



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

TITULACIÓN INTEGRAL

OPCIÓN: TESIS

**DISEÑO DE LETRINAS CON ARRASTRE HIDRÁULICO
USANDO MATERIALES LOCALES DEL SUR DE TAMAULIPAS
ASEGURANDO QUE ARMONICEN CON LAS VIVIENDAS
PARA UNA MEJOR ACEPTACIÓN DEL USUARIO**

Que para obtener el título de
Ingeniero Ambiental

Presenta:

**Angel Eduardo Amaya Alvarado
C16070401**

Asesor:

Dr. Hilario Rafael Martinez Flores

Cd. Madero, Tamaulipas

Septiembre 2026



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
Subdirección Académica
Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica

Ciudad Madero, Tamaulipas, **03/septiembre/2026**

No. Oficio: 0.0238/26
Asunto: Autorización de Impresión.

C. ANGEL EDUARDO AMAYA ALVARADO
No. CONTROL C16070401

De acuerdo al fallo emitido por el Jurado asignado para la revisión de su trabajo profesional, integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	HILARIO RAFAEL MARTÍNEZ FLORES
SECRETARIO:	ERIKA ALARCÓN RUÍZ
VOCAL:	ROSA ELENA MORALES GUERRERO
SUPLENTE:	ELSA MARÍA GARZA MORALES

Y considerando que llena todos los requisitos del reglamento de titulación en vigor del Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, doy a Usted autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional de la Opción TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS).

"DISEÑO DE LETRINAS CON ARRASTRE HIDRÁULICO USANDO MATERIALES LOCALES DEL SUR DE TAMAULIPAS, ASEGURANDO QUE ARMONICEN CON LAS VIVIENDAS PARA UNA MEJOR ACEPTACIÓN DEL USUARIO"

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Por Mi Patria y Por Mi Bien"

C. RUTH ZURISADAI DEL ANGEL ALDANA
JEFA DEL DEPTO. DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



ccp. Archivo

RZDAA/dahb



2026
año de
Margarita Maza



Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a mi madre, que en paz descanse, cuya memoria ha sido la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante en cada etapa de mi vida. Su ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia continúa guiando mis pasos y motivándome a dar lo mejor de mí en cada meta que emprendo. Este logro también le pertenece a ella.

A mi padre, por su apoyo incondicional, por cada consejo, sacrificio y muestra de confianza que me brindó a lo largo de mi formación. Su fortaleza y respaldo constante me permitieron afrontar los desafíos con determinación y mantenerme firme en el camino hacia la culminación de esta importante etapa profesional.

A mis profesores y asesores, por compartir generosamente sus conocimientos, experiencias y enseñanzas. Su dedicación, paciencia y compromiso con la formación académica fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo y para mi crecimiento como profesionista y como persona.

A mis compañeros y amigos, quienes me acompañaron durante este recorrido académico, compartiendo aprendizajes, experiencias, retos y momentos inolvidables. Gracias por su amistad, apoyo y compañía tanto en los momentos de éxito como en aquellos de dificultad.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este trabajo representa no solo un logro personal, sino también el resultado del apoyo, la enseñanza y la confianza que he recibido de cada uno a lo largo de este camino.

Resumen

El presente trabajo aborda la problemática del saneamiento básico en comunidades rurales y periurbanas del sur de Tamaulipas, donde un porcentaje significativo de viviendas carece de acceso a drenaje, lo que genera riesgos sanitarios, ambientales y sociales. A partir de un diagnóstico territorial apoyado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), se identificaron 36 comunidades sin servicio de drenaje en el municipio de Altamira, representando aproximadamente 2,288 familias afectadas.

Como solución, se propone el diseño de una letrina con arrastre hidráulico construida con materiales locales, buscando al mismo tiempo armonizar estéticamente con las viviendas de la región para asegurar la aceptación del usuario. El proyecto integra un biodigestor dimensionado mediante parámetros de carga diaria, tiempo de retención, volumen líquido, fase gaseosa y volumen total, tomando como referencia datos climáticos, productivos y bibliográficos pertinentes.

La propuesta constituye un modelo de saneamiento técnicamente viable, ambientalmente sostenible, económicamente accesible y socialmente aceptable, que combina la higiene del arrastre hidráulico con la sostenibilidad del biodigestor. Se plantea como una alternativa replicable en otros contextos rurales con características similares.

Índice

Agradecimientos	ii
Resumen.....	iii
Índice	iv
Capítulo 1- Introducción.....	1
1.1.- Introducción	1
1.2.- Planteamiento de problema	2
1.3.- Objetivo General	4
1.4.- Objetivos específicos.....	4
1.5.- Justificación	4
1.6.- Alcance	6
1.6.1.- Alcance geográfico	6
1.6.2.- Alcance técnico	7
1.6.3.- Alcance temporal	7
1.6.4.- Limitaciones del estudio	8
Capítulo 2- Antecedentes.....	10
2.1.- Antecedentes	10
2.2.- Marco Teórico	13
2.2.1.- Análisis de alternativas de saneamiento	13
2.2.2.- Biodigestor	17
2.2.3.- Humanure	24
2.2.4.- Tratamiento de Residuos	30
2.3.- Marco Normativo.....	32
2.3.1.-Normatividad internacional	32
2.3.2.- Marco legal nacional	34
Capítulo 3- Metodología	40
3.1.- Revisión bibliográfica y normativa	41
3.2.- Delimitación del área de estudio	42
3.3.- Identificación de localidades.....	42
3.4.- Identificación de comunidades sin drenaje	43
3.5.- Selección de materiales constructivos.....	43

3.6.- Difusión del proyecto para aumentar la aceptación social.....	43
3.7.- Dimensionamiento del biodigestor.....	44
3.8.- Evaluación de la viabilidad	46
Capítulo 4- Resultados	47
4.1.- Caracterización territorial y delimitación del área de estudio.....	47
4.1.1.- Condiciones generales	52
4.1.2.- Problemáticas y retos del territorio.....	57
4.2.- Identificación de comunidades sin acceso a drenaje.....	58
4.3.- Selección de materiales constructivos.....	59
4.3.1.- Criterios de selección	60
4.3.2.- Materiales seleccionados.....	61
4.3.3.- Resultados de la selección de materiales	63
4.4.- Difusión del proyecto.....	63
4.5.- Diseño Biodigestor	68
4.5.1.- Carga Diaria	68
4.5.2.- Tiempo de Retención hidráulica	70
4.5.3.-Volumen liquido de biodigestor.....	71
4.5.4.- Volumen Total.....	72
4.5.5.- Radio del biodigestor	72
4.5.6.- Largo del biodigestor	72
4.6.- Evaluación de la viabilidad de la propuesta.....	73
4.6.1.- Viabilidad ambiental	73
4.6.2.- Viabilidad social	76
4.6.3.- Síntesis de la evaluación	78
Capítulo 5- Conclusiones	79
Capítulo 6- Bibliografía	83

Capítulo 1- Introducción

1.1.- Introducción

El saneamiento básico es uno de los pilares fundamentales para el desarrollo social y la salud pública. A nivel mundial, millones de personas carecen aún de instalaciones sanitarias seguras, situación que genera problemas de contaminación, proliferación de enfermedades gastrointestinales y deterioro de la calidad de vida. En México, esta problemática se acentúa en zonas rurales o periféricas donde el acceso a sistemas de drenaje centralizado es limitado o inexistente.

En el estado de Tamaulipas, particularmente en su zona sur, las condiciones climáticas, los suelos y las características socioeconómicas presentan desafíos específicos para el saneamiento doméstico. A pesar de los esfuerzos gubernamentales y comunitarios, muchas viviendas continúan utilizando letrinas rudimentarias o sistemas de disposición inadecuados, los cuales resultan insalubres, poco duraderos o estéticamente rechazados por los usuarios.

Las tecnologías sanitarias de bajo costo, como las letrinas secas, han sido promovidas en distintos programas de desarrollo rural; sin embargo, su implementación ha enfrentado resistencia cultural debido a la falta de confort, los olores, el mantenimiento requerido y su apariencia, que muchas veces no armoniza con la vivienda ni con las aspiraciones de modernidad de las familias. Por otro lado, los sistemas de arrastre hidráulico convencionales, aunque más higiénicos y socialmente aceptados, suelen ser costosos y demandan materiales no disponibles en las localidades, además de requerir una infraestructura hídrica que no siempre está presente.

Frente a este panorama, surge la necesidad de un enfoque interdisciplinario que integre conocimientos de ingeniería civil, diseño arquitectónico, sostenibilidad ambiental y participación social. Este trabajo propone el diseño de una letrina con arrastre hidráulico que utilice materiales locales del sur de Tamaulipas y que, además, armonice con el estilo constructivo de las viviendas. Con ello se busca no solo atender las necesidades sanitarias, sino también generar un sentido de pertenencia y aceptación estética que favorezca su uso continuo y adecuado.

1.2.- Planteamiento de problema

El acceso a un sistema de saneamiento adecuado sigue siendo un desafío para diversas comunidades del sur de Tamaulipas, donde coexisten zonas urbanas con alta densidad poblacional y comunidades rurales o periurbanas con servicios básicos limitados. A pesar de los avances en infraestructura urbana en municipios como Tampico, Altamira y Ciudad Madero, las localidades periféricas y rurales continúan enfrentando carencias significativas en materia de drenaje y disposición sanitaria.

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020) y la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI, 2024), en Tamaulipas aproximadamente entre el 6 % y el 12 % de las viviendas no cuentan con conexión al drenaje público, y un número similar presenta deficiencias en el acceso a agua entubada. En la zona sur del estado, donde se concentran comunidades como Estación Cuauhtémoc, Mata del Abra, Monte Alto, Miradores, Chapopote y ejidos periféricos de Altamira, la situación es aún más compleja debido al crecimiento no planificado y la dispersión habitacional. Estas condiciones provocan que gran parte de la población dependa de letrinas rudimentarias, pozos sépticos deficientes o descargas a cielo abierto, generando riesgos para la salud y el medio ambiente.

La falta de sistemas sanitarios adecuados no solo se traduce en contaminación del suelo y del agua subterránea, sino también en la persistencia de enfermedades gastrointestinales, presencia de vectores y pérdida de dignidad y confort en el hogar. Sin embargo, uno de los factores menos abordados en los programas de saneamiento es la aceptación social y estética de las soluciones propuestas. En muchos casos, los modelos de letrinas ecológicas o secas introducidos en comunidades rurales han sido rechazados o abandonados por considerarse incómodos, difíciles de mantener o visualmente inadecuados en relación con el entorno arquitectónico de la vivienda.

Por otro lado, los sistemas sanitarios de arrastre hidráulico, que resultan más familiares y aceptados culturalmente, suelen implicar altos costos de materiales (tuberías, tanques, sanitarios cerámicos) y dependencia de productos industriales que no siempre están disponibles en la región. En consecuencia, existe una brecha entre la viabilidad técnica y la aceptación cultural y económica de las soluciones de saneamiento.

El diseño de una letrina con arrastre hidráulico que aproveche materiales locales del sur de Tamaulipas podría representar una alternativa viable, sustentable y de bajo costo. Sin embargo, para que dicha propuesta sea efectiva, no basta con asegurar la funcionalidad técnica: debe también armonizar visual y estructuralmente con las viviendas del entorno, respetando los estilos constructivos y las preferencias estéticas de los usuarios.

El problema central, por tanto, se puede definir como la necesidad de desarrollar un modelo de letrina con arrastre hidráulico que sea técnica, económica, ambiental y socialmente viable, empleando materiales locales y un diseño arquitectónico coherente con las viviendas del sur de Tamaulipas. Se busca así incrementar la aceptación y el uso sostenido de instalaciones sanitarias mejoradas, contribuyendo a reducir los impactos ambientales y sanitarios derivados del manejo inadecuado de excretas.

1.3.- Objetivo General

Diseñar letrinas con arrastre hidráulico usando materiales locales del sur de Tamaulipas, armonizándolas con las viviendas para asegurar la aceptación del usuario.

1.4.- Objetivos específicos

1. Definir geográficamente el área de estudio correspondiente a las comunidades rurales del sur de Tamaulipas
2. Elaborar un mapa de acceso al drenaje para las comunidades rurales del sur de Tamaulipas, identificando zonas de mayor vulnerabilidad.
3. Identificar los materiales de construcción locales disponibles en las comunidades rurales seleccionadas, evaluando su disponibilidad, costo y propiedades para su uso en la construcción de letrinas.
4. Desarrollar propuestas de diseño para letrinas con arrastre hidráulico que utilicen materiales locales y que se integren armoniosamente con la tipología de las viviendas de las comunidades rurales seleccionadas.

1.5.- Justificación

La presente investigación responde a una necesidad urgente en comunidades rurales y periurbanas del sur de Tamaulipas: el acceso a servicios sanitarios dignos, funcionales y culturalmente aceptables. A pesar de los avances en infraestructura urbana, una proporción significativa de localidades en esta región carece de sistemas de drenaje, lo que limita la implementación de soluciones convencionales como el alcantarillado. Esta carencia expone

a la población a riesgos sanitarios, contaminación ambiental y prácticas insalubres que afectan su calidad de vida.

Las letrinas tradicionales, especialmente las de pozo seco, han sido promovidas como alternativas de bajo costo. Sin embargo, su aceptación es limitada debido a factores como olores, dificultad de limpieza, percepción de incomodidad y falta de integración estética con las viviendas. En este contexto, la letrina de arrastre hidráulico surge como una solución intermedia que mejora la higiene, reduce olores y se asemeja a los sanitarios urbanos, facilitando su adopción por parte de los usuarios.

Además, el uso de materiales locales como piedra caliza, bloques de tierra comprimida, madera regional y tejas de barro permite reducir costos, fortalecer la economía comunitaria y respetar la identidad arquitectónica de las viviendas. Esta integración estética no solo mejora la percepción del usuario, sino que promueve la apropiación y el mantenimiento del sistema sanitario.

La incorporación de un biodigestor como sistema de tratamiento de los desechos humanos añade una dimensión ecológica al proyecto. Este componente permite la degradación anaeróbica de los residuos, reduciendo la contaminación, eliminando patógenos y generando subproductos útiles como biogás o fertilizante. La combinación de arrastre hidráulico y biodigestor representa una solución integral, sostenible y replicable en contextos similares.

Desde una perspectiva social, el diseño participativo y adaptado al entorno favorece la inclusión de las comunidades en el proceso de construcción y uso del sistema, lo que incrementa su efectividad y permanencia. Desde el punto de vista técnico, el modelo propuesto es viable, escalable y compatible con las condiciones del sur de Tamaulipas. Y desde el enfoque ambiental, contribuye a la mitigación de impactos negativos asociados al saneamiento deficiente.

Por todo lo anterior, esta tesis se justifica como una contribución significativa al desarrollo de soluciones sanitarias sostenibles, culturalmente sensibles y técnicamente viables, que pueden mejorar la salud, el bienestar y la dignidad de las comunidades rurales y periurbanas del sur de Tamaulipas.

1.6.- Alcance

1.6.1.- Alcance geográfico

El presente estudio se circunscribe a la zona sur del estado de Tamaulipas, con énfasis en comunidades rurales y periurbanas del municipio de Altamira que carecen de servicio formal de drenaje sanitario. La delimitación territorial se realizará mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), empleando información cartográfica y estadística oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).

El análisis geográfico contempla la identificación de polígonos que representen localidades con menos de 2,500 habitantes —clasificadas como rurales conforme a criterios nacionales— y la superposición de capas de infraestructura sanitaria existente. Esta aproximación permite establecer un diagnóstico espacial que oriente la selección de zonas prioritarias para la propuesta técnica.

No se incluyen en el estudio áreas urbanas consolidadas con cobertura de alcantarillado sanitario ni zonas industriales con sistemas de tratamiento propios, ya que el enfoque se orienta exclusivamente a comunidades con carencia de infraestructura básica de saneamiento.

1.6.2.- Alcance técnico

Desde el punto de vista técnico, la investigación se enfoca en el diseño y dimensionamiento de un sistema sanitario descentralizado compuesto por una letrina con arrastre hidráulico integrada a un biodigestor anaerobio. El alcance comprende:

- Determinación de la carga diaria de excretas generada por vivienda.
- Cálculo del tiempo de retención hidráulica (TRH).
- Dimensionamiento del volumen útil del biodigestor.
- Consideración del espacio para fase gaseosa (aproximadamente 20–30% del volumen total).
- Definición de materiales constructivos locales.

Los criterios de diseño se fundamentan en principios de ingeniería sanitaria y digestión anaerobia descritos en literatura técnica especializada (Metcalf & Eddy, 2014; Tilley et al., 2014). Asimismo, se consideran lineamientos de calidad ambiental y control de descargas establecidos en la normativa mexicana aplicable.

El estudio no contempla la construcción física del sistema ni la evaluación experimental a largo plazo de su desempeño operativo, sino que se limita al diseño técnico y evaluación de viabilidad conceptual y comparativa.

1.6.3.- Alcance temporal

El análisis territorial, diagnóstico y diseño técnico se desarrollan con base en información estadística y normativa vigente al momento de la investigación, incluyendo datos del Censo

de Población y Vivienda 2020 del INEGI y estadísticas recientes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2022).

El estudio se enmarca dentro del periodo académico correspondiente al desarrollo del proyecto de tesis, por lo que los resultados reflejan las condiciones demográficas, normativas y ambientales observadas en dicho periodo.

No se realiza un monitoreo longitudinal posterior a la implementación del sistema propuesto, ni una evaluación de impacto en el largo plazo, lo cual representa una posible línea futura de investigación.

1.6.4.- Limitaciones del estudio

Entre las principales limitaciones se identifican las siguientes:

Disponibilidad y actualización de datos estadísticos: la información censal puede no reflejar cambios recientes en infraestructura o crecimiento poblacional posterior a su publicación (INEGI, 2020).

Ausencia de pruebas piloto en campo: el diseño se basa en parámetros teóricos y literatura técnica especializada (Appels et al., 2008; Metcalf & Eddy, 2014), sin validación experimental directa en cada comunidad seleccionada.

Variabilidad en condiciones geotécnicas y sociales: factores como tipo de suelo, nivel freático y aceptación comunitaria pueden variar entre localidades, lo que podría requerir ajustes específicos en la etapa de implementación.

Restricciones presupuestales y administrativas: la aplicación práctica del sistema dependerá de disponibilidad de recursos financieros y coordinación institucional, aspectos que no forman parte del alcance directo de esta investigación.

A pesar de estas limitaciones, el estudio proporciona una base técnica sólida para el diseño de soluciones sanitarias descentralizadas en comunidades rurales del sur de Tamaulipas, alineadas con principios de sostenibilidad y derecho humano al saneamiento reconocidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2010).

Capítulo 2- Antecedentes

2.1.- Antecedentes

El saneamiento básico es reconocido internacionalmente como un componente esencial para la protección de la salud pública, la conservación ambiental y el desarrollo sostenible. La carencia de infraestructura sanitaria adecuada en comunidades rurales y periurbanas continúa siendo una problemática relevante, especialmente en países en desarrollo, donde millones de personas aún carecen de acceso a sistemas seguros de disposición y tratamiento de excretas humanas.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) han señalado que el saneamiento deficiente constituye una de las principales causas de enfermedades gastrointestinales, contaminación de cuerpos de agua y degradación ambiental (OMS & UNICEF, 2023). De acuerdo con el informe *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022*, aproximadamente 1,500 millones de personas en el mundo no cuentan con servicios de saneamiento gestionados de manera segura, situación que afecta principalmente a poblaciones rurales y vulnerables.

En respuesta a esta problemática, diferentes investigaciones han promovido el desarrollo de tecnologías descentralizadas de saneamiento que puedan adaptarse a contextos rurales con limitaciones económicas e infraestructura insuficiente. Entre estas tecnologías destacan los biodigestores anaerobios, sistemas que permiten el tratamiento biológico de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia, reduciendo la carga contaminante y generando subproductos aprovechables como biogás y digestato.

A nivel internacional, Agar et al. (2022) realizaron un estudio sobre el potencial ambiental de la producción de biogás a partir de excretas humanas y estiércol animal. Los autores concluyeron que los biodigestores representan una alternativa eficiente para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero y reducir la contaminación derivada de residuos orgánicos domésticos y pecuarios. Asimismo, señalaron que estas tecnologías son especialmente viables en comunidades rurales donde no existe acceso a sistemas centralizados de saneamiento.

Por otra parte, Martí-Herrero (2019) desarrolló una guía técnica para el diseño e instalación de biodigestores tubulares en América Latina, estableciendo criterios relacionados con el tiempo de retención hidráulica, volumen de carga y condiciones climáticas necesarias para optimizar el proceso anaerobio. El autor destaca que los biodigestores domésticos pueden construirse con materiales accesibles y bajo costo operativo, favoreciendo su implementación en comunidades rurales con recursos limitados.

En el ámbito sanitario, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) publicó las *Guidelines on sanitation and health*, donde establece que los sistemas de saneamiento deben prevenir el contacto humano con excretas durante todas las etapas de manejo, transporte y disposición final. Estas directrices respaldan el uso de tecnologías anaerobias siempre que cuenten con diseño adecuado y medidas que reduzcan riesgos microbiológicos y contaminación ambiental.

Asimismo, UNICEF (2021) ha promovido el enfoque WASH (Water, Sanitation and Hygiene), el cual integra infraestructura sanitaria, educación ambiental y participación comunitaria como elementos fundamentales para garantizar la sostenibilidad de proyectos de saneamiento rural. Este enfoque reconoce que la aceptación social y cultural de las tecnologías implementadas resulta indispensable para asegurar su funcionamiento a largo plazo.

En México, el acceso al saneamiento continúa presentando desigualdades importantes entre zonas urbanas y rurales. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2023) reporta que numerosas localidades rurales aún carecen de infraestructura adecuada para el manejo de aguas residuales y excretas, situación que favorece la contaminación de suelos y acuíferos, además de incrementar riesgos sanitarios.

Diversos estudios nacionales han abordado alternativas descentralizadas de saneamiento para atender esta problemática. Carrasco (s. f.) desarrolló un modelo de letrina con arrastre hidráulico conectada a un biodigestor anaerobio, resaltando las ventajas higiénicas y ambientales del sistema frente a las letrinas tradicionales y fosas rudimentarias. Entre los principales beneficios identificados se encuentran la reducción de olores, el menor contacto directo con residuos y la posibilidad de tratar parcialmente las aguas residuales domésticas.

De igual manera, Culala (2023) investigó criterios para el diseño y emplazamiento de biodigestores domésticos, señalando que factores como la temperatura ambiental, el tipo de suelo, la disponibilidad de agua y las características sociales de la comunidad influyen directamente en el desempeño del sistema. El estudio concluye que los biodigestores representan una alternativa técnicamente viable para comunidades rurales mexicanas debido a su simplicidad operativa y bajo costo de mantenimiento.

En el estado de Tamaulipas, particularmente en el municipio de Altamira, el crecimiento urbano e industrial ha generado contrastes importantes entre zonas con infraestructura consolidada y comunidades rurales con rezago en servicios básicos. Diversas localidades rurales y periurbanas presentan carencias de drenaje sanitario, obligando a la población a utilizar fosas improvisadas, letrinas tradicionales o sistemas inadecuados de disposición de excretas.

Esta situación representa un riesgo ambiental debido a la posible infiltración de contaminantes hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos, especialmente considerando la presencia de lagunas, esteros y humedales característicos de la región sur de Tamaulipas. Además, la falta de saneamiento adecuado incrementa la vulnerabilidad sanitaria de la población rural.

2.2.- Marco Teórico

2.2.1.- Análisis de alternativas de saneamiento

En zonas sin acceso a redes de drenaje, las soluciones de saneamiento deben ser adaptadas al contexto físico, económico y cultural. Las principales alternativas se clasifican en dos grandes grupos:

a) Sistemas sin agua (secos)

- **Letrinas de pozo seco:** Consisten en una excavación cubierta con una losa y una caseta. Son de bajo costo, pero presentan problemas de olores, proliferación de insectos y necesidad de vaciado periódico.



Figura 1. Letrina de pozo seco (<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-letrina>)

- Letrinas ventiladas (VIP): Incorporan un tubo de ventilación que reduce olores y entrada de insectos. Requieren una buena orientación al sol y mantenimiento del tubo.



Figura 2. Letrina de pozo ventilado (<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-letrina>)

- Letrinas compostables: Separan orina y heces para su tratamiento como abono. Son ecológicas, pero requieren capacitación, mantenimiento constante y aceptación cultural.

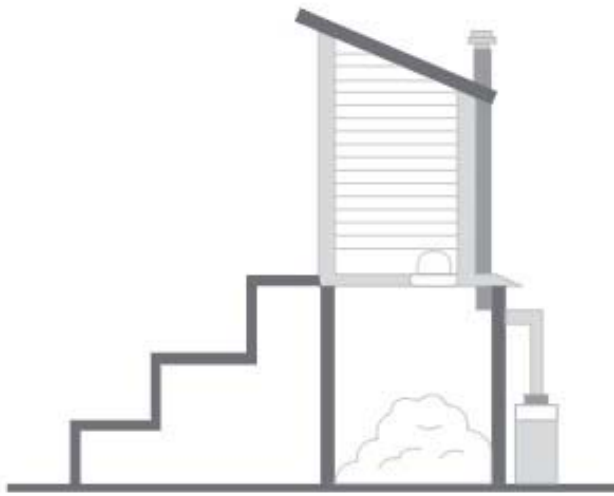


Figura 3. Letrina compostable (<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-letrina>)

b) Sistemas con agua (húmedos)

- Letrinas de arrastre hidráulico: Utilizan una pequeña cantidad de agua (balde o cisterna) para evacuar los desechos hacia una fosa séptica o biodigestor. Son más higiénicas y aceptadas, pero requieren acceso mínimo a agua.



Figura 4. Letrina de arrastre hidráulico (<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-letrina>)

- Sanitarios con biodigestor: Sistemas más complejos que tratan los residuos para generar biogás o fertilizante. Son sostenibles, pero costosos y con mayor necesidad de mantenimiento técnico.

Tabla 1: Comparativa entre modelos de letrinas

Modelo	Tipo	Requiere agua	Ventajas principales	Desventajas principales	Costo estimado (MXN)
Pozo seco	Seco	No	Bajo costo, fácil construcción	Olores, insectos, vaciado frecuente, baja aceptación	\$2,000 – \$4,000
Ventilada (VIP)	Seco	No	Menor olor, más higiénica que el pozo seco	Requiere orientación solar, mantenimiento del tubo	\$3,500 – \$6,000
Compostera	Seco	No	Ecológica, genera abono, sin agua	Requiere separación de residuos, mantenimiento, capacitación, menor aceptación cultural	\$5,000 – \$8,000
Arrastre hidráulico	Húmedo	Sí (mínima)	Mayor higiene, menor olor, más aceptada, compatible con estética local	Requiere acceso a agua, fosa séptica o biodigestor	\$6,000 – \$12,000

Modelo	Tipo	Requiere agua	Ventajas principales	Desventajas principales	Costo estimado (MXN)
Sanitario con biodigestor	Húmedo	Sí	Alta eficiencia, tratamiento de residuos, generación de biogás	Alto costo, instalación técnica, mantenimiento especializado	\$10,000 – \$18,000

De acuerdo con la tabla 1, las letrinas secas son más económicas, pero su aceptación es baja debido a factores culturales, olores y mantenimiento. Las soluciones ecológicas como las composteras o biodigestores son sostenibles, pero requieren mayor inversión inicial y capacitación técnica.

La letrina de arrastre hidráulico representa una solución intermedia ideal para comunidades sin drenaje, pero con acceso limitado a agua. Su mayor aceptación se debe a su similitud con los sanitarios urbanos y su potencial de integración estética.

2.2.2.- Biodigestor

Un biodigestor es un sistema que aprovecha la digestión anaeróbica, un proceso biológico natural que ocurre en ausencia de oxígeno, para transformar residuos orgánicos en biogás y abono orgánico. (Guibi et al., 2019).

a) Funcionamiento

Este proceso se divide en varias etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, donde los microorganismos transforman los compuestos complejos en

moléculas más simples, terminando en la producción de biogás (mezcla principalmente de metano y dióxido de carbono). (Manyi-Loh et al., 2015)

Componentes principales: Un biodigestor típico incluye una cámara de digestión, un sistema de entrada para los residuos, un sistema de salida para el digestato y una salida para el biogás (Rajendran et al., 2012).

El diseño puede variar según el tipo de residuo y la escala de uso, pero todos buscan mantener condiciones óptimas de temperatura, pH y retención hidráulica para maximizar la producción de biogás. (Lima et al., 2020)

b) Etapas

b.1) Hidrólisis

En esta etapa, los microorganismos hidrolíticos descomponen los compuestos orgánicos complejos (como carbohidratos, proteínas y lípidos) en moléculas más simples, como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Este paso es fundamental porque permite que los compuestos grandes sean transformados en sustancias que pueden ser utilizadas por otros microorganismos en las siguientes etapas. (Leite & Povinelli, 1999)

b.2) Acidogénesis

Durante la acidogénesis, las bacterias acidogénicas fermentan los productos de la hidrólisis, convirtiéndolos en ácidos volátiles (como ácido acético, propiónico y butírico), alcoholes, dióxido de carbono y gas hidrógeno. Esta etapa es crucial para la producción de los sustratos que serán utilizados en la acetogénesis y metanogénesis. (Leite & Povinelli, 1999)

b.3) Acetogénesis

En la acetogénesis, las bacterias acetogénicas transforman los ácidos volátiles y alcoholes producidos en la etapa anterior en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Este paso es importante porque genera los principales sustratos para la producción de metano en la etapa final. (Leite & Povinelli, 1999)

b.4) Metanogénesis

En la metanogénesis, las arqueas metanogénicas utilizan el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono para producir metano y dióxido de carbono, que constituyen el biogás. Esta etapa es la responsable de la generación de energía útil en forma de biogás y es la más sensible a cambios en el pH y la temperatura. (Leite & Povinelli, 1999)

c) Tipos

Los biodigestores se clasifican principalmente según su diseño, modo de operación y tipo de sustrato. A continuación, se detallan los tipos más comunes de biodigestores:

c.1) Biodigestores por diseño

i. Biodigestores de tipo domo fijo (Indian, Chinese, etc.): Son los más utilizados en zonas rurales. Consisten en un tanque subterráneo donde el biogás se acumula en una cúpula superior. El diseño es simple y de bajo costo, ideal para familias y pequeñas comunidades. (Orrico Júnior et al., 2009)

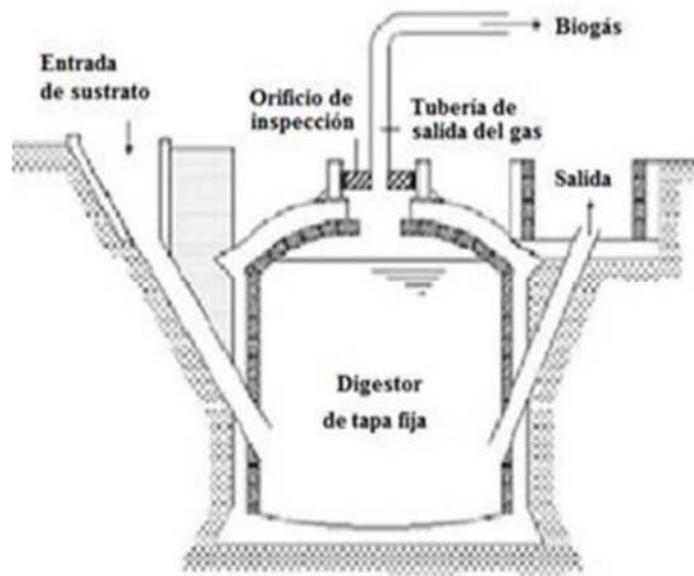


Figura 5. Biodigestor de domo fijo (Nicho Alvarado et al., 2021)

ii. Biodigestores de tipo domo flotante: En este tipo, el gas se recoge en una cubierta flotante que sube y baja según la cantidad de biogás producido. Es más fácil de mantener y permite una mejor visualización del volumen de gas generado. (Leite & Povinelli, 1999)

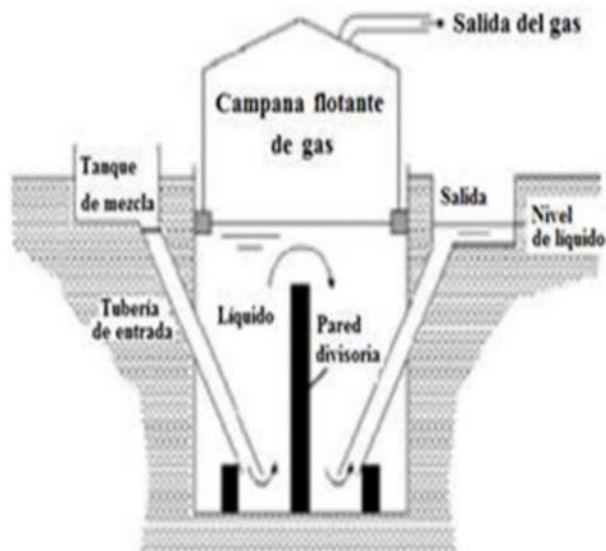


Figura 6. Biodigestor de domo flotante (Nicho Alvarado et al., 2021)

iii. Biodigestores tubulares: Son estructuras flexibles en forma de tubo, normalmente hechos de plástico, que se llenan con el sustrato y se colocan en el suelo. Son muy usados en granjas por su facilidad de instalación y bajo costo. (Orrico Júnior et al., 2009)

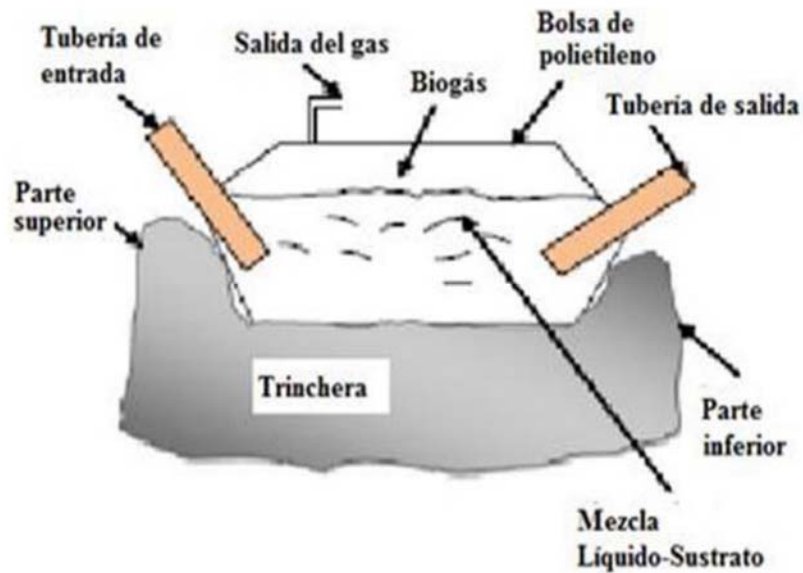


Figura 7. Biodigestor tubular (Nicho Alvarado et al., 2021)

iv. Biodigestores de tanque horizontal y vertical: Diseñados para instalaciones industriales o municipales, permiten mayor control y automatización. Pueden ser de flujo continuo o discontinuo. (Orrico Júnior et al., 2009)



Figura 8. Esquema de biodigestor de tanque vertical. (Coelho, 2012)

c.2) Biodigestores por modo de operación

- i. Biodigestores de batelada (batch): Se cargan con todo el sustrato de una vez y se mantienen cerrados hasta finalizar el proceso. Son simples y adecuados para sustratos con alta carga orgánica o para usos esporádicos. (Orrico et al., 2016)
- ii. Biodigestores semicontínuos: Se carga el sustrato periódicamente y se extrae el digestato de forma continua. Permiten un mejor control del proceso y son útiles en granjas o plantas pequeñas. (Orrico Júnior et al., 2009)
- iii. Biodigestores continuos: El sustrato entra y el digestato sale constantemente. Son los más eficientes para grandes volúmenes y requieren un control más estricto de las condiciones operativas. (Orrico Júnior et al., 2009)

c.3) Biodigestores por tipo de sustrato

- i. Biodigestores para residuos líquidos: Diseñados para tratar aguas residuales, lodos de depuradora o residuos de procesos industriales. (Leite & Povinelli, 1999)
- ii. Biodigestores para residuos sólidos: Adaptados para manejar residuos agrícolas, ganaderos o residuos orgánicos urbanos, como restos de comida o jardinería. (Orrico Júnior et al., 2009)

c.4) Otras clasificaciones

- i. Biodigestores de mezcla completa: El contenido del reactor se agita para homogenizar la mezcla y mejorar la eficiencia del proceso. (Orrico Júnior et al., 2009)
- ii. Biodigestores de lecho fijo y lecho móvil: Utilizan medios inertes para fijar microorganismos y aumentar la superficie de contacto, mejorando la degradación de la materia orgánica. (Orrico Júnior et al., 2009)

d) Componentes básicos de un biodigestor

Los componentes básicos de un biodigestor incluyen elementos estructurales y funcionales que permiten la digestión anaeróbica eficiente y la producción de biogás. A continuación, se describen los principales componentes:

d.1) Tanque o reactor

Es la cámara principal donde se realiza la digestión anaeróbica. Puede ser subterráneo o superficial, y su material puede ser concreto, plástico, fibra de vidrio o metal. El tamaño y forma varían según el tipo de biodigestor y la cantidad de sustrato a tratar. (Xavier & Lucas Júnior, 2010)

d.2) Sistema de carga

Permite introducir el sustrato (residuos orgánicos mezclados con agua) en el reactor. Puede ser manual o automático, y debe facilitar la mezcla adecuada para evitar la formación de capas o zonas muertas. (Santos et al., 2017)

d.3) Sistema de descarga

Permite retirar el digestato (residuo tratado) del reactor. Suele ser una válvula o tubo de salida ubicado en la parte inferior del tanque. (Xavier & Lucas Júnior, 2010)

d.4) Sistema de drenaje y ventilación

Permite la salida de líquidos excedentes y la ventilación para evitar la acumulación de gases peligrosos o presión excesiva. (Santos et al., 2017)

2.2.3.- Humanure

El término “humanure” que proviene del inglés “human” + “manure” cuya traducción literal sería “estiércol humano”. Jenkins en *The Humanure Handbook (4th edition) Shit in a Nutshell* 2019, lo utiliza para referirse a la materia fecal humana (Jenkins, 2019)

Tabla 2. Inventario y descripción de los sustratos de los poblados, de The CO2 cutting cost of biogas from humanure and livestock manure (Agar et al., 2022)

Sustrato	Descripción	Disponibilidad anual	Suministro (kg/a)	Vs. Fracción (tal como se recibió)	Rango específico de producción de metano ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{ODM}$)	Fracción de nitrógeno (masa seca)	Relación C/N
Humanure	Recogida en sanitarios secos domésticos. Cada habitante produce 0,20 kg al día.	Continua	16 352	0.250	0.178–0.327	0.06	8
Orina	Se recoge en baños secos domésticos a razón de 0,5 L (0,5 kg) por persona por día.	Continua	40 880	0.0171	0.178–0.327	0.17	0.8
Excremento de Cerdo	Recogido de la porqueriza, 5,88 kg por día por cerdo, se puede recoger el	Continua	85 848	0.149	0.178–0.289	0.037	13

Sustrato	Descripción	Disponibilidad anual	Suministro (kg/a)	Vs. Fracción (tal como se recibió)	Rango específico de producción de metano ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{ODM}$)	Fracción de nitrógeno (masa seca)	Relación C/N
	80% del estiércol.						
Excremento de vaca	Se recoge del establo, 29 kg por día por vaca, solo el 50% del estiércol se puede recoger debido al pastoreo.	Continua	52 925	0.124	0.178–0.289	0.029	25
Excremento de gallina	Recogidos del gallinero y de los recintos, 0,13 kg al día por gallina, se puede recoger el 80% del estiércol.	Continua	9 490	0.154	0.178–0.289	0.063	10
Residuos biológicos de cocina	Se estima que el desperdicio	Continua	6 541	0.10	0.253–0.394	0.02	5

Sustrato	Descripción	Disponibilidad anual	Suministro (kg/a)	Vs. Fracción (tal como se recibió)	Rango específico de producción de metano ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{ODM}$)	Fracción de nitrógeno (masa seca)	Relación C/N
	de alimentos en los hogares es de 0,10 kg por persona y día.						
Lodos de bodega	Rastrojo de uva (tallos, pieles, semillas) procedente de la elaboración del vino. Se estima que representa el 11 % de la cosecha media de uva (12 000 kg/ha) y está compuesto por piel (6 %) y sedimentos de	Sept–Oct	26 400	0.136	0.253–0.360	0.01 ^a	13 ^a

Sustrato	Descripción	Disponibilidad anual	Suministro (kg/a)	Vs. Fracción (tal como se recibió)	Rango específico de producción de metano ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{ODM}$)	Fracción de nitrógeno (masa seca)	Relación C/N
	fermentación (5 %).						
Esquejes de vid	Recortes estacionales de hojas y madera del viñedo, estimados en 0,5 kg por cepa (1 200 cepas/ha).	May–Jun	12 000	0.05	0.054–0.253	0.01	41
Recortes de césped	Recortes de jardines y zonas comunes (1,75 ha en total de jardines de 250 m ²), suponiendo 1 500 kg por hectárea de peso verde.	May–Oct	2 625	0.101	0.253–0.394	0.024	19
Hojas caídas	Hojas secas caídas de jardines y	Oct–Nov	2 100	0.05	0.253–0.394	0.009	54

Sustrato	Descripción	Disponibilidad anual	Suministro (kg/a)	Vs. Fracción (tal como se recibió)	Rango específico de producción de metano ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{ODM}$)	Fracción de nitrógeno (masa seca)	Relación C/N
	setos, estimadas en 30 kg por hogar.						
Residuos de jardín	De huertos domésticos, estimados en 100 kg de peso verde por hogar.	May–Oct	7 000	0.05	0.253–0.394	0.005	27
Paja de cereal	Representa la paja mezclada y recogida con estiércol, así como la utilizada para mezclar con otros sustratos antes de la digestión anaeróbica. Se supone que es un excedente	Continua	4 921	0.06	0.054	0.005	128

Sustrato	Descripción	Disponibilidad anual	Suministro (kg/a)	Vs. Fracción (tal como se recibió)	Rango específico de producción de metano ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{ODM}$)	Fracción de nitrógeno (masa seca)	Relación C/N
	local procedente de cultivos de cereales.						

2.2.4.- Tratamiento de Residuos

Los residuos de biodigestor, también conocidos como digestato, son los materiales que quedan tras el proceso de digestión anaeróbica de residuos orgánicos en un biodigestor. Este proceso transforma desechos como restos de alimentos, estiércol, residuos agrícolas y otros materiales orgánicos en biogás (usado como combustible) y un subproducto sólido o líquido rico en nutrientes. (Castillo, 2025)

a) Características del digestato

El digestato puede ser semi-líquido o sólido, dependiendo del tipo de biodigestor y de los residuos procesados. (Castillo, 2025)

Contiene nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, lo que lo convierte en un excelente fertilizante natural para la agricultura.

El efluente líquido también puede utilizarse como acondicionador de suelos y enriquecerse con nutrientes adicionales. (RedBioLAC, s. f.)

Las opciones de disposición para el digestato (producto resultante de la digestión anaerobia de residuos orgánicos) incluyen principalmente su uso agrícola, la valorización energética y la disposición final en vertederos, aunque esta última es menos recomendable por razones ambientales. (Aragón, 1997)

b) Usos agrícolas

El digestato puede aplicarse como fertilizante en suelos agrícolas, ya que contiene nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, mejorando la fertilidad del suelo y reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos. (Aragón, 1997)

c) Valorización energética

El digestato puede ser utilizado para como combustible en procesos de secado y combustión, contribuyendo a la producción de energía renovable. (Aragón, 1997)

d) Disposición final

En algunos casos, el digestato puede ser enviado a vertederos, pero esta práctica se desaconseja por su potencial contaminante y el desperdicio de recursos útiles. (Aragón, 1997)

2.3.- Marco Normativo

2.3.1.-Normatividad internacional

a) Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6)

En 2015, la Organización de las Naciones Unidas adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, estableciendo 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El ODS 6 se enfoca específicamente en “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” (ONU, 2015).

El ODS 6 contempla metas directamente relacionadas con el saneamiento rural, entre ellas:

Meta 6.2: Lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos, poniendo fin a la defecación al aire libre y prestando especial atención a las necesidades de mujeres, niñas y personas en situaciones vulnerables.

Meta 6.3: Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, minimizando la descarga de aguas residuales sin tratar y aumentando el reciclaje y reutilización segura.

La implementación de sistemas descentralizados como biodigestores domésticos se alinea con estas metas al contribuir a la reducción de descargas sin tratamiento y a la gestión segura de excretas humanas (ONU, 2015).

Además, el enfoque del ODS 6 promueve soluciones sostenibles, resilientes y adaptadas a contextos locales, lo cual respalda el uso de tecnologías apropiadas en comunidades rurales con limitada infraestructura centralizada.

b) Lineamientos de la OMS y recomendaciones de UNICEF

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido directrices internacionales en materia de saneamiento y salud, destacando la relación directa entre manejo adecuado de excretas y reducción de enfermedades transmitidas por agua contaminada (OMS, 2022).

En sus *Guidelines on Sanitation and Health*, la OMS establece que los sistemas de saneamiento deben:

- Prevenir la exposición humana a excretas a lo largo de toda la cadena de servicio (contenimiento, vaciado, transporte, tratamiento y disposición final).
- Reducir riesgos microbiológicos y químicos.
- Ser técnicamente seguros y ambientalmente sostenibles.

Estas directrices respaldan el uso de biodigestores y sistemas de tratamiento anaerobio cuando están correctamente diseñados y operados, asegurando la reducción de patógenos y la protección de fuentes de agua subterránea (OMS, 2022).

Por su parte, la Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) promueve estrategias de saneamiento rural basadas en el enfoque WASH (Water, Sanitation and Hygiene), el cual integra infraestructura física con educación sanitaria y participación comunitaria (UNICEF, 2021).

UNICEF destaca que los sistemas de saneamiento deben ser:

- Culturalmente aceptables.
- Económicamente accesibles.
- Técnicamente apropiados al contexto local.
- Sostenibles a largo plazo.

Este enfoque coincide con la propuesta del presente trabajo, que integra aspectos técnicos (diseño de biodigestores), ambientales (reducción de contaminación), sociales (aceptación comunitaria) y económicos (uso de materiales locales).

2.3.2.- Marco legal nacional

a) Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos reconoce en su artículo 4º el derecho humano al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. Asimismo, establece que el Estado garantizará este derecho y definirá las bases para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos (CPEUM, 2023).

Este reconocimiento constitucional vincula el saneamiento con la salud, la dignidad humana y el desarrollo sostenible, obligando a los tres órdenes de gobierno a promover infraestructura adecuada, especialmente en comunidades rurales con rezago social.

En consecuencia, la implementación de sistemas descentralizados como letrinas con arrastre hidráulico y biodigestores contribuye al cumplimiento del mandato constitucional, particularmente en zonas donde el alcantarillado convencional no es viable técnica o económicamente.

b) Ley de Aguas Nacionales

La Ley de Aguas Nacionales regula la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales, así como la prevención y control de su contaminación. Esta ley establece la responsabilidad de proteger la calidad del agua mediante la regulación de descargas y la

promoción de tratamientos adecuados antes de su vertimiento en cuerpos receptores (LAN, 2022).

Entre sus disposiciones relevantes destacan:

- La obligación de prevenir la contaminación de acuíferos y cuerpos superficiales.
- La regulación de descargas de aguas residuales.
- La promoción del uso eficiente y sustentable del recurso hídrico.

Los sistemas de biodigestión aplicados al saneamiento rural contribuyen a la reducción de cargas contaminantes y minimizan descargas directas sin tratamiento, alineándose con los objetivos de la ley.

c) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) establece los principios de política ambiental en México, incluyendo la prevención y control de la contaminación del suelo, agua y aire (LGEEPA, 2023).

Esta ley promueve el desarrollo sustentable y la aplicación de tecnologías que reduzcan impactos ambientales negativos. En materia de saneamiento, la LGEEPA sustenta la necesidad de implementar sistemas que eviten la infiltración de excretas sin tratamiento al subsuelo, práctica común en zonas sin infraestructura formal.

Asimismo, fomenta el uso de tecnologías apropiadas que permitan el aprovechamiento de residuos bajo criterios de sustentabilidad, lo cual respalda el uso de biodigestores para tratamiento anaerobio y valorización de subproductos.

d) Ley General de Salud

La Ley General de Salud establece disposiciones en materia de salubridad general, incluyendo la prevención de enfermedades asociadas a condiciones sanitarias inadecuadas (LGS, 2023).

Entre sus objetivos se encuentran:

- La protección contra riesgos sanitarios derivados del manejo inadecuado de excretas.
- La promoción de condiciones higiénicas en viviendas y comunidades.
- La prevención de enfermedades transmitidas por agua contaminada.

La falta de infraestructura de saneamiento incrementa la incidencia de enfermedades gastrointestinales, parasitarias y otras infecciones de origen hídrico. Por ello, la implementación de sistemas sanitarios seguros en comunidades rurales constituye una medida preventiva respaldada por la legislación sanitaria nacional.

e) Normas Oficiales Mexicanas aplicables

e.1) NOM-001-SEMARNAT-2021

Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Esta norma regula la calidad de las descargas de aguas residuales en ríos, lagos, lagunas, esteros, zonas costeras y otros cuerpos receptores nacionales. Establece parámetros como:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)
- Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- Grasas y aceites
- Nitrógeno total

- Fósforo total
- Coliformes fecales

La NOM-001-SEMARNAT-2021 actualiza criterios técnicos incorporando un enfoque más estricto en el control de nutrientes y materia orgánica, con el objetivo de reducir procesos de eutrofización y proteger ecosistemas acuáticos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021).

En el contexto del presente estudio, aunque los sistemas propuestos son descentralizados y de pequeña escala, el diseño del biodigestor y del sistema de disposición final debe considerar que cualquier infiltración o descarga indirecta no comprometa la calidad de cuerpos receptores cercanos, alineándose con los límites establecidos.

e.2) NOM-002-SEMARNAT-1996

Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Esta norma regula las descargas hacia redes de alcantarillado, estableciendo parámetros similares a la NOM-001 pero orientados a proteger infraestructura y sistemas de tratamiento municipales (SEMARNAT, 1996).

Aunque en comunidades rurales sin red de drenaje la aplicación directa puede no ser obligatoria, sus criterios técnicos sirven como referencia para el control de cargas orgánicas y sólidos que eventualmente puedan integrarse a sistemas mayores si se desarrollara infraestructura futura.

e.3) NOM-003-SEMARNAT-1997

Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reutilizan en servicios al público.

La NOM-003-SEMARNAT-1997 regula la calidad de aguas residuales tratadas cuando se destinan a usos como riego de áreas verdes, servicios urbanos o actividades recreativas (SEMARNAT, 1997).

En sistemas con biodigestores rurales, el efluente tratado podría destinarse a infiltración controlada o, bajo condiciones específicas y tratamiento complementario, a riego agrícola no alimentario. Por ello, esta norma proporciona parámetros de referencia, especialmente en cuanto a coliformes fecales y sólidos suspendidos.

El cumplimiento de estos límites contribuye a reducir riesgos epidemiológicos y proteger la salud pública.

e.4) NOM-127-SSA1-2021

Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.

Emitida por la Secretaría de Salud, esta norma establece los límites máximos permisibles de características físicas, químicas y microbiológicas del agua destinada al consumo humano (Secretaría de Salud, 2021).

Incluye parámetros como:

- Coliformes totales y *Escherichia coli*
- Arsénico
- Fluoruros
- Nitratos
- Turbidez
- Metales pesados

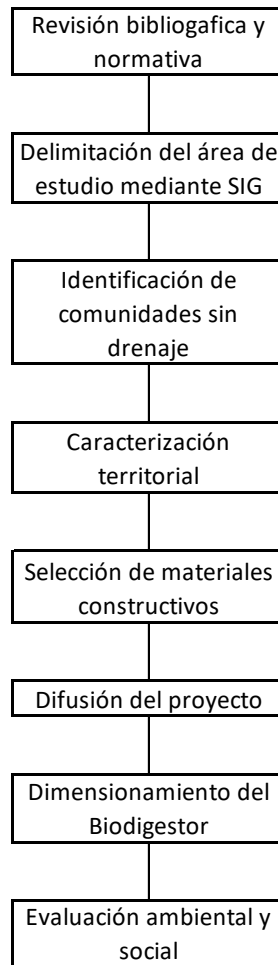
Aunque la NOM-127 se enfoca en agua potable, su relevancia en el saneamiento radica en la necesidad de evitar que sistemas sanitarios mal diseñados contaminen fuentes de

abastecimiento. La correcta impermeabilización y ubicación del biodigestor respecto a pozos o fuentes de agua es indispensable para prevenir infiltración de patógenos o nitratos.

Capítulo 3- Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo y proyectivo. Es cuantitativa debido a que emplea datos geográficos, demográficos y técnicos para el dimensionamiento de un sistema de saneamiento descentralizado. Asimismo, es descriptiva porque caracteriza las condiciones de acceso al drenaje sanitario en comunidades rurales y periurbanas del municipio de Altamira, Tamaulipas. Finalmente, es proyectiva, ya que propone el diseño de una solución tecnológica específica consistente en una letrina con arrastre hidráulico integrada a un biodigestor anaerobio.

El diseño de investigación es no experimental y transversal, debido a que no se manipularon variables ni se realizaron intervenciones directas en las comunidades estudiadas. La información utilizada corresponde a datos oficiales, literatura especializada y registros institucionales disponibles durante el periodo de desarrollo de la investigación.



3.1.- Revisión bibliográfica y normativa

Recopilación de información mediante investigación documental y consulta de fuentes oficiales.

Las principales fuentes utilizadas fueron:

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Altamira (COMAPA Altamira).
- Sistema Meteorológico Nacional (SMN).

- Literatura científica especializada en saneamiento rural y biodigestión anaerobia.

La información obtenida incluye:

- Límites territoriales y cartografía oficial.
- Distribución de localidades rurales.
- Cobertura de servicios de drenaje.
- Condiciones climáticas regionales.
- Parámetros de diseño para biodigestores anaerobios.

3.2.- Delimitación del área de estudio

Análisis espacial utilizando herramientas SIG con el objetivo de identificar las comunidades sin acceso al servicio de drenaje sanitario.

El procedimiento consiste en las siguientes etapas:

- Delimitación territorial
- Generar los polígonos correspondientes a:
 - Estado de Tamaulipas.
 - Zona Sur de Tamaulipas.
 - Municipio de Altamira.

Para ello se emplean capas vectoriales oficiales obtenidas del INEGI.

3.3.- Identificación de localidades

Se incorpora al proyecto cartográfico la ubicación geográfica de localidades rurales y periurbanas mediante información georreferenciada proveniente del Censo de Población y Vivienda 2020.

3.4.- Identificación de comunidades sin drenaje

A través de información proporcionada por COMAPA Altamira se identificaron las localidades que carecen total o parcialmente de servicio de drenaje sanitario.

Posteriormente se georreferencian estas comunidades y se genera un mapa temático que permita visualizar espacialmente la problemática de saneamiento en el municipio

3.5.- Selección de materiales constructivos

Revisión documental sobre los materiales de construcción disponibles en la región sur de Tamaulipas.

Los criterios de selección son:

- Disponibilidad local.
- Bajo costo.
- Facilidad de transporte.
- Resistencia estructural.
- Compatibilidad con las condiciones climáticas regionales.
- Integración estética con las viviendas existentes.

3.6.- Difusión del proyecto para aumentar la aceptación social

La aceptación comunitaria constituye un factor fundamental para el éxito de cualquier proyecto de saneamiento rural. Diversos estudios han demostrado que la implementación de infraestructura sanitaria no depende únicamente de su viabilidad técnica, sino también de la percepción, comprensión y apropiación que la población tenga sobre la tecnología propuesta.

La estrategia de difusión consiste en la elaboración de un tríptico informativo diseñado con lenguaje sencillo y recursos gráficos accesibles para facilitar la comprensión de personas con distintos niveles educativos.

3.7.- Dimensionamiento del biodigestor

El dimensionamiento se realiza siguiendo criterios de ingeniería sanitaria y digestión anaerobia reportados en la literatura especializada.

Carga diaria: Se determina el volumen o masa de desechos orgánicos que ingresan al biodigestor de manera diaria, tomando en cuenta la cantidad esperada de usuarios y la generación promedio por persona. Esta carga es esencial para dimensionar adecuadamente el sistema y asegurar una digestión eficiente.

$$CD = (PT * RCD) + PT$$

Donde:

CD = Carga diaria

PT = Producción total

RCD = Relación de carga diaria (relación solido-liquido)

PT = Producción diaria por persona * Cantidad de personas

Tiempo de retención: Se establecerá el período durante el cual los residuos permanecen dentro del biodigestor, permitiendo su adecuada descomposición anaerobia. Este valor se calculará con base en parámetros recomendados para el tipo de materia orgánica y condiciones ambientales del sur de Tamaulipas.

Tabla 3: Relación entre temperatura y tiempo de retención recomendado para lograr producciones de biogás aceptables

Temperatura (°C)	Tiempo de Retención (TR)
35	25 - 30 días
30	30 - 40 días
25	35 - 50 días
20	50 - 65 días
15	65 - 90 días
10	90 - 125 días

Martí-Herrero, J. (2019). Biodigestores Tubulares: guía de diseño y manual de instalación.

Volumen líquido del biodigestor: Se calcula el volumen efectivo destinado al sustrato líquido dentro del biodigestor, considerando la carga diaria y el tiempo de retención definidos previamente. Este volumen corresponde al espacio donde ocurre la digestión biológica.

$$VL = CD_T * Trh$$

Donde:

Trh = Tiempo de retención hidráulica

CDT= Carga Diaria Total

Fase gaseosa al 25%: Se asignará un 25% del volumen total del biodigestor a la fase gaseosa, espacio necesario para el almacenamiento seguro del biogás generado durante la digestión anaerobia y para permitir la expansión del líquido bajo condiciones variables de presión y temperatura.

Volumen total: El volumen total del biodigestor se obtendrá sumando el volumen líquido requerido y el volumen correspondiente a la fase gaseosa, garantizando así la capacidad adecuada para el funcionamiento óptimo del sistema.

$$VT = VG + VL$$

Radio del biodigestor: Se definirá el radio del biodigestor tomando en cuenta criterios prácticos para su construcción, funcionamiento y mantenimiento, asegurando proporciones adecuadas para su estabilidad y eficiencia.

Largo del biodigestor: Su valor se determinará en función del volumen total requerido y el radio seleccionado para el biodigestor, utilizando fórmulas geométricas apropiadas para la forma cilíndrica o semiesférica del diseño.

3.8.- Evaluación de la viabilidad

La propuesta es evaluada considerando:

- a) Viabilidad ambiental
 - o Reducción de contaminación del suelo.
 - o Protección de cuerpos de agua.
 - o Disminución de riesgos sanitarios.
- b) Viabilidad social
 - o Compatibilidad con las prácticas sanitarias de la población.
 - o Integración arquitectónica con las viviendas.
 - o Potencial de aceptación comunitaria.

Capítulo 4- Resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, derivados del análisis territorial, ambiental, técnico y social realizado para la propuesta de saneamiento rural mediante letrinas con arrastre hidráulico integradas a biodigestores anaerobios en comunidades rurales y periurbanas del municipio de Altamira, Tamaulipas.

Los resultados se estructuran conforme a los objetivos específicos planteados en la investigación, permitiendo demostrar el cumplimiento de cada uno de ellos a través de evidencia documental, cartográfica y técnica.

4.1.- Caracterización territorial y delimitación del área de estudio

Este apartado da cumplimiento al objetivo específico 1, correspondiente a la delimitación geográfica del área de estudio y la caracterización territorial de las comunidades rurales del municipio de Altamira

El estado de Tamaulipas se localiza en la región noreste de México, limitando al norte con el estado de Texas (Estados Unidos), al este con el Golfo de México, al sur con Veracruz y San Luis Potosí, y al oeste con Nuevo León. Su capital es Ciudad Victoria, y se encuentra conformado por 43 municipios.



Tamaulipas posee una diversidad geográfica y económica significativa, caracterizada por extensas llanuras costeras, zonas montañosas y ecosistemas semiáridos en el norte y centro del estado. Esta heterogeneidad ha permitido el desarrollo de múltiples actividades productivas, entre las que destacan la industria manufacturera y maquiladora, la agricultura y ganadería, así como la industria petroquímica y portuaria en la región sur.

El estado ocupa una posición estratégica dentro del contexto nacional, debido a su acceso al Golfo de México y su conectividad con la frontera estadounidense, lo que lo convierte en un eje clave del comercio internacional. Sin embargo, esta ventaja territorial convive con desigualdades estructurales entre las zonas urbanas-industriales consolidadas y las comunidades rurales con mayores rezagos sociales y de infraestructura.

La Zona Sur de Tamaulipas está conformada principalmente por los municipios de Altamira, Ciudad Madero y Tampico, los cuales integran una región conurbada de relevancia económica y estratégica a nivel estatal y nacional. Esta zona constituye el principal polo

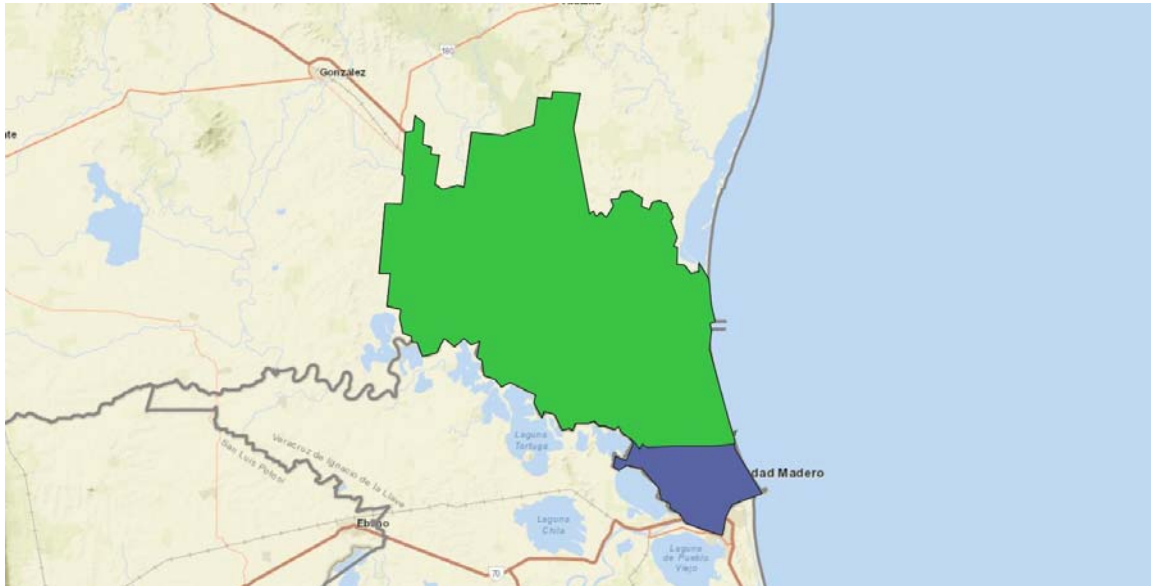
industrial, energético y portuario del estado, además de concentrar una porción importante de su población y actividad comercial.



La región se caracteriza por una economía diversificada, basada en los sectores petroquímico, energético, portuario, comercial y turístico. En ella se localiza el Puerto Industrial de Altamira, considerado uno de los más importantes del país por su capacidad operativa y su infraestructura logística. Asimismo, la presencia de complejos industriales y energéticos ha impulsado el desarrollo urbano, aunque de manera desigual, generando contrastes entre áreas de alta modernización y comunidades con rezago en servicios básicos.

En términos ambientales, la zona sur de Tamaulipas alberga ecosistemas costeros y humedales de gran valor ecológico, como la Laguna de Champayán, los esteros y cuerpos lagunares, que han sido afectados progresivamente por la expansión urbana e industrial. Estos elementos geográficos condicionan el desarrollo territorial y representan tanto una riqueza natural como un reto de sustentabilidad.

especialmente en áreas periurbanas, donde persisten carencias en infraestructura, agua potable, drenaje, electrificación y transporte.



Altamira cuenta con más de un centenar de localidades rurales, además de un cinturón periurbano en constante crecimiento. Entre las comunidades más representativas se encuentran Esteros, Cuauhtémoc, Maclovio Herrera, La Pedrera, Río Tamiahua, Monte Alto y Ejido Ricardo Flores Magón, entre otras.

Estas comunidades presentan una estructura socioeconómica diversa, que refleja tanto la influencia del desarrollo industrial cercano como la persistencia de dinámicas rurales tradicionales.

b) Temperatura

La temperatura media anual en el municipio oscila entre 24 °C y 26 °C, con máximas que pueden superar los 40 °C durante los meses de verano y mínimas cercanas a 10 °C durante la temporada invernal (SMN, 2023).

Estas temperaturas son adecuadas para la operación de biodigestores anaerobios domésticos, debido a que favorecen el desarrollo de bacterias mesofílicas responsables de la estabilización de la materia orgánica. En consecuencia, no se requiere la incorporación de sistemas de calentamiento artificial para mantener la actividad biológica del biodigestor.

c) Precipitación

La precipitación media anual varía entre 900 y 1,200 mm, concentrándose principalmente entre los meses de junio y octubre, periodo asociado a la temporada de lluvias y a la influencia de fenómenos meteorológicos provenientes del Golfo de México (CONAGUA, 2022).

La ocurrencia de lluvias intensas puede generar inundaciones temporales en zonas bajas del municipio, particularmente en áreas cercanas a lagunas, esteros y cauces naturales. Esta condición constituye un criterio importante para la ubicación y diseño de sistemas sanitarios, ya que se deben evitar zonas susceptibles a inundación que puedan comprometer el funcionamiento del biodigestor o provocar contaminación ambiental.

d) Hidrología

El municipio de Altamira forma parte de la Región Hidrológica RH26 Pánuco y se encuentra influenciado por una compleja red de cuerpos de agua superficiales.

Entre los principales cuerpos hidrológicos destacan:

- Laguna de Champayán.
- Laguna del Chairel.

- Laguna de Miralta.
- Río Tamesí.
- Río Pánuco.
- Diversos canales, esteros y humedales costeros.



La abundancia de recursos hídricos representa una ventaja para el desarrollo regional, pero también incrementa la vulnerabilidad ambiental frente a descargas inadecuadas de aguas residuales domésticas. La infiltración directa de excretas o el uso de letrinas rudimentarias puede provocar contaminación microbiológica de cuerpos de agua superficiales y acuíferos, afectando la salud pública y los ecosistemas acuáticos (SEMARNAT, 2020).

Por ello, la implementación de sistemas de saneamiento con biodigestores constituye una alternativa para reducir riesgos de contaminación y proteger los recursos hídricos de la región.

e) Demografía

Según el Censo de Población y Vivienda 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, el municipio de Altamira registró una población de aproximadamente 258,602 habitantes (INEGI, 2020).

La distribución poblacional es heterogénea. Mientras que una parte importante de la población se concentra en la cabecera municipal y zonas urbanas cercanas al corredor industrial, existen numerosas localidades rurales dispersas con menor densidad poblacional y acceso limitado a infraestructura básica.

Estas comunidades rurales presentan mayores rezagos en servicios de drenaje sanitario, lo que incrementa su vulnerabilidad frente a enfermedades relacionadas con el manejo inadecuado de excretas.

Asimismo, el crecimiento demográfico observado durante las últimas décadas ha generado una expansión territorial que en algunos casos ha superado la capacidad de ampliación de los servicios públicos, incluyendo agua potable y alcantarillado.

f) Economía

La economía del municipio de Altamira se caracteriza por una importante diversificación productiva.

Las principales actividades económicas incluyen:

f.1) Sector industrial

El Puerto Industrial de Altamira constituye uno de los motores económicos más importantes de Tamaulipas y del país. En esta zona se desarrollan actividades relacionadas con:

- Industria petroquímica.
- Producción de energía.
- Manufactura.
- Logística y transporte marítimo.
- Sector agropecuario

En las localidades rurales continúan desarrollándose actividades agrícolas y ganaderas, destacando:

- Cultivo de maíz.
- Sorgo.
- Cítricos.
- Ganadería bovina.

Estas actividades representan una fuente importante de ingresos para las comunidades rurales objeto de estudio.

f.2) Comercio y servicios

Las actividades comerciales y de servicios se concentran principalmente en las áreas urbanas y periurbanas, generando empleo para una parte significativa de la población.

No obstante, en las comunidades rurales persisten condiciones de marginación y limitaciones económicas que dificultan el acceso a infraestructura sanitaria convencional. Esta situación refuerza la necesidad de desarrollar alternativas de saneamiento de bajo costo, fácil mantenimiento y adecuada adaptación al contexto local.

Infraestructura: el acceso a servicios básicos es limitado; la cobertura de agua potable, drenaje, pavimentación y electrificación es desigual entre comunidades.

Educación y salud: la oferta educativa se limita en muchos casos a escuelas rurales multigrado, mientras que los servicios de salud son de primer nivel y dependen de centros urbanos para atención especializada.

Medio ambiente: las actividades humanas, la deforestación y la expansión industrial generan presiones sobre los recursos naturales y los cuerpos de agua, afectando la calidad ambiental.

Estas condiciones reflejan una brecha estructural entre las zonas urbanas e industriales consolidadas y las comunidades rurales y periurbanas, que enfrentan rezagos en desarrollo social, infraestructura y acceso a servicios.

4.1.2.- Problemáticas y retos del territorio

El territorio altamirense enfrenta diversos retos sociales, económicos y ambientales que limitan su desarrollo equilibrado. Entre los principales se identifican los siguientes:

Desigualdad territorial: coexistencia de polos industriales de alta inversión junto a comunidades marginadas con baja cobertura de servicios.

Infraestructura insuficiente: déficit en redes de agua potable, drenaje, pavimentación y transporte público en comunidades rurales y periurbanas.

Presión ambiental: contaminación de cuerpos de agua y deterioro de ecosistemas costeros por la expansión urbana e industrial.

Vulnerabilidad social: empleo precario, informalidad laboral y migración interna.

Planeación urbana limitada: crecimiento desordenado y asentamientos irregulares sin planificación adecuada.

Los resultados obtenidos permitieron delimitar espacialmente el área de estudio e identificar las condiciones territoriales, ambientales y socioeconómicas relevantes para el desarrollo de la propuesta de saneamiento rural.

4.2.- Identificación de comunidades sin acceso a drenaje

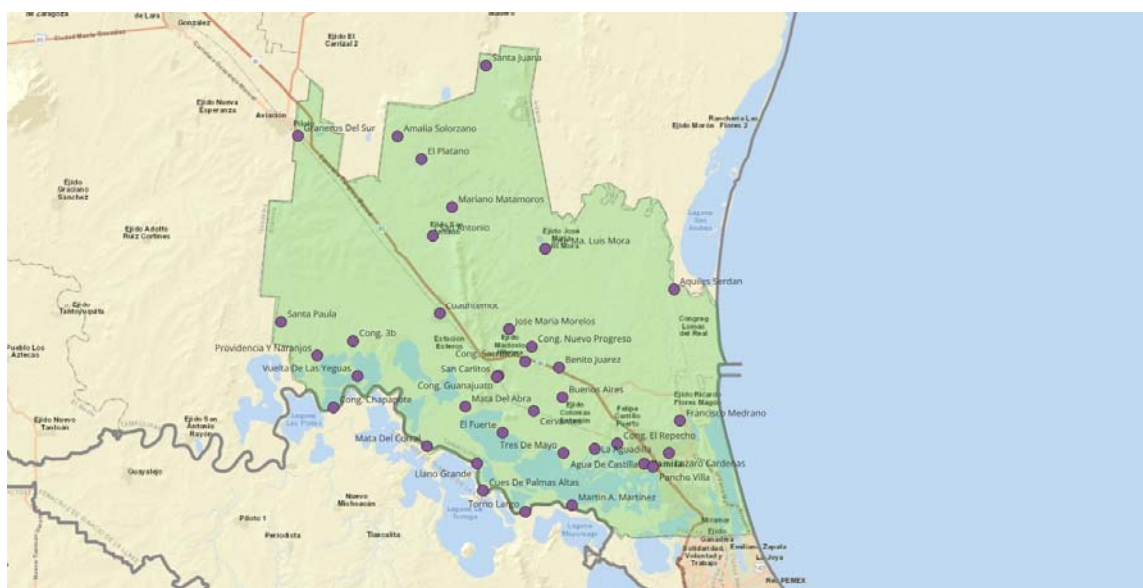
Este apartado atiende el objetivo específico 2, enfocado en identificar y representar espacialmente las comunidades con carencia de drenaje sanitario.

Con el apoyo del Dr. Gabriel Arcos, director de Comapa Altamira, se logró recopilar información referente a las comunidades sin servicio de drenaje, identificando un total de 36 comunidades que comprenden aproximadamente 2,288 familias.

Tabla 4: Comunidades del municipio de Altamira sin acceso a drenaje.

Ejido/Congregación	Latitud	Longitud	Viviendas
Agua De Castilla	22.3958333	-97.936944	157
Amalia Solorzano	22.7161111	-98.197222	15
Aquiles Serdán	22.56732	-97.90524	95
Benito Juárez	22.4898904	-98.026833	6
Buenos Aires	22.460718	-98.023126	15
Cervantes	22.447603	-98.053397	87
Cong. 3b	22.5157817	-98.244192	59
Cong. Chapapote	22.450818	-98.264806	65
Cong. El Repecho	22.415725	-97.965301	15
Cong. Guanajuato	22.482	-98.090705	11
Cong. Nuevo Progreso	22.5103796	-98.05557	14
Cong. Sacrificio	22.4958043	-98.062485	44
Cuauhtémoc	22.543031	-98.152446	20
Cues De Palmas Altas	22.3697714	-98.107197	40
El Fuerte	22.426345	-98.086356	230
El Plátano	22.6941944	-98.171976	17
Francisco Medrano	22.438108	-97.899245	25
Graneros Del Sur	22.716658	-98.302306	28
José Ma. Luis Mora	22.606809	-98.041381	258
José María Morelos	22.527494	-98.079547	29
La Aguadilla	22.410519	-97.989025	28
Lázaro Cárdenas	22.4064519	-97.910752	25
Llano Grande	22.396167	-98.113307	29
Mariano Matamoros	22.647367	-98.139685	170
Martin A. Martínez	22.35516	-98.013114	30
Mata Del Abra	22.451807	-98.125684	168
Mata Del Corral	22.412989	-98.166179	17
Pancho Villa	22.3928406	-97.927553	26

Providencia Y Naranjos	22.501852	-98.281993	30
San Antonio	22.6194777	-98.159954	55
San Carlitos	22.4806925	-98.092555	32
Santa Juana	22.785018	-98.103923	137
Santa Paula	22.534545	-98.320145	5
Torno Largo	22.348832	-98.062266	41
Tres De Mayo	22.4064319	-98.022118	180
Vuelta De Las Yeguas	22.481551	-98.239478	85



La elaboración del diagnóstico espacial permitió identificar las zonas con mayor vulnerabilidad sanitaria y ambiental, estableciendo las áreas prioritarias para la implementación de sistemas descentralizados de saneamiento.

4.3.- Selección de materiales constructivos

Este apartado responde al objetivo específico 3, relacionado con la identificación y evaluación de materiales de construcción locales.

Como parte del desarrollo de la propuesta de saneamiento rural, se realizó una revisión orientada a identificar materiales constructivos adecuados para la construcción de la letrina

con arrastre hidráulico y del biodigestor anaerobio en comunidades rurales del municipio de Altamira, Tamaulipas. La selección de materiales tuvo como finalidad garantizar la viabilidad técnica, económica y social del sistema, considerando las condiciones ambientales y las características constructivas predominantes en la región sur del estado.

4.3.1.- Criterios de selección

La selección de materiales se realizó considerando diversos criterios técnicos y sociales que permitieran asegurar la funcionalidad y durabilidad del sistema sanitario propuesto.

a) Disponibilidad local

Se priorizaron materiales de amplia disponibilidad en la región sur de Tamaulipas con el propósito de facilitar la adquisición de insumos y reducir la dependencia de proveedores externos. La disponibilidad local representa un factor importante para disminuir tiempos de construcción y favorecer futuras labores de mantenimiento o reparación.

La región cuenta con acceso relativamente amplio a materiales utilizados en la construcción tradicional y de vivienda social, debido a la actividad urbana e industrial presente en los municipios de Altamira, Tampico y Ciudad Madero.

b) Bajo costo

Otro criterio fundamental fue el costo económico de los materiales. La propuesta está dirigida a comunidades rurales y periurbanas con recursos limitados, por lo que se buscaron materiales accesibles y económicamente viables para la población.

La utilización de materiales de bajo costo permite reducir la inversión inicial requerida para la construcción del sistema y aumenta las posibilidades de implementación en programas comunitarios o proyectos de apoyo institucional.

c) Facilidad de transporte

Debido a que algunas localidades rurales presentan dificultades de acceso o infraestructura vial limitada, se consideró la facilidad de transporte de los materiales hacia las comunidades beneficiadas.

Los materiales seleccionados pueden movilizarse mediante transporte convencional disponible en la región, evitando requerimientos logísticos complejos o maquinaria especializada para su traslado.

d) Resistencia estructural

La resistencia estructural constituye un aspecto esencial para garantizar la seguridad y durabilidad de la infraestructura sanitaria. Los materiales seleccionados deben soportar condiciones de humedad, cargas mecánicas y exposición ambiental prolongada.

Particularmente en el caso del biodigestor, los materiales deben resistir presión hidráulica interna, variaciones térmicas y procesos de degradación asociados al contacto continuo con residuos orgánicos y humedad.

e) Compatibilidad con las condiciones climáticas regionales

El clima de la región sur de Tamaulipas se caracteriza por temperaturas elevadas, humedad considerable y temporadas de lluvias intensas asociadas a fenómenos meteorológicos tropicales. Estas condiciones pueden acelerar el deterioro de ciertos materiales constructivos si no se seleccionan adecuadamente.

Por esta razón, se consideraron materiales con buena resistencia a la humedad, estabilidad térmica y comportamiento favorable frente a condiciones climáticas variables.

f) Integración estética con las viviendas existentes

Además de los criterios técnicos, se consideró la integración visual de la propuesta con las viviendas rurales existentes. La compatibilidad estética puede favorecer la aceptación comunitaria del proyecto y reducir la percepción de que la infraestructura sanitaria constituye un elemento ajeno al entorno habitacional.

La incorporación de materiales tradicionalmente utilizados en viviendas rurales de la región contribuye a fortalecer la apropiación social de la tecnología propuesta.

4.3.2.- Materiales seleccionados

Con base en los criterios establecidos, se seleccionaron diversos materiales constructivos considerados adecuados para la construcción de la letrina y el biodigestor.

a) Block de concreto

El block de concreto fue considerado como uno de los principales materiales estructurales debido a su amplia disponibilidad regional, bajo costo y facilidad de construcción.

Este material presenta buena resistencia mecánica y durabilidad frente a condiciones ambientales húmedas. Además, permite una construcción relativamente rápida y sencilla, utilizando mano de obra local sin necesidad de procesos altamente especializados.

El block de concreto puede emplearse en la construcción de muros de la caseta sanitaria y en estructuras complementarias del sistema.

b) Madera regional

La madera regional fue considerada principalmente para elementos secundarios y acabados arquitectónicos de la caseta sanitaria, tales como puertas, soportes ligeros y detalles estructurales.

Su utilización contribuye a mejorar la apariencia visual del sistema y facilita la adaptación arquitectónica a las características tradicionales de las viviendas rurales.

No obstante, debido a las condiciones de humedad de la región, se considera necesario aplicar tratamientos de protección para evitar deterioro por humedad, hongos o insectos.

c) Concreto reforzado

El concreto reforzado fue seleccionado como material principal para elementos que requieren mayor resistencia estructural y durabilidad, especialmente en la construcción del biodigestor anaerobio.

Este material ofrece adecuada impermeabilidad, resistencia mecánica y larga vida útil, características necesarias para contener residuos orgánicos y soportar condiciones permanentes de humedad.

Además, el concreto reforzado permite construir estructuras enterradas con estabilidad suficiente para resistir cargas del terreno y variaciones hidráulicas internas.

d) Teja de barro

La teja de barro fue considerada como alternativa para cubiertas de la caseta sanitaria debido a sus propiedades térmicas y su integración estética con construcciones rurales tradicionales.

Este material contribuye a reducir la acumulación de calor en el interior de la estructura y presenta buena resistencia frente a condiciones climáticas propias de la región.

Asimismo, su uso favorece la armonización arquitectónica de la propuesta con viviendas rurales existentes.

e) Acabados tradicionales

Los acabados tradicionales utilizados en viviendas rurales de la región también fueron considerados dentro de la propuesta arquitectónica. Entre ellos destacan recubrimientos de cemento-arena, pintura a la cal y elementos decorativos sencillos utilizados comúnmente en construcciones locales.

La incorporación de estos acabados tiene como objetivo mejorar la aceptación visual de la infraestructura sanitaria y favorecer su integración dentro del contexto comunitario.

4.3.3.- Resultados de la selección de materiales

La revisión documental permitió identificar que los materiales seleccionados cumplen de manera adecuada con los criterios técnicos, económicos y sociales establecidos para el desarrollo del proyecto.

La combinación de materiales disponibles localmente, resistentes a las condiciones climáticas regionales y compatibles con las características arquitectónicas rurales favorece la viabilidad constructiva de la propuesta. Asimismo, el uso de insumos accesibles contribuye a disminuir costos de implementación y mantenimiento, incrementando el potencial de aplicación del sistema en comunidades rurales y periurbanas del municipio de Altamira.

La evaluación realizada confirmó la viabilidad del uso de materiales regionales para la construcción de sistemas sanitarios rurales de bajo costo y fácil implementación.

4.4.- Difusión del proyecto

La aceptación comunitaria constituye un factor fundamental para el éxito de cualquier proyecto de saneamiento rural. Diversos estudios han demostrado que la implementación de infraestructura sanitaria no depende únicamente de su viabilidad técnica, sino también de la percepción, comprensión y apropiación que la población tenga sobre la tecnología propuesta.

En este sentido, la difusión del proyecto se planteó como una herramienta estratégica de apoyo para el cumplimiento de los demás objetivos específicos de la investigación, particularmente aquellos relacionados con la viabilidad social, la integración comunitaria y

la sostenibilidad de la propuesta sanitaria. La difusión permite fortalecer la percepción positiva del sistema propuesto y facilitar su aceptación dentro de las comunidades rurales y periurbanas del municipio de Altamira.

A partir de la revisión bibliográfica y normativa desarrollada en la investigación, se identificó que organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y UNICEF, mediante el enfoque WASH (Water, Sanitation and Hygiene), destacan la importancia de la educación sanitaria y la participación comunitaria como componentes indispensables para garantizar la sostenibilidad de soluciones de saneamiento rural.

Asimismo, se reconoce que uno de los principales factores de rechazo hacia tecnologías alternativas de saneamiento es el desconocimiento sobre su funcionamiento, beneficios y mantenimiento. Por ello, la estrategia de difusión busca proporcionar información clara, accesible y visual sobre las ventajas ambientales, sanitarias y sociales de la letrina con arrastre hidráulico integrada a biodigestor anaerobio.

La difusión también funciona como un instrumento de soporte para los objetivos técnicos y constructivos del proyecto, debido a que permite mostrar que el sistema sanitario puede adaptarse a las condiciones locales, integrarse visualmente con las viviendas existentes y construirse utilizando materiales disponibles en la región. Esto contribuye a disminuir la percepción negativa que frecuentemente existe hacia sistemas sanitarios alternativos en zonas rurales.

La estrategia de difusión consiste en la elaboración de un tríptico informativo diseñado con lenguaje sencillo y recursos gráficos accesibles para facilitar la comprensión de personas con distintos niveles educativos.

El material informativo incluye información relacionada con:

- Problemática del saneamiento en comunidades sin drenaje.
- Beneficios sanitarios de la letrina con arrastre hidráulico.
- Funcionamiento básico del biodigestor anaerobio.
- Ventajas ambientales del tratamiento de residuos.
- Uso de materiales locales y adaptación estética a las viviendas.
- Recomendaciones generales de operación y mantenimiento.

El diseño del tríptico prioriza la comunicación visual mediante esquemas, ilustraciones y distribución clara de la información, con el objetivo de facilitar su comprensión y generar mayor interés entre la población objetivo.

TRATAMIENTO EFICIENTE DE DESECHOS

Los biodigestores descomponen los desechos orgánicos, reduciendo significativamente su volumen.

Este método no solo disminuye la cantidad de residuos, sino que también elimina patógenos presentes en las heces, contribuyendo a una mejor salud pública.

FACILIDAD DE MANEJO

Estos sistemas son relativamente sencillos de operar y mantener, lo que los hace más accesibles para los usuarios.



Una vez en funcionamiento, requieren un mantenimiento bajo, lo que facilita su uso a largo plazo.

REDUCCION DEL IMPACTO AMBIENTAL

Al tratar adecuadamente los desechos, se minimiza el riesgo de contaminación del suelo y del agua subterránea, ayudando así a preservar nuestro entorno natural.

Las letrinas con arrastre hidráulico representan una alternativa intermedia entre las letrinas básicas y los inodoros convencionales.

Son una opción relevante en contextos con recursos hídricos limitados.

OBJETIVOS DE DESARROLLO SUSTENTABLE

ODS 3: Salud y Bienestar.

ODS 6: Agua Limpia y Saneamiento.

ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles.

ODS 12: Producción y Consumo Responsables.

ODS 17: Alianzas para Lograr los Objetivos.

¿TE INTERESA PARTICIPAR?



CONTACTO

✉ hilario.mf@cdmadero.tecnm.mx

✉ erika.ar@cdmadero.tecnm.mx

✉ minerva.za@cdmadero.tecnm.mx

✉ lc16070401@cdmadero.tecnm.mx

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CD MADERO

"Por mi patria y por mi bien"

Proyecto: Adaptación del diseño de letrinas con arrastre hidráulico como una opción para el saneamiento básico rural
Clave: 21849.25-P



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



COM4PA

Letrinas con ARRASTRE HIDRAULICO



**TECNOLOGIA ACCESIBLE PARA
COMUNIDADES CON RECURSOS HIDRICOS
LIMITADOS**

¿POR QUE ELEGIR ESTA SOLUCION?



USO EFICIENTE DEL AGUA.
Solo necesitas una pequeña cantidad para evacuar los desechos. Ideal para zonas donde el agua es un recurso valioso.



HIGIENE SUPERIOR.
Adiós a los malos olores y a la exposición directa a patógenos. El agua transporta los desechos fuera del área de uso, reduciendo riesgos sanitarios.



FACIL MANTENIMIENTO.
Diseño simple, componentes accesibles y bajo costo de reparación. ¡Funciona sin complicaciones!

¿QUE ES UN BIODIGESTOR?

Un biodigestor es un sistema que descompone los desechos orgánicos, reduciendo su volumen y eliminando patógenos.

Además, protege el medio ambiente al evitar la contaminación del suelo y del agua subterránea.



¿COMO FUNCIONA?

Un biodigestor es un sistema que descompone los desechos orgánicos, reduciendo su volumen y eliminando patógenos.

Además, protege el medio ambiente al evitar la contaminación del suelo y del agua subterránea.

BENEFICIOS CLAVE

TIPO DE BENEFICIO	¿QUE OFRECE?
AMBIENTALES	Protección de fuentes de agua, manejo adecuado de excretas, menor impacto ecológico
SANITARIOS	Mejor higiene, control de olores, reducción de enfermedades transmisibles
SOCIALES Y ECONOMICOS	Mayor comodidad, mejora en la calidad de vida, bajo costo de mantenimiento

Además, la difusión del proyecto representa un mecanismo de sensibilización ambiental y sanitaria, ya que permite informar a la población sobre los riesgos asociados al manejo inadecuado de excretas y aguas residuales domésticas, incluyendo contaminación del suelo, afectación de cuerpos de agua y propagación de enfermedades gastrointestinales.

En términos sociales, la estrategia de difusión favorece la construcción de confianza hacia la propuesta tecnológica, promoviendo la participación comunitaria y el sentido de apropiación del sistema sanitario. Esto resulta particularmente importante en comunidades rurales, donde la aceptación cultural y la percepción estética influyen directamente en el uso continuo de las instalaciones sanitarias.

Por lo tanto, la difusión del proyecto no constituye únicamente una actividad complementaria, sino un instrumento transversal de soporte que fortalece los objetivos técnicos, ambientales y sociales de la investigación, incrementando el potencial de aceptación y sostenibilidad de la propuesta de saneamiento desarrollada para el sur de Tamaulipas.

4.5.- Diseño Biodigestor

Este apartado da cumplimiento al objetivo específico relacionado con el desarrollo de la propuesta de diseño de una letrina con arrastre hidráulico integrada a un biodigestor anaerobio, mediante el cálculo y dimensionamiento técnico de sus componentes principales, considerando las condiciones climáticas y operativas del municipio de Altamira, Tamaulipas.

4.5.1.- Carga Diaria

$$CD = (PT * RCD) + PT$$

Donde:

CD = Carga diaria

PT = Producción total

RCD = Relación de carga diaria (relación solido-liquido)

PT = Producción diaria por persona * Cantidad de personas

Carga Diaria Excremento

Producción por persona

De Tabla 2. Inventario y descripción de los sustratos de los poblados

Sustrato	Descripción	Disponibilidad anual	Suministro (kg/a)	Vs. Fracción (tal como se recibió)	Rango específico de producción de metano ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{ODM}$)	Fracción de nitrógeno (masa seca)	Relación C/N
Humanure	Recogida en sanitarios secos domésticos. Cada habitante produce 0,20 kg al día.	Continua	16 352	0.250	0.178–0.327	0.06	8
Orina	Se recoge en baños secos domésticos a razón de 0,5 L (0,5 kg) por persona por día.	Continua	40 880	0.0171	0.178–0.327	0.17	0.8

$$0.2 \text{ kg de masa seca} = 0.2 \text{ litros} = 0.0002 \text{m}^3$$

$$PT = 0.0002 * 5 = 0.001 \text{m}^3$$

Relación de carga diaria de Bell & Sharma 2022 = 1:3

$$CD_E = (0.001 * 3) + 0.001 = 0.004 \text{m}^3$$

Carga Diaria Orina

Producción por persona de De Table 1. *Inventory and description of village substrates en The CO2 cutting cost of biogas from humanure and livestock manure* (Agar et al., 2022)

$$P_{PP} = 0.5lt = 0.0005m^3$$

$$PT = 0.0005 * 5 = 0.0025m^3$$

$$CD_O = (0.0025 * 1) + 0.0025 = 0.005m^3$$

$$CD_T = CD_E + CD_O$$

$$CD_T = 0.004 + 0.005 = 0.009m^3$$

4.5.2.- Tiempo de Retención hidráulica

Este parámetro depende de la temperatura promedio del lugar, la cual se obtuvo a partir de datos de las estaciones del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), dando un promedio de 24.52 °C, por lo que se consideró un tiempo promedio de 42 días (Herrero, 2019).

Tabla 5: Estaciones del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) ubicadas en la zona Sur de Tamaulipas.

Estación	Nombre	Estado	Municipio	Situación	Latitud	Longitud	Fecha de Registro	Cantidad de Registros	Primer Registro	Ultimo Registro	Temperatura Mínima Registrada (°C)	Temperatura Máxima Registrada (°C)	Temperatura Promedio General (°C)
28003	Aldama (DGE)	Tamaulipas	Aldama	Activa	22.92888889 °	-98.075 °	18/10/2024	5270	01/01/1985	17/07/2020	-0.5	44.5	23.78
28006	Barberena	Tamaulipas	Altamira	Activa	22.62083333 °	-98.17083333 °	18/10/2024	14418	10/02/1972	31/07/2013	-8.5	45.5	25.22
28025	Ejido Tres de Mayo	Tamaulipas	Altamira	Suspendida	22.4 °	-98.01666667 °	18/10/2024	4220	01/01/1971	31/12/1983	1.0	43.5	24.77
28029	El Mayab	Tamaulipas	Gonzalez	Activa	22.91555556 °	-98.34555556 °	18/10/2024	104855	01/01/1962	24/02/2020	-0.6	44.0	23.82
28054	Esteros	Tamaulipas	Altamira	Suspendida	22.52055556 °	-98.12694444 °	18/10/2024	9045	01/06/1960	30/06/1991	-1.5	45.5	25.14
28055	Los Tomates	Tamaulipas	Altamira	Activa	22.45277778 °	-98.19722222 °	18/10/2024	21508	01/01/1961	30/09/2022	-2.0	44.0	24.67
28078	Punta Jerez	Tamaulipas	Aldama	Suspendida	22.8975 °	-97.79333333 °	18/10/2024	12357	11/01/1924	30/11/1960	-2.0	41.0	23.62
28110	Tampico (OBS)	Tamaulipas	Altamira	Activa	22.3775 °	-97.91333333 °	18/10/2024	23369	01/01/1951	31/03/2023	-0.5	42.7	24.58
28111	Tampico	Tamaulipas	Tampico	Activa	22.23861111 °	-97.87888889 °	18/10/2024	21192	01/01/1961	31/12/2019	-1.5	43.5	24.85
28130	El Barranco	Tamaulipas	Altamira	Activa	22.56583333 °	-97.905 °	18/10/2024	16347	01/01/1972	30/04/2023	-12.0	44.0	24.46
28138	Tancol	Tamaulipas	Tampico	Suspendida	22.29416667 °	-97.88611111 °	18/10/2024	9531	01/03/1972	31/08/2011	-2.0	41.0	24.81
28145	El Apuro	Tamaulipas	Aldama	Activa	22.72138889 °	-97.92138889 °	18/10/2024	15683	02/05/1973	30/06/2020	-3.5	44.0	24.74
28163	El Carrizal	Tamaulipas	Aldama	Activa	22.85861111 °	-98.23333333 °	18/10/2024	15587	01/07/1977	31/07/2020	-0.5	47.0	23.57
28196	La Cabecera	Tamaulipas	Aldama	Activa	22.95555556 °	-97.93583333 °	18/10/2024	14275	23/11/1978	17/07/2020	-5.0	44.5	24.07
28201	El Nacimiento	Tamaulipas	Aldama	Activa	22.96305556 °	-98.12805556 °	18/10/2024	14467	01/03/1979	16/07/2020	-6.0	44.0	23.35
28203	Santa Juana	Tamaulipas	Altamira	Activa	22.77888889 °	-98.10333333 °	18/10/2024	14053	07/03/1979	31/07/2019	-6.0	45.5	24.97
28206	El Chijol	Tamaulipas	Aldama	Activa	22.87694444 °	-98.035 °	18/10/2024	14706	26/11/1980	31/12/2023	-5.5	47.8	24.81
30084	La Michoacana	Veracruz de Ignacio de la Llave	Panuco	Activa	22.355 °	-98.2675 °	18/10/2024	15969	01/01/1972	31/01/2024	-3.5	47.0	25.00
30127	Tampico Alto	Veracruz de Ignacio de la Llave	Tampico Alto	Activa	22.10916667 °	-97.79861111 °	18/10/2024	3926	01/01/2003	25/01/2024	2.0	39.0	23.66
30166	Tamos	Veracruz de Ignacio de la Llave	Panuco	Activa	22.21611111 °	-97.99861111 °	18/10/2024	19717	01/01/1961	28/02/2023	0.0	47.0	24.79
30194	Villa Cuauhtemoc	Veracruz de Ignacio de la Llave	Pueblo Viejo	Suspendida	22.18333333 °	-97.85 °	18/10/2024	14169	30/11/1947	31/03/1987	2.0	40.0	25.25
30268	La Potosina	Veracruz de Ignacio de la Llave	Panuco	Activa	22.32444444 °	-98.1475 °	18/10/2024	13102	30/03/1974	30/06/2024	0.0	40.0	25.66

Tabla 3: Relación entre temperatura y tiempo de retención recomendado para lograr producciones de biogás aceptables

Temperatura (°C)	Tiempo de Retención (TR)
35	25 - 30 días
30	30 - 40 días
25	35 - 50 días
20	50 - 65 días
15	65 - 90 días
10	90 - 125 días

Martí-Herrero, J. (2019). Biodigestores Tubulares: guía de diseño y manual de instalación.

El tiempo de retención seleccionado resulta adecuado para las condiciones térmicas del sur de Tamaulipas, donde las temperaturas medias anuales favorecen la actividad de bacterias mesofílicas responsables de la digestión anaerobia.

4.5.3.-Volumen liquido de biodigestor

$$VL = CD_T * Trh$$

Donde:

Trh = Tiempo de retención hidráulica

$$VL = 0.009 * 42 = 0.378m^3$$

Fase gaseosa al 25%

Se calculo a partir del volumen total del biodigestor

$$VT = VG + VL$$

$$VG = VT * 0.25$$

$$\therefore VG = (VG + 0.378) * 0.25$$

$$VG = 0.25VG + 0.0945$$

$$VG - 0.25VG = 0.0945$$

$$0.75VG = 0.0945$$

$$VG = \frac{0.0945}{0.75} = 0.126m^3$$

4.5.4.- Volumen Total

$$VT = VL + VG$$

$$VT = 0.378 + 0.126 = 0.504m^3$$

El volumen calculado permite garantizar una capacidad suficiente para el tratamiento de residuos domésticos generados por una vivienda rural promedio.

4.5.5.- Radio del biodigestor

El diámetro de nuestro biodigestor será 1 m para así poder tener una altura no muy elevada.

4.5.6.- Largo del biodigestor

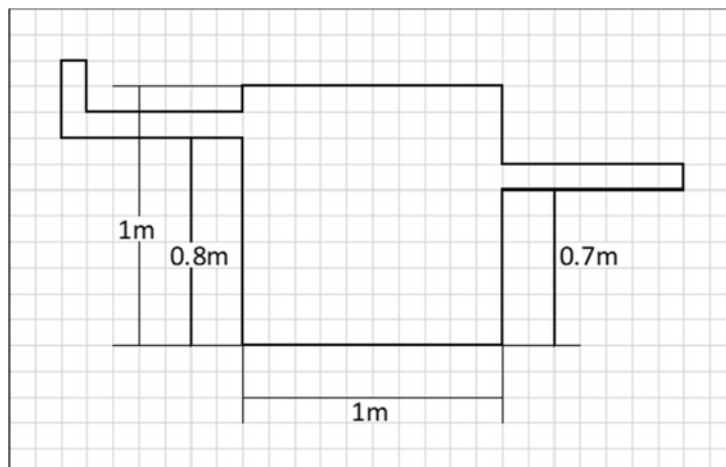
A partir de la fórmula del volumen del cilindro despejamos:

$$V = (\pi * r^2) * l$$

$$l = \frac{V}{(\pi * r^2)} = \frac{0.504}{\pi * (0.5^2)} = 0.6517m$$

Dado que la altura deberá ser un número entero para facilitar su construcción, se redondea por lo que su altura será de 1 m.

La altura de salida será más cercana a la calculada, siendo esta 0.7 m, para la entrada se considerará una altura de 0.8 m, con el fin de que esta se encuentre en un nivel superior a la salida, de modo que el tanque nunca llegue a sobrellenarse.



Los resultados obtenidos en el dimensionamiento del biodigestor permitieron desarrollar una propuesta técnicamente funcional y adaptada a las condiciones ambientales y operativas del área de estudio. El cálculo de la carga diaria, tiempo de retención y volumen total del sistema demostró la viabilidad de implementar un biodigestor anaerobio doméstico como alternativa de saneamiento descentralizado para comunidades rurales sin acceso a drenaje sanitario.

4.6.- Evaluación de la viabilidad de la propuesta

Con el propósito de determinar la factibilidad de implementación de la letrina con arrastre hidráulico conectada a un biodigestor anaerobio en las comunidades rurales del municipio de Altamira, se realizó una evaluación cualitativa de su viabilidad ambiental y social. Esta evaluación permitió identificar los beneficios potenciales que la tecnología propuesta puede aportar en comparación con las prácticas actuales de disposición de excretas presentes en localidades sin acceso a drenaje sanitario.

4.6.1.- Viabilidad ambiental

La evaluación ambiental indica que la implementación de biodigestores anaerobios representa una alternativa favorable para disminuir los impactos negativos generados por la disposición inadecuada de residuos sanitarios en zonas rurales.

a) Reducción de la contaminación del suelo

En diversas comunidades rurales, la ausencia de sistemas adecuados de saneamiento provoca que las excretas humanas sean depositadas directamente en fosas rudimentarias o letrinas tradicionales con escasa capacidad de confinamiento. Esta situación favorece la infiltración de materia orgánica, microorganismos patógenos y nutrientes hacia el suelo circundante.

La propuesta desarrollada incorpora un biodigestor impermeabilizado que permite contener los residuos dentro de una estructura cerrada, donde son sometidos a procesos de digestión anaerobia. Como resultado, se reduce significativamente la infiltración directa de contaminantes al suelo y se disminuye el riesgo de degradación de sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Adicionalmente, el proceso de estabilización de la materia orgánica reduce la carga contaminante presente en el efluente final, favoreciendo una disposición más segura de los residuos tratados.

b) Protección de cuerpos de agua

Uno de los principales riesgos asociados a la falta de drenaje sanitario es la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos por infiltración o escurrimiento de aguas residuales sin tratamiento.

Las comunidades rurales de Altamira se encuentran cercanas a lagunas, esteros, canales y cuerpos de agua que forman parte de los ecosistemas característicos de la región. La infiltración de excretas humanas puede introducir microorganismos patógenos, nitrógeno, fósforo y materia orgánica, afectando la calidad del agua y los ecosistemas asociados.

El uso del biodigestor reduce la carga contaminante de los residuos antes de su disposición final, disminuyendo la posibilidad de contaminación de acuíferos y cuerpos receptores. Asimismo, el diseño considera criterios de ubicación e impermeabilización que contribuyen a proteger las fuentes de abastecimiento de agua utilizadas por las comunidades.

Por lo anterior, la propuesta se alinea con los principios de protección de recursos hídricos establecidos en la legislación ambiental y sanitaria vigente.

c) Disminución de riesgos sanitarios

La disposición inadecuada de excretas constituye un factor importante en la transmisión de enfermedades gastrointestinales, parasitarias y otras afecciones relacionadas con el saneamiento deficiente.

La utilización de una letrina con arrastre hidráulico reduce el contacto directo de los usuarios con los residuos, mientras que el proceso de digestión anaerobia contribuye a disminuir la presencia de microorganismos patógenos mediante condiciones de confinamiento y degradación biológica.

Asimismo, la eliminación de focos de contaminación expuestos al ambiente disminuye la proliferación de insectos y otros vectores asociados a la transmisión de enfermedades.

Como resultado, la implementación de la tecnología propuesta tiene el potencial de mejorar las condiciones sanitarias de las viviendas y contribuir a la protección de la salud pública en las comunidades beneficiadas.

4.6.2.- Viabilidad social

La viabilidad social de la propuesta fue evaluada considerando aspectos relacionados con la aceptación de la tecnología por parte de la población, su compatibilidad con las costumbres locales y la integración visual de la infraestructura dentro del entorno habitacional.

a) Compatibilidad con las prácticas sanitarias de la población

Uno de los factores que favorecen la adopción de la propuesta es que el sistema mantiene un esquema de uso similar al de un sanitario convencional.

A diferencia de otras alternativas de saneamiento que requieren modificaciones importantes en los hábitos de los usuarios, la letrina con arrastre hidráulico conserva procedimientos de utilización ampliamente conocidos por la población. Esto reduce la necesidad de capacitación especializada y facilita la transición desde sistemas tradicionales hacia una alternativa sanitaria más segura.

Además, el uso de agua para el arrastre de residuos contribuye a mejorar la percepción de higiene y comodidad por parte de los habitantes, incrementando la probabilidad de utilización continua del sistema.

b) Integración arquitectónica con las viviendas

El diseño arquitectónico propuesto contempla el empleo de materiales comúnmente utilizados en la región, tales como block, concreto, madera y acabados tradicionales.

Esta característica permite que la infraestructura sanitaria mantenga una apariencia compatible con las viviendas rurales existentes, evitando contrastes visuales significativos que pudieran generar rechazo por parte de los usuarios.

La posibilidad de adaptar acabados, colores y elementos constructivos a las características de cada comunidad favorece la apropiación de la infraestructura y fortalece su integración dentro del paisaje habitacional.

c) Potencial de aceptación comunitaria

Como parte de la estrategia de socialización del proyecto se elaboró un tríptico informativo destinado a difundir los beneficios ambientales, sanitarios y económicos de la propuesta.

La información presentada permitió comunicar de manera sencilla el funcionamiento del biodigestor, sus ventajas respecto a las letrinas tradicionales y su contribución a la protección del medio ambiente y la salud pública.

La combinación de una tecnología de fácil utilización, materiales accesibles y acciones de difusión comunitaria incrementa el potencial de aceptación social de la propuesta. Asimismo, el aprovechamiento del digestato como fertilizante representa un beneficio adicional que puede fortalecer el interés de la población por adoptar este tipo de sistemas.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten considerar que la propuesta presenta una alta viabilidad social para su aplicación en comunidades rurales y periurbanas del municipio de Altamira, especialmente en aquellas que carecen de acceso a infraestructura convencional de drenaje sanitario.

4.6.3.- Síntesis de la evaluación

La evaluación realizada indica que la letrina con arrastre hidráulico conectada a un biodigestor anaerobio constituye una alternativa viable para atender la problemática de saneamiento en comunidades rurales de Altamira. Desde el punto de vista ambiental, contribuye a reducir la contaminación del suelo y del agua, así como los riesgos asociados a la exposición a excretas humanas. Desde la perspectiva social, presenta características compatibles con las necesidades y costumbres de la población, favoreciendo su aceptación y posible implementación futura.

Capítulo 5- Conclusiones

La presente investigación permitió analizar la problemática del saneamiento básico en comunidades rurales y periurbanas del sur de Tamaulipas, particularmente en el municipio de Altamira, donde aún existen localidades con acceso limitado o inexistente a sistemas de drenaje sanitario. A partir del análisis territorial, técnico, ambiental y social realizado, fue posible desarrollar una propuesta de saneamiento descentralizado basada en una letrina con arrastre hidráulico integrada a un biodigestor anaerobio, utilizando materiales locales y criterios de integración arquitectónica.

1. Definir geográficamente el área de estudio correspondiente a las comunidades rurales del sur de Tamaulipas.

Se logró delimitar geográficamente el área de estudio mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), información cartográfica oficial del INEGI y datos institucionales relacionados con infraestructura sanitaria. Esta delimitación permitió identificar las características territoriales y ambientales de las comunidades rurales y periurbanas del municipio de Altamira, así como reconocer las zonas con mayores rezagos en servicios básicos. El análisis territorial evidenció la coexistencia de áreas urbanas industrializadas con localidades rurales que aún presentan importantes carencias de saneamiento, situación que justifica la necesidad de soluciones descentralizadas adaptadas al contexto regional.

2. Elaborar un mapa de acceso al drenaje para las comunidades rurales del sur de Tamaulipas, identificando zonas de mayor vulnerabilidad.

El diagnóstico espacial realizado permitió identificar 36 comunidades con ausencia total o parcial de drenaje sanitario, representando aproximadamente 2,288 familias afectadas. La

elaboración del mapa temático facilitó la visualización de la distribución territorial de la problemática y permitió reconocer zonas prioritarias para la implementación de sistemas sanitarios alternativos. Asimismo, el análisis confirmó que las localidades rurales y periurbanas presentan condiciones de vulnerabilidad ambiental y sanitaria debido al uso de letrinas rudimentarias, fosas improvisadas o descargas directas al suelo, prácticas que incrementan el riesgo de contaminación de cuerpos de agua y propagación de enfermedades.

3. Identificar los materiales de construcción locales disponibles en las comunidades rurales seleccionadas, evaluando su disponibilidad, costo y propiedades para su uso en la construcción de letrinas.

La investigación permitió identificar materiales de construcción regionales adecuados para la implementación de sistemas sanitarios de bajo costo, entre ellos piedra caliza, blocks, madera regional y materiales tradicionalmente utilizados en las viviendas rurales del sur de Tamaulipas. La evaluación realizada demostró que dichos materiales presentan ventajas en términos de disponibilidad, accesibilidad económica y adaptación climática. Además, su utilización favorece la integración estética de las letrinas con las viviendas existentes, contribuyendo a mejorar la percepción social del sistema y promoviendo una mayor apropiación comunitaria.

4. Desarrollar propuestas de diseño para letrinas con arrastre hidráulico que utilicen materiales locales y que se integren armoniosamente con la tipología de las viviendas de las comunidades rurales seleccionadas.

Se desarrolló una propuesta de diseño de letrina con arrastre hidráulico integrada a un biodigestor anaerobio, considerando criterios de ingeniería sanitaria, digestión anaerobia y adaptación arquitectónica. El sistema propuesto demostró viabilidad conceptual para su aplicación en comunidades rurales sin acceso a drenaje convencional, al combinar

condiciones de higiene mejoradas, reducción de olores y tratamiento parcial de residuos orgánicos mediante biodigestión. El dimensionamiento realizado, basado en parámetros de carga diaria, tiempo de retención hidráulica y volumen útil del biodigestor, permitió establecer un modelo técnicamente funcional acorde con las condiciones climáticas del sur de Tamaulipas. Asimismo, la incorporación de estrategias de difusión social y adaptación estética fortalece el potencial de aceptación comunitaria y uso sostenido del sistema.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la problemática del saneamiento en comunidades rurales y periurbanas del sur de Tamaulipas continúa representando un desafío ambiental, sanitario y social que requiere soluciones descentralizadas, accesibles y culturalmente aceptables. La ausencia de infraestructura de drenaje en diversas localidades favorece prácticas inadecuadas de disposición de excretas, incrementando riesgos de contaminación del suelo, cuerpos de agua superficiales y acuíferos, así como la incidencia de enfermedades relacionadas con el saneamiento deficiente.

La propuesta de letrina con arrastre hidráulico integrada a un biodigestor anaerobio constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible para comunidades sin acceso a sistemas convencionales de alcantarillado. El diseño desarrollado aprovecha las condiciones climáticas cálidas de la región, favorables para la digestión anaerobia, y considera principios de bajo costo, simplicidad operativa y aprovechamiento de materiales locales.

De igual manera, se concluye que la aceptación social representa un factor determinante para el éxito de proyectos de saneamiento rural. En este sentido, la integración arquitectónica de las letrinas con las viviendas, junto con la difusión comunitaria y el uso de tecnologías familiarmente aceptadas como el arrastre hidráulico, contribuyen significativamente a incrementar la apropiación y permanencia del sistema sanitario.

Finalmente, esta investigación aporta una base técnica y metodológica para futuras propuestas de saneamiento descentralizado en comunidades rurales mexicanas. Aunque el estudio se limitó al diseño conceptual y evaluación de viabilidad, los resultados obtenidos demuestran el potencial de este tipo de tecnologías para mejorar la calidad de vida, proteger el medio ambiente y contribuir al cumplimiento del derecho humano al saneamiento y los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con agua limpia y saneamiento.

Capítulo 6- Bibliografía

Agar, D. A., Athanassiadis, D., & Pavelka, B. J. (2022). The CO₂ cutting cost of biogas from humanure and livestock manure. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102381>

Aragón, L. C. (1997). *Energía eléctrica y medio ambiente en México*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica-y-medio-ambiente-en-M%C3%A9xico-Arag%C3%B3n/5a5514c14c1ead6e25f097c439847e4652ddb8c4>

Bell, D., & Sharma, R. (2022). *Feces*. <https://doi.org/10.53347/rID-151529>

Carrasco, J. V. (s. f.). *Letrina con arrastre hidráulico y biodigestor*. https://www.bibliocad.com/es/biblioteca/letrina-con-arrastre-hidraulico-y-biodigestor_118991/

Castillo, D. (2025, abril 24). ¿Cómo funciona un biodigestor? AQUAPLAS. <https://aquaplas.com/como-funciona-un-biodigestor/>

Coelho, P. (2012, julio 27). *Biodigestores Contínuos e de Batelada: Funcionamento e Vantagens*. Engquimicasantosp. <https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/07/biodigestores.html>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). Estadísticas del agua en México 2023. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-del-agua-en-mexico>

CONAVI. (2024). *Principales características de las viviendas en México ENIGH 2024*. SIESCO. https://siesco.conavi.gob.mx/doc/analisis/2025/Principales_caracter%C3%ADsticas_de_las_viviendas_en_M%C3%A9xico.pdf

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (2023). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>

Culala, J. L. O. (2023). *Diseño y emplazamiento de un biodigestor tipo tubular en la comunidad Zhuya-Cañar*. Universidad Politecnica Salesiana.

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5.^a ed.). Instituto de Geografía, UNAM.

Guibi, J., Bernal, M., & Cañete, F. (2019). Producción de Biogás a partir de residuos orgánicos generados en el Hospital de Clínicas: Un estudio preliminar. *Anales de la Facultad de Ciencias Médicas (Asunción)*, 52 n.º3. <https://doi.org/10.18004/anales/2019.052.03.53-058>

INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

Jenkins, J. (2019). *The Humanure Handbook (4th edition) Shit in a Nutshell*.

Leite, V. D., & Povinelli, J. (1999). COMPORTAMENTO DOS SÓLIDOS TOTAIS NO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E INDUSTRIAIS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, 3(2), 229-232. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n2p229-232>

Ley General de Salud (LGS). (2023). *Ley General de Salud*. Diario Oficial de la Federación. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf_mov/Ley_General_de_Salud.pdf

Lima, E. J. de, Silva, R. M. da, Teles, R. da S., & Dias, F. F. da S. (2020). Avaliação do funcionamento de um biodigestor de baixo custo. *Diversitas Journal*, 5(4), 2394-2407. <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v5i4-1262>

López, A., & Irene, Y. (2021). *Aplicación de la tecnología de biodigestores con arrastre hidráulico en unidades básicas de saneamiento en caserío de puerto pata, Huánuco*.

Manyi-Loh, C., Mamphweli, S., Meyer, E., Okoh, A., Makaka, G., & Simon, M. (2015). Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. En *Biological Treatment of Solid Waste* (pp. 47-82). Apple Academic Press.

Martí-Herrero, J. (2019). Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación. RedBioLAC. <https://www.redbiolac.org/>

Metcalf & Eddy. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.

México. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2024). Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>

México. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2024). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>

Nicho Alvarado, O. J., Namay Villanueva, L., Chimoy Gomez, J. G., & Cárdenas Durand, A. G. (2021). *METANOGENESIS Y BIODIGESTORES*.

NOM-002-SEMARNAT-1996. (1998). Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4863829&fecha=03/06/1998

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Guidelines on sanitation and health. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241514705>

OMS & UNICEF. (2023). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender. World Health Organization and UNICEF. <https://washdata.org/reports>

Organización de las Naciones Unidas. (2010). Resolución aprobada por la Asamblea General el 28 de julio de 2010: El derecho humano al agua y el saneamiento (A/RES/64/292). <https://undocs.org/es/A/RES/64/292>

Organización de las Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. <https://sdgs.un.org/es/2030agenda>

- Orrico, A. C. A., Lopes, W. R. T., Manarelli, D. M., Orrico Junior, M. A. P., & Sunada, N. da S. (2016). Codigestão anaeróbia dos dejetos de bovinos leiteiros e óleo de descarte. *Engenharia agrícola*, 36(3), 537-545. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n3p537-545/2016>
- Orrico Júnior, M. A. P., Orrico, A. C. A., & Lucas Júnior, J. de. (2009). Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica. *Engenharia agrícola*, 29(3), 474-482. <https://doi.org/10.1590/s0100-69162009000300014>
- Ponce, R. J. T. (2019). *DISEÑO DE LETRINAS CON ARRASTRE HIDRÁULICO*. <https://pdfcookie.com/documents/diseo-de-letrinas-con-biodigestorxlsx-ylj9p0xz8823>
- Rajendran, K., Aslanzadeh, S., & Taherzadeh, M. J. (2012). Household biogas digesters—A review. *Energies*, 5(8), 2911-2942. <https://doi.org/10.3390/en5082911>
- RedBioLAC. (s. f.). *RedBioLAC*. RedBioLAC. Recuperado 12 de diciembre de 2025, de <https://redbiolac.org/biodigestores>
- Santos, S. J. dos, Santos, E. L., Santos, E. L., Barbosa, J. H., Pereira Junior, D. A., Pontes, E. da C., Oliveira, W. D. S. de, & Santana Filho, E. (2017). Construção de um biodigestor caseiro como uma tecnologia acessível a suinocultores da agricultura familiar. *PubVet*, 11(3), 290-297. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v11n3.290-297>
- Secretaría de Desarrollo Agrario, T. y. U. (2025). Principales características de las viviendas en México ENIGH 2024. En *Comisión Nacional de Vivienda*. https://siesco.conavi.gob.mx/doc/analisis/2025/Principales_caracter%C3%ADsticas_de_las_viviendas_en_M%C3%A9xico.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). Informe de la situación del medio ambiente en México. SEMARNAT.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2023). Normales climatológicas del estado de Tamaulipas. Comisión Nacional del Agua.
- UNICEF. (2021). Water, sanitation and hygiene (WASH). United Nations Children's Fund. <https://www.unicef.org/wash/>

Xavier, C. de A. N., & Lucas Júnior, J. de. (2010). Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo. *Engenharia agrícola*, 30(2), 212-223. <https://doi.org/10.1590/s0100-69162010000200003>