en marcha de proyectos de digestión anaerobia se enfrenta a desafíos significativos. Las barreras económicas, como la alta inversión inicial y la dificultad para conseguir financiamiento, son frecuentes. Se requiere capacitación técnica especializada para la operación y el mantenimiento de las plantas. Además, es fundamental garantizar la eliminación de patógenos en el agua y, en muchos casos, aplicar post-tratamientos a los efluentes para cumplir con las normativas de descarga. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2014, p.53)

Para establecer la digestión anaerobia como una respuesta de gran escala, son esenciales la innovación constante y la adaptación tecnológica. Esto significa superar los modelos convencionales y explorar nuevas maneras de incorporar la tecnología en diferentes situaciones y bajo distintas circunstancias.

La digestión anaerobia ofrece vastas oportunidades para la innovación y adaptación tecnológica, haciendo su implementación más accesible y eficiente. El desarrollo de biodigestores modulares y el uso de materiales reciclados en su construcción facilitan su despliegue en diversas escalas y contextos, reduciendo costos y el impacto ambiental. Asimismo, la integración de sistemas híbridos —combinando la digestión anaerobia con otras tecnologías— optimiza el tratamiento y la recuperación de recursos. Paralelamente, la capacitación comunitaria es esencial para asegurar una operación y mantenimiento efectivos, promoviendo la apropiación local de la tecnología y su sostenibilidad a largo plazo. (CEBAS-CSIC, 2018, p.15-18)

5. Recuperación de recursos y los modelos de negocio sostenibles asociados a la digestión anaerobia

Para los muchos autores la digestión anaerobia es una tecnología clave que convierte residuos orgánicos en recursos valiosos, produciendo biogás como fuente de energía renovable. A través de un proceso biológico que abarca desde la hidrólisis hasta la metanogénesis, no solo se gestionan residuos y aguas de manera efectiva, sino que también se promueven la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Aunque implementar estos sistemas presenta desafíos como la inversión inicial y la gestión del digestato, los beneficios son mayores. El uso de biodigestores modulares



hechos con materiales reciclados, la combinación de sistemas híbridos y la educación comunitaria son fundamentales. En resumen, la digestión anaerobia es una solución prometedora para un futuro más sostenible y para desarrollar nuevos modelos de negocio.

6. Casos de éxito en la gestión de vertidos y recuperación de recursos

6.1. Metodología para el análisis de casos de éxito

La selección y análisis de casos de estudio son fundamentales para obtener conclusiones sólidas en este TFM. Para garantizar la calidad y relevancia de los casos seleccionados, se adoptó una metodología de carácter sistemático en la cual prevalecen la revisión de los distintos casos de éxito. A continuación, se presentan los criterios utilizados para identificar y seleccionar los casos, así como los parámetros para su evaluación, con el fin de resolver si los ejemplos elegidos son realmente representativos en las implementaciones exitosas de digestión anaerobia en contextos geográficos de escasos recursos.

6.1.1. Criterios de selección y evaluación

Contexto de aplicación: Los casos seleccionados deben corresponder a implementaciones de digestión anaerobia en comunidades de escasos recursos, preferentemente en países en desarrollo o regiones con limitaciones de infraestructura y acceso a servicios básicos.

Tipo de vertido orgánico: Se buscarán casos que abarquen tanto el tratamiento de aguas residuales domésticas como la gestión de residuos sólidos orgánicos (incluyendo residuos agrícolas, estiércol, etc.), lo cual permitirá un análisis comparativo más amplio conforme al alcance del TFM.

Escala del proyecto: Los proyectos deben ser de pequeña a mediana escala siendo aproximadamente comunidades rurales de 50 a 500 habitantes, reflejando el enfoque del trabajo en soluciones descentralizadas y replicables.

Evidencia de éxito: Se priorizarán casos que presenten datos cuantificables o descripciones cualitativas sólidas de resultados positivos en términos de impacto ambiental, recuperación de recursos orgánicos, viabilidad económica e impacto social.

Disponibilidad de información: La existencia de documentación pública y accesible -artículos científicos, informes técnicos, estudios de caso publicados por organizaciones- es un requisito fundamental para un análisis profundo.

Diversidad geográfica y tecnológica: Se buscará incluir casos de diferentes regiones del mundo y que presenten variaciones en las configuraciones de los sistemas de digestión anaerobia, para enriquecer la perspectiva y la aplicabilidad de las lecciones aprendidas.



Caso	Tecnología	Evidencia de éxito	Factores clave	Barreras/amenazas	Modelos de negocio	Referencias bibliográficas
Colombia	Digestión anaerobia (DA)	Viabilidad teórica	Potencialidad técnica y económica	Brecha entre estudio teórico e implementación	Ahorro energético, reducción de costos de saneamiento	Beltrán, T. (2022). Aplicación de la digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de aguas residuales en zonas no interconectadas de Colombia. Repositorio Universidad de América. 8-71.
Ecuador	Reactor UASB + Filtro Anaerobio	Diseño técnico viable	Rigor del diseño y cumplimiento normativo	Ausencia de datos de implementación real	Ahorro en tratamiento de aguas, reutilización de efluentes	Tinoco Sáenz, R. G. (2017). Tratamiento de aguas residuales mediante un sistema anaerobio para comunidades rurales en el sitio San José de la Parroquia Bellavista. Universidad Técnica de Machala. 1-71



Modelos de negocio sostenible a pequeña-
mediana escala para la gestión de vertidos.

Universidad de Valladolid



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Nepal	Biodigestores domésticos	Impacto multidimensional positivo	Apoyo gubernamental masivo, beneficios tangibles	Posibles retos de mantenimiento y sostenibilidad	Ahorro por sustitución de leña/queroseno, uso de bio-estiércol	MITECO (2012). Biogas Support Program. Programa de apoyo al biogas de Nepal. 1-3.
India	Plantas de biogás domésticas	Beneficios reales	Subsidios, disponibilidad de estiércol, beneficios tangibles iniciales	Falta de soporte post-instalación, políticas centradas solo en la oferta	Ahorro por sustitución de combustibles, venta/uso de bio-estiércol	Raha, D., Mahanta, P., & Clarke, M. L. (2014). The implementation of decentralised biogas plants in Assam, NE India: The impact and effectiveness of the National Biogas and Manure Management Programme. Energy Policy. 80-91.
Perú	Biodigestores tipo flujo pistón	Viabilidad integral demostrada	Análisis de viabilidad integral, potencial de ahorro energético	Necesidad de pasar a implementación piloto	Ahorro en GLP/leña, venta/uso de bio-estiércol	Marcelo-Aldana, D., & Viera-Sernaqué, J. (2017). Proyecto de implementación de sistemas biodigestores para el aprovechamiento de residuos orgánicos generados por usuarios residenciales en la región Piura.



						Universidad de Piura. 231-243.
Ghana	Tratamiento de efluentes, co- compostaje	Modelos de negocio y valorización viables	Creación de valor económico, diversificación de ingresos	Complejidad de gestión de lodos fecales, necesidad de mercados estables	Venta de productos, creación de empleo, reducción de costos de saneamiento	Akpalu, A. S., & Gebrezgabher, S. (2023). After the flush: How a project in Ghana is turning human waste into an economic resource. IWMI Blog. 1- 4.



Tabla 1 Comparativa de los diferentes casos. Elaboración propia

6.2. Casos de depuración de aguas residuales

6.2.1. Caso 1: Sistema anaerobio para comunidades rurales en San José de la Parroquia Bellavista, Ecuador

El estudio mantuvo el enfoque en el **diseño** de un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante tecnología anaerobia específicamente adaptado para comunidades rurales. La aplicación se situó en una zona rural del Ecuador. La propuesta buscó abordar la problemática de la **gestión de aguas residuales** en asentamientos que, como éste, carecían de infraestructura de saneamiento adecuada, ofreciendo una solución que se integrara con las características y necesidades de estos entornos.

El vertido orgánico central que este sistema fue diseñado para tratar fueron las aguas residuales domésticas. El estudio abordó la caracterización de estas aguas, mencionando parámetros clave como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que fueron los indicadores directos de la carga orgánica presente en los efluentes de origen residencial. El objetivo fue reducir estos contaminantes para permitir una descarga segura al medio ambiente.

En cuanto a la escala del proyecto, se trató de un diseño técnico detallado para una comunidad rural específica. La propuesta dimensionó el sistema para atender a una población proyectada de 292 habitantes para el año 2017, con un caudal de diseño estimado de 0.61 litros por segundo (l/s). La solución tecnológica propuesta incluyó un **reactor de flujo ascendente de manto de lodos anaerobio (UASB) seguido de un filtro anaerobio (FA)**, configurado para operar de manera eficiente en esta escala comunitaria y con miras a la sostenibilidad local.

La evidencia de éxito en este caso se basó en los resultados proyectados y calculados a partir del diseño de ingeniería propuesto en el trabajo fin de master. El estudio previó una alta eficiencia de remoción de contaminantes, con una proyección de 80% para la DBO5 y 75% para la DQO para el sistema combinado UASB + FA. Lo más relevante fue que el diseño se formuló para cumplir con los estándares ambientales locales. Según los autores, "el diseño del sistema cumple con los límites máximos permisibles de descarga según la normativa ecuatoriana (TULSMA)" (p. 36), lo que validó su viabilidad en términos de cumplimiento ambiental y salud pública. No obstante, fue importante señalar que estos fueron resultados esperados del diseño y no datos de operación real de una planta implementada.

Geográficamente, se ubicó en una zona rural específica de Ecuador, lo que resaltó la aplicación de soluciones descentralizadas en contextos con acceso limitado a infraestructura centralizada. Tecnológicamente, la elección de la combinación UASB + FA para el tratamiento de aguas residuales domésticas fue una solución robusta y



bien establecida en el ámbito de la digestión anaerobia, adaptada aquí a una pequeña escala comunitaria. La propuesta de disposición del efluente tratado mediante infiltración en el terreno representó una adaptación a las condiciones rurales que buscó optimizar la gestión del agua en el sitio. (Tinoco & Espinoza, 2017, p.8-43)

6.2.2. Caso 2: Uso de reactores UASB Brasil

Brasil ha sido pionero en la implementación de reactores anaerobios de manto de lodos (UASB) para el tratamiento de aguas residuales urbanas a gran escala. Desde la década de 1980, diversas ciudades brasileñas han instalado plantas UASB debido a su bajo costo operativo, alta eficiencia en la reducción de DBO y DQO, y su adaptabilidad a climas cálidos.

Ejemplo destacado: la planta de Ribeirão Preto (São Paulo), diseñada para tratar caudales urbanos significativos, ha mostrado eficiencias superiores al 70% en remoción de carga orgánica. Este modelo ha sido replicado en más de 700 plantas en Brasil, convirtiendo al país en un referente global.

Beneficios: reducción de contaminación, menores costos energéticos frente a tecnologías aerobias, y generación de biogás utilizable como fuente energética.

Desafíos: necesidad de post-tratamiento para cumplir con normativas estrictas de vertido, así como limitaciones en zonas de clima frío.

6.2.3. Caso 3: Sistemas DEWATS en Indonesia e India

Los Sistemas de Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales (DEWATS, por sus siglas en inglés) son una alternativa sostenible implementada principalmente en zonas periurbanas y rurales de Asia. Estos sistemas, promovidos por BORDA (Bremen Overseas Research and Development Association), se basan en tecnologías anaerobias de bajo costo y fácil operación.

En Bangalore (India) y en Yogyakarta (Indonesia), se han desarrollado cientos de instalaciones DEWATS para comunidades, hospitales, escuelas y pequeñas industrias. Cada sistema combina sedimentadores, reactores anaerobios (como UASB o filtros), humedales construidos y lagunas de maduración.

Beneficios: alta replicabilidad, operación descentralizada, baja demanda de energía, generación de biogás y reutilización del efluente tratado para riego o recarga de acuíferos.

Desafíos: dependencia del compromiso comunitario, necesidad de capacitación en mantenimiento, y limitaciones en contextos de alta densidad poblacional.

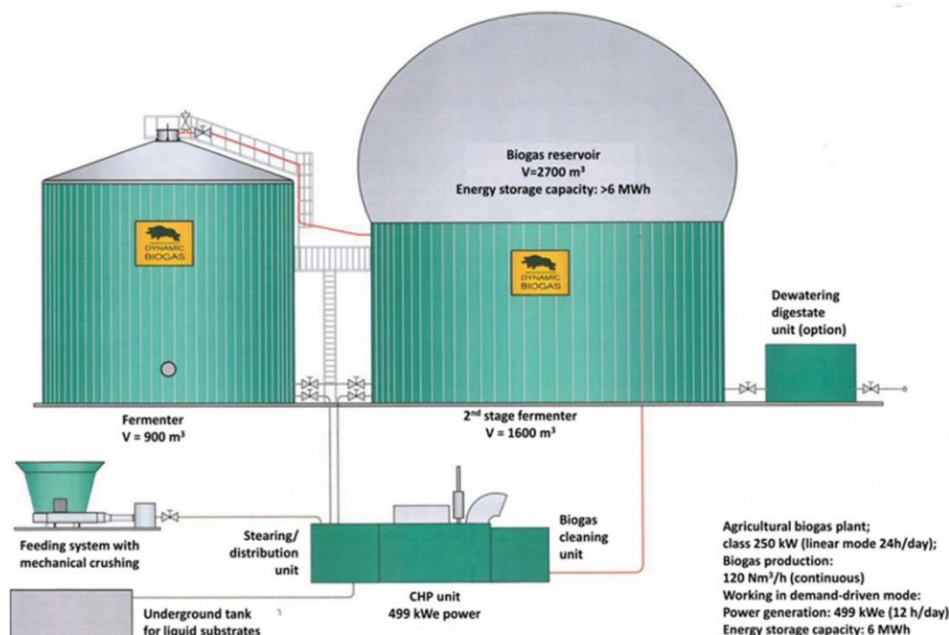


Ilustración 4 Sistema DEWATS (Indonesia/India) Fuente: BORDA (2019).

6.3. Casos de tratamiento de residuos sólidos orgánicos con énfasis en co-digestión

6.3.1. Caso 4: Programa de soporte de Biogás (BSP) en Nepal

El estudio se centró en el Programa de Apoyo al Biogás (BSP) en Nepal, la cual formó parte de un programa más amplio dirigido por el Centro de Promoción de Energía Alternativa (AEPC). El programa tuvo como objetivo la instalación de digestores de biogás en hogares ubicados principalmente en áreas rurales de Nepal, buscando satisfacer sus necesidades energéticas térmicas y generar impactos socioeconómicos y ambientales positivos.

El vertido orgánico central que se utilizó en este programa fueron los estiércoles de ganado. Estos se sometieron a un tratamiento anaeróbico para generar biogás, proponiéndolos como una fuente de energía renovable para cubrir las necesidades de cocción de los hogares, desplazando así combustibles convencionales como la leña o el queroseno.

La escala del proyecto fue considerablemente ambiciosa y extensa. El Programa de Apoyo al Biogás buscó instalar un total de 200.000 biodigestores a través de diferentes subproyectos a lo largo de Nepal, lo que representó una iniciativa a gran escala de descentralización energética y sanitaria en el ámbito rural.

La evidencia de éxito se manifestó en los múltiples beneficios y reducciones proyectadas por el programa. Se esperaba una significativa reducción de las

emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) al sustituir combustibles fósiles y biomasa no sostenible. Además de los beneficios ambientales, el proyecto apuntó a la mejora de las condiciones sanitarias en los hogares rurales mediante la instalación de letrinas, y la mejora de la salud de los ciudadanos al reducir la exposición a humos de cocción. El proyecto generó impactos positivos mejorando las condiciones socioeconómicas, ambientales y sanitarias de las poblaciones afectadas, validando así su éxito en la generación de un impacto multidimensional positivo.

La diversidad geográfica y tecnológica fue inherente al programa. Geográficamente, al enfocarse en áreas rurales de Nepal, el proyecto abarcó una vasta extensión con condiciones topográficas y climáticas variadas, lo que requirió la adaptabilidad de las soluciones. Tecnológicamente, la elección de biodigestores individuales para hogares para el tratamiento anaeróbico de estiércoles de ganado representó una solución descentralizada y a pequeña escala, adecuada para la dispersión de las poblaciones rurales y su dependencia de la ganadería como actividad económica. (MITECO, 2012, p.1-3)

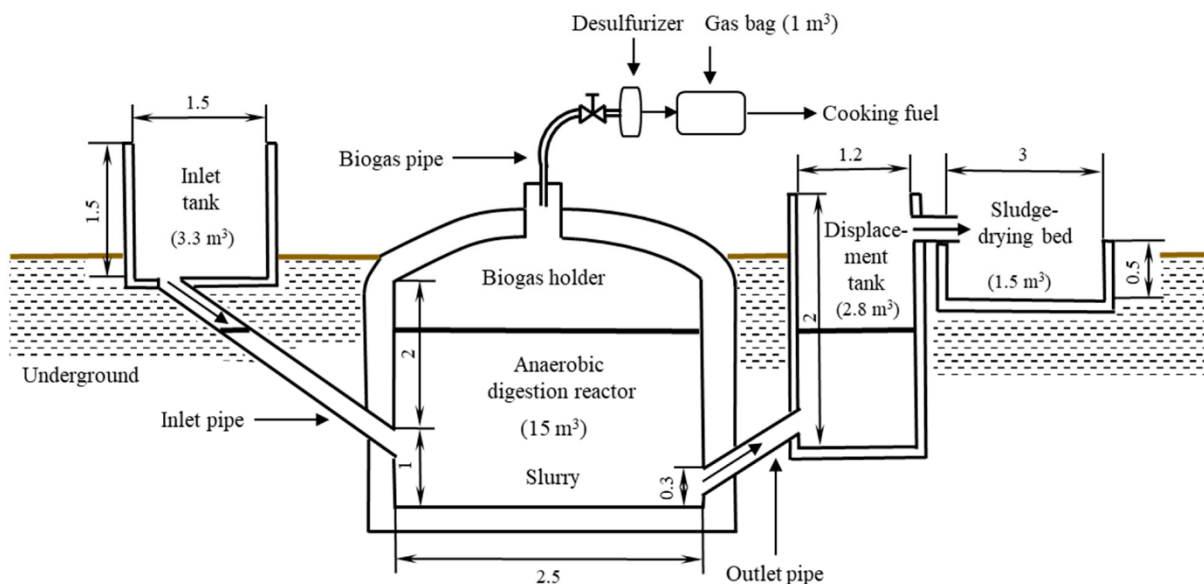


Ilustración 5 Your Electrical Guide. (2022, octubre)

6.3.2. Caso 5: Programa Nacional de Biogás y Gestión de Estiércol en India

Este estudio se dedicó a la implementación del Programa Nacional de Biogás y Gestión de Estiércol, una política gubernamental india de gran envergadura. El estudio se focalizó en la región de Assam, en el noreste de India, donde la iniciativa buscó transformar el panorama energético rural y la gestión de residuos mediante la instalación masiva de plantas de biogás domésticas. El despliegue se concibió como una solución descentralizada para afrontar la dependencia de combustibles tradicionales y las deficiencias en el manejo de residuos orgánicos en las comunidades rurales.



El sustrato fundamental para la producción de biogás en el marco de este programa fue el estiércol animal, principalmente de ganado bovino. Este insumo biológico se procesó en los digestores para generar biogás, destinado a sustituir la leña y el queroseno en las actividades cotidianas como cocinar e iluminar. Además, el programa promovió el aprovechamiento del digestato, el lodo resultante del proceso, como un fertilizante orgánico enriquecido, fomentando así un ciclo de nutrientes y una gestión integrada de los recursos.

La escala del proyecto a nivel nacional fue monumental, proyectando la instalación de un número considerable de unidades de biogás domésticas. Aunque la investigación profundizó en la dinámica de implementación y los desafíos específicos encontrados en Assam, su alcance implicó un estudio de un despliegue tecnológico a gran escala que aspiraba a tener un impacto transformador en la infraestructura energética y ambiental de miles de hogares rurales en todo el país.

La evaluación del éxito de este programa reveló una compleja interacción de logros y desafíos operativos. Si bien las plantas de biogás aportaron beneficios tangibles en términos de acceso a energía más limpia, mejoras en la salud de las familias (al reducir la exposición al humo) y ventajas económicas por el ahorro de combustibles y la producción de fertilizante, la investigación identificó que la eficiencia operativa de las unidades instaladas se vio a menudo comprometida. El estudio subrayó la necesidad de reorientar las políticas, que habían estado centradas excesivamente en la simple provisión de tecnología, hacia un modelo que fomentara una mayor participación de las fuerzas del mercado y garantizara servicios post-instalación más robustos y accesibles para la sostenibilidad a largo plazo.

La diversidad geográfica y tecnológica resultó ser un factor determinante. Geográficamente, la India, con su vasta extensión y variadas condiciones climáticas y socioeconómicas, planteó un desafío inherente a la uniformidad de la implementación. Las plantas de biogás domésticas, concebidas como una tecnología anaerobia descentralizada, representaron una solución adaptada a la dispersión de las poblaciones rurales y su dependencia de la ganadería. El estudio enfatizó que la clave para el éxito y la sostenibilidad de esta tecnología reside en la capacidad de adaptar la implementación a las particularidades locales y en el empoderamiento de las comunidades beneficiarias. (Raha, Mahanta, & Clarke, 2014, p.1-10)

6.3.3. Caso 6: Programa de biodigestores en la región andina de Perú

Este estudio se enfocó en la propuesta de implementación de sistemas biodigestores para el aprovechamiento de residuos orgánicos generados por usuarios residenciales en Perú. La iniciativa surgió como una respuesta a la problemática de la gestión inadecuada de los residuos sólidos urbanos, especialmente la fracción orgánica, en los hogares, que contribuía a la contaminación ambiental y a problemas de salud



pública. El proyecto buscó transformar estos residuos en recursos valiosos, mejorando tanto la salubridad como el acceso a energía.

El tipo de vertido orgánico central que este proyecto abordó fueron los residuos orgánicos domésticos, específicamente aquellos generados por los usuarios residenciales, como los restos de alimentos y otros desechos biodegradables del hogar. Estos residuos fueron identificados como un sustrato viable para la producción de biogás y biofertilizante, ofreciendo una solución de gestión integral a nivel domiciliario.

La escala del proyecto fue concebida a nivel de implementación para usuarios residenciales individuales. El estudio propuso el diseño de un biodigestor tipo flujo pistón de 1 m³ de capacidad, dimensionado para las necesidades de un hogar promedio. Este enfoque a pequeña escala permitió un control localizado de los residuos y una generación descentralizada de energía, haciendo la solución replicable en múltiples viviendas. El estudio evaluó la factibilidad técnica, económica, social y ambiental de esta implementación piloto.

La evidencia de éxito se demostró a través de un exhaustivo análisis de factibilidad. El estudio concluyó que la implementación de este proyecto piloto en la región de Piura resultó ser técnica, económica, social y ambientalmente viable. Se proyectó que la producción de biogás alcanzaría aproximadamente 0.2 m³ por día por usuario, lo que representó un ahorro económico significativo en costos de combustible para cocinar. Además del beneficio energético, el proyecto prometió una reducción sustancial de los residuos orgánicos dispuestos de manera inadecuada, la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y la producción de un fertilizante orgánico valioso, contribuyendo al desarrollo sostenible.

La diversidad geográfica y tecnológica se reflejó en la adaptación de la solución a un contexto regional específico. Geográficamente, la Región Piura presentó sus propias condiciones climáticas y socioeconómicas que influyeron en el diseño y la viabilidad del biodigestor. Tecnológicamente, la elección del biodigestor tipo flujo pistón de pequeña capacidad representó una solución probada y adecuada para el tratamiento de residuos orgánicos residenciales, fácil de operar y mantener a nivel de hogar. Este enfoque subrayó la importancia de seleccionar tecnologías apropiadas que puedan integrarse eficazmente en las dinámicas de las comunidades rurales y periurbanas. (Aldana & Vieira, 2019, p.231-240)

6.3.4. Caso 7: Pequeños sistemas de biogás y humedales construidos para saneamiento in situ en Ghana

Este proyecto, liderado por el Instituto Internacional de Gestión del Agua (IWMI), emergió como una respuesta crucial a los desafíos persistentes de financiación y capacidad en la gestión de residuos en Ghana. La iniciativa se propuso convertir los residuos humanos de una carga ambiental en un valioso activo económico, impulsando activamente una economía circular en el sector del saneamiento. La



intervención se centró en contextos urbanos, donde la abrumadora mayoría de los residentes dependía de sistemas de saneamiento in situ, generando volúmenes significativos de lodos fecales sin un tratamiento o valorización adecuados.

El tipo de vertido orgánico principal que este ambicioso proyecto abordó fueron los lodos fecales provenientes directamente de las fosas sépticas y letrinas de pozo domésticas. En una de sus facetas, la iniciativa también incorporó el aprovechamiento de residuos orgánicos municipales, combinándolos con los lodos fecales para maximizar la recuperación de recursos y generar productos de alto valor.

La escala del proyecto no se limitó a una única demostración; más bien, comprendió un portafolio estratégico de intervenciones a nivel urbano en distintas localidades. En Kumasi, por ejemplo, se implementó un sistema donde el efluente tratado de los hogares se redirigía eficientemente para la acuicultura, creando un circuito de valor. Paralelamente, en Somanya, se estableció una robusta planta de co-compostaje con una capacidad anual de 200 toneladas, diseñada para procesar lodos fecales y residuos orgánicos municipales, transformándolos en fertilizante.

La evidencia de éxito del proyecto fue innegable, manifestándose en claros beneficios económicos y socio ambientales. En Kumasi, los ingresos generados por la venta de pescado lograron cubrir una parte sustancial de los costos de operación de la planta de tratamiento, validando un modelo sostenible. La planta de Somanya no solo produjo un fertilizante orgánico seguro y nutritivo, sino que también generó una importante cantidad de empleos directos, priorizando activamente la inclusión de mujeres y jóvenes. El proyecto también fortaleció las capacidades locales a través de programas de formación, capacitando a actores públicos y privados en la identificación e implementación de modelos viables de recuperación de recursos.

La diversidad geográfica y tecnológica constituyó una fortaleza fundamental del proyecto. Geográficamente, la elección de Kumasi y Somanya reflejó la adaptabilidad de las soluciones a distintos entornos urbanos ghaneses, cada uno con sus particularidades en cuanto a generación y gestión de residuos. Tecnológicamente, el proyecto demostró una notable versatilidad al emplear enfoques distintos y complementarios: desde la innovadora combinación de tratamiento de aguas residuales con acuicultura y acuaponía en Kumasi, hasta el proceso de co-compostaje optimizado en Somanya. Esta estrategia diversificada resaltó la flexibilidad necesaria para transformar los residuos humanos en recursos valiosos en distintos escenarios. (Akpalu & Gebrezgabher, 2023, p.1-4)

7. Recomendaciones para la implementación de DA en comunidades de escasos recursos

De acuerdo a la revisión realizada de los diferentes casos exitosos en la Digestión anaerobia, específicamente en comunidades de escasos recursos, se pueden realizar las diversas recomendaciones:

1. Aspectos técnicos:



- Fomentar el uso de biodigestores modulares de bajo costo y adaptables a distintas escalas.
 - Integrar tecnologías híbridas (anaerobia + humedales o lagunas) para garantizar calidad de efluente.
 - Promover materiales reciclados y diseños simplificados para reducir costos.
2. Aspectos sociales:
- Capacitar a las comunidades en operación y mantenimiento básico.
 - Crear comités comunitarios o asociaciones de usuarios responsables de la gestión.
 - Adaptar las soluciones a la cultura local para favorecer la aceptación.
3. Aspectos económicos:
- Desarrollar modelos de negocio basados en la venta de biogás, biofertilizantes y servicios ambientales.
 - Promover esquemas de microfinanciación y cofinanciación comunitaria.
 - Establecer incentivos fiscales o subsidios iniciales para superar la barrera de inversión.
4. Aspectos políticos e institucionales:
- Establecer marcos regulatorios claros y consistentes para la digestión anaerobia.
 - Integrar estos proyectos en planes nacionales de saneamiento y cambio climático.
 - Fortalecer alianzas público-privadas para escalar las experiencias exitosas.

8. Discusión

La revisión de los distintos casos de éxito en la implementación de digestión anaerobia revela patrones comunes y diferencias significativas según el contexto geográfico, económico y social. En países como Brasil e India, la adopción masiva se ha favorecido por políticas públicas de apoyo y la existencia de instituciones técnicas fuertes. En contraste, en contextos como Perú o Ghana, el éxito depende más de la apropiación comunitaria y la integración con actividades económicas locales.

La comparación de los diferentes casos de éxito permite identificar tanto patrones comunes como limitaciones contextuales. Se observa que la digestión anaerobia ha demostrado ser viable técnica y socialmente en comunidades rurales pequeñas (50–500 habitantes), donde la ausencia de infraestructura de alcantarillado y la dependencia de combustibles sólidos tradicionales (leña, carbón) crean condiciones favorables para la adopción de biodigestores comunitarios o sistemas descentralizados.



Un elemento transversal es la necesidad de post-tratamiento en muchos sistemas, especialmente para cumplir con normativas ambientales exigentes, así como la participación comunitaria. En los casos de Nepal y Perú, el éxito no se explica únicamente por la tecnología empleada, sino por la apropiación de los beneficiarios, quienes perciben beneficios directos como la sustitución de leña por biogás o el uso del digestato en la agricultura.

Desde el punto de vista técnico, los casos analizados muestran una clara adaptabilidad tecnológica: biodigestores de domo fijo en Asia, “como podemos ver en la ilustración 3” reactores UASB en Brasil, o sistemas DEWATS en India e Indonesia. Esta diversidad tecnológica evidencia que no existe un modelo único, sino soluciones ajustadas al caudal, la composición de los residuos y la capacidad de gestión local. Sin embargo, la tecnología por sí sola no garantiza sostenibilidad: la clave está en la gestión operativa y financiera.

En relación con el impacto social, los casos analizados evidencian que la aceptación comunitaria constituye un factor decisivo para la sostenibilidad de la digestión anaerobia. Programas como el BSP en Nepal demostraron mejoras en salud pública al reducir la exposición a humos de combustión, mientras que experiencias en India y Ghana destacaron la creación de empleo y el acceso a fertilizantes y energía renovable. Estos hallazgos refuerzan que los beneficios sociales tangibles incrementan la apropiación local y aseguran la permanencia de la tecnología.

En el plano económico, los proyectos exitosos presentan un denominador común: esquemas de financiamiento mixto. En Nepal, los subsidios estatales redujeron la barrera de entrada; en Brasil, la cooperación internacional facilitó la inversión inicial; mientras que en India se combinaron aportes comunitarios y apoyo gubernamental. Esto sugiere que, en comunidades rurales pequeñas de América Latina, la viabilidad económica depende de diseñar modelos híbridos que involucren al Estado, la cooperación y la comunidad.

Un tema crítico identificado es la sostenibilidad a largo plazo. Muchos proyectos piloto funcionan en los primeros años, pero corren el riesgo de deteriorarse por falta de mantenimiento, repuestos o capacitación continua. La discusión debe resaltar que la tecnología es exitosa solo si va acompañada de un marco institucional sólido que garantice seguimiento técnico y monitoreo ambiental.

El aporte de este TFM consiste en mostrar que, a pesar de las diferencias contextuales, existen lecciones replicables: la adaptabilidad de los sistemas, la importancia de involucrar a la comunidad y la viabilidad de modelos circulares que convierten residuos en recursos valiosos.



9. Conclusiones

En el marco de estudio de este TFM, se revisaron alternativas y casos de éxito para poblaciones que no poseen con los recursos suficientes y suplir sus necesidades de saneamiento.

Es por esto que esta revisión bibliográfica, nos demuestra que la **Digestión Anaerobia** constituye una alternativa viable, sostenible y replicable para el tratamiento descentralizado de aguas residuales en comunidades de escasos recursos. A través de la revisión y el análisis de casos de éxito en distintas regiones del mundo, se confirma su capacidad para generar impactos ambientales positivos (reducción de contaminantes), beneficios económicos (producción de fertilizantes orgánicos, creación de empleo local, ahorro de combustibles), y mejoras sociales (acceso de servicios básicos de saneamiento, mejora de salud pública).

Sin embargo, la implementación enfrenta importantes desafíos con la inversión social, necesidad de capacitación técnica y generación de los subproductos. No obstante, estos obstáculos pueden superarse mediante modelos de negocio comunitarios, participación activa de comunidades en la planificación e implementación del proyecto. Así mismo, el respaldo y la creación de marcos normativos claros son condiciones necesarias para garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

En cuanto al impacto social, se concluye que la digestión anaerobia no solo representa una alternativa tecnológica, sino también un motor de desarrollo comunitario. La aceptación social se potencia cuando los beneficios son inmediatos y tangibles, como la mejora de la salud por la disminución del humo de combustibles sólidos, el acceso a recursos energéticos y agrícolas, y la creación de oportunidades económicas locales. Estos aspectos reafirman la viabilidad de la digestión anaerobia como solución integral que articula sostenibilidad ambiental con progreso social.

En resumen, la digestión anaerobia no debe entenderse únicamente como una tecnología de tratamiento de residuos, sino como un motor de desarrollo integral que articula la protección ambiental con el progreso social y económico. Su implementación, enmarcada en políticas de economía circular y apoyada por un enfoque participativo, representa una oportunidad tangible para avanzar hacia el cumplimiento de los objetivos de Desarrollo Sostenible y mejorar la calidad de vida de las poblaciones más vulnerables.

10. Referencias

Akpalu, A. S., & Gebrezgabher, S. (2023). After the flush: How a project in Ghana is turning human waste into an economic resource. IWMI Blog. 1-4. <https://www.iwmi.org/blogs/after-the-flush-how-a-project-in-ghana-is-turning-human-waste-into-an-economic-resource/>

Aldana, J., & Vieira, J. (2017). Proyecto de implementación de sistemas biodigestores para el aprovechamiento de residuos orgánicos generados por usuarios residenciales



en la región Piura. Universidad de Piura. 231-243.
<https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3421>

Álvarez, L. (2019). Acceso a servicios de agua y saneamiento en áreas rurales dispersas: Camino a la universalización. Banco Interamericano de Desarrollo. 88.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Acceso-a-servicios-de-agua-y-saneamiento-en-areas-rurales-dispersas-Camino-a-la-universalizacion.pdf>

Banco Mundial. (2025). El agua es la base de un planeta habitable. Grupo Banco Mundial. 1-6. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>

Beltrán, T. (2022). Aplicación de la digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de aguas residuales en zonas no interconectadas de Colombia. Repositorio Universidad de América. 8-71.
<https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/e50f278a-3cb3-4cb4-9fa2-220c6e5aa6bb/content>

Castro, M., García, C., & Vargas, L. (2021). Sostenibilidad de tecnologías para el tratamiento de agua en el ámbito rural: un análisis de la literatura. Revista de Ingeniería. 1–12. <https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/rin/article/view/18063>

CEPAL. (2019). Economía circular en América Latina y el Caribe: Una visión para 2030. Repositorio CEPAL. 68-70.
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45026/1/S1901187_es.pdf

CEBAS-CSIC. (2018). Valorización de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia. Repositorio CEBAS-CSIC. 15-18.
https://www.cebasscsic.es/docs/libros/Valorizacion_de_residuos_organicos_mediante_digestion_anaerobia.pdf

FAO. (2012). Manual de biogás: Producción y usos en zonas rurales. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 8-12.
<https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>

Gallego, A., Gómez, D., Bautista, G., & Pardo, J. C. (2024). Una mirada al sector de agua potable y saneamiento. Corficolombiana. 1-13.
<https://investigaciones.corfi.com/documents/38211/0/22-03-2024.%20Informe%20Agua%20potable%20y%20saneamiento%20comentarios%20AJUST.pdf/44b6b441-eab5-412e-4c18-120c932448ee>

Lorenzo, Y., & Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. Redalyc. 35–48.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>

Machete, R., & Marques, M. (2024). Scaling up private finance for water, sanitation and hygiene (WASH) in developing countries: A review of opportunities and challenges. Water Resources Management. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03672-y>

Márquez Vázquez, M., & Martínez González, S. A. (2011). Reactores anaerobios de flujo ascendente. Antología. Laboratorio de Ingeniería Ambiental dcl Centro



Tecnológico Aragón. 17-28.

https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/M%C3%81RQUEZ%20y%20MART%C3%8DNEZ%202011%20Reactores%20Anaerobios.pdf

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2014). Manual para la elaboración de proyectos de biodigestores. Programa Nacional de Biogás. 53-56.

https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/05/Manual_Biodigestores.pdf

MITECO. (2012). Biogas Support Program. Programa de apoyo al biogas de Nepal. 1-3.

https://www.cambioclimatico.gob.es/recursos/docs/2016/cdm_cc_ficha_nepal_es.pdf

Nautiyal, S. (2024). Barriers to investment in water and sanitation for public private partnerships. Human Right 2 Water. 1-3. <https://humanright2water.org/wp-content/uploads/2024/10/241016-WAPPP-Accessibility.pdf>

Nguyen, L., Quintana, A., Rowland, A., & Vegh-Gaynor, G. (2023). Mitigación del Metano: Una Estrategia Global de Salud. Climate and Health Alliance. 4-23. <https://climateandhealthalliance.org/wp-content/uploads/2023/09/MethaneReport-Waste-ES.pdf>

OMS (2024). Saneamiento. Centro de Prensa. 1. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation#:~:text=Datos%20y%20cifras,la%20resistencia%20a%20los%20antimicrobianos.>

Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. Producción + Limpia. 142–159. <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/5746937.pdf>

PNUMA. (2015). Perspectivas mundiales de la gestión de residuos. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 8. <https://www.unep.org/resources/report/global-waste-management-outlook>

Raha, D., Mahanta, P., & Clarke, M. L. (2014). The implementation of decentralised biogas plants in Assam, NE India: The impact and effectiveness of the National Biogas and Manure Management Programme. Energy Policy. 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.030>

Tinoco Sáenz, R. (2017). Tratamiento de aguas residuales mediante un sistema anaerobio para comunidades rurales en el sitio San José de la Parroquia Bellavista. Universidad Técnica de Machala. 1-71. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/10900>

WEF. (2019). A New Circular Vision for Electronics: Time for a global reboot. Obtenido de World Economic Forum. 5. https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf



Banco Mundial. (2025). El agua es la base de un planeta habitable. Grupo Banco Mundial. 1–6. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>

CEPAL. (2019). Economía circular en América Latina y el Caribe: Una visión para 2030. Repositorio CEPAL. 68–70. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45026/1/S1901187_es.pdf

Márquez Vázquez, M., & Martínez González, S. A. (2011). Reactores anaerobios de flujo ascendente. Antología. Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Centro Tecnológico Aragón. 17–28. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/M%C3%81RQUEZ%20y%20MART%C3%8DNEZ%202011%20Reactores%20Anaerobios.pdf

Metcalf & Eddy. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill Education. 5ª edición.

Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. Producción + Limpia, 10(2), 142–159. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5746937.pdf>

Van Lier, J. B., Vashi, A., Van der Lubbe, J., & Heffernan, B. (título del capítulo o del artículo). *Anaerobic sewage treatment using UASB reactor systems: Engineering and Operational Aspects*. Delft University of Technology. Este texto explora los primeros desarrollos del UASB en Cali (Colombia) y su implementación a gran escala en Brasil desde los años 80.

Judd Water & Wastewater Consultants. (2023). Schematic of upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB). En UASB technology. Recuperado de sitio web de Judd Water & Wastewater Consultants

Energypedia. (2016, 7 de enero). Fixed-dome biogas plants. En Fixed-dome plants overview. Recuperado de Energypedia

Mungwe, J. N. (2016). The fixed dome digester: An appropriate design for the context of Sub-Sahara Africa. Renewable Energy and Sustainable Development.